

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

К. М. Рудаков, Ю. М. Дифучин

ЧИСЛОВІ МЕТОДИ ДИНАМІКИ І МІЦНОСТІ МАШИН СТАЦІОНАРНІ ЗАДАЧІ КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Динаміка і міцність машин»
спеціальності 131 Прикладна механіка

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2023

УДК 519.6 : 517.9 : 539.3

P19

Автори: *Рудаков Костянтин Миколайович*, д-р техн. наук, проф.
Дифучин Юрій Миколайович, канд. техн. наук, ст. викладач

Рецензент *Гондляр О.В.*, д-р техн. наук, проф.,
кафедра ХПСМ ІХФ Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського

Відповідальний редактор *Крищук М.Г.*, д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 3 від 07.12.2023 р.)
за поданням вченої ради навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту
(протокол № 3 від 30.10.2023 р.)*

Рудаков К.М.

P19 Числові методи динаміки і міцності машин. Стаціонарні задачі [Електронний ресурс] : комп'ютерний практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Динаміка і міцність машин» спец. 131 Прикладна механіка / К. М. Рудаков, Ю. М. Дифучин; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 106 с.

Представлений набір завдань комп'ютерного практикуму з навчальної дисципліни «Числові методи динаміки і міцності машин. Стаціонарні задачі», який проводиться на основі програмного забезпечення FEMAP версії 11.4 з безоплатною ліцензією. Практикум надає можливість отримати навички застосування інструментів програмного комплексу, який за основу має метод скінченних елементів, на прикладах моделювання характерних для спеціалізації «Динаміка і міцність машин» крайових задач.

Навчальний посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Динаміка і міцність машин» спеціальності 131 Прикладна механіка. Буде корисним для студентів, що вивчають числові розрахунки на ПЕОМ теплового та напружено-деформованого стану елементів конструкцій.

УДК 519.6 : 517.9 : 539.3

Реєстр. № НП 23/24-156. Обсяг 5,3 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© К. М. Рудаков, Ю. М. Дифучин, 2023
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 1 Статичний та частотний аналіз елемента конструкції. Пластина з отворами.....	8
2. КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 2 Створення геометричної моделі складної конструкції (шнека).....	14
3. КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 3 Статичний аналіз елемента конструкції. Зразок з концентратором напружень.....	19
4. КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 4 Статичний термопружний аналіз елемента конструкції. Диск газотурбінного двигуна (ГТД).....	28
5. КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 5 Статичний термопружний аналіз елемента конструкції. Згин трубний.....	37
6. КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 6 Статичний пружно-пластичний аналіз елемента конструкції. Пружно-пластичний аналіз товстостінної труби.....	45
7. КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 7 Статичний контактний аналіз елемента конструкції.....	53
8. КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 8 Статичний аналіз елемента конструкції. Зразок з тріщиною.....	65
9. КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 9 Статичний аналіз елемента конструкції із композиційного матеріалу..... Модель перша..... Модель друга..... Модель третя..... Модель четверта.....	81 82 87 92 95
10. КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 10 Аналіз елемента конструкції на пружну стійкість.....	99
ЛІТЕРАТУРА	106

ВСТУП

Одним із основних завдань фахівця з динаміки та міцності машин є створення актуальних комп'ютерних моделей елементів різноманітних механічних систем та проведення їх розрахунків. Для виконання таких робіт створено не один десяток визнаних у світі програмних комплексів, один з них – FEMAP від фірми Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.

FEMAP (аббревіатура від Finite Element Modeling And Postprocessing) є середовищем для підготовки скінченно-елементних моделей конструкцій і відповідних крайових задач для подальших їхніх розрахунків (FEM, пре-процесор), а також (A) для перегляду й документування результатів розрахунків (P, пост-процесор). Рідний процесор для FEMAP – це Nastran (від Nasa Structural Analysis).

На 2023 рік актуально багато версій FEMAP із вбудованим процесором NX Nastran.

Популярність FEMAP обумовлена відносною простотою й, одночасно, значною універсальністю, оскільки FEMAP має інструменти інтерфейсу (імпорту й експорту проекту і його частин) з багатьма програмними комплексами.

Для виконання завдань комп'ютерного практикуму рекомендовано користуватися навчальними версіями FEMAP, зокрема, версією 14.1, яку можна отримати на фірмі Siemens в режимі OnLine після реєстрації. Також можна застосовувати вбудований (англомовний) довідник (викликається командами меню «Help»). Є й інша довідкова література.

За допомогою FEMAP можна підготувати для NX Nastran такі основні крайові задачі: теплопровідність стаціонарна й нестаціонарна, статичний (термо)пружний стан (лінійна або нелінійна пружність), статичний (термо)пластичний стан, (термо)повзучість, стійкість пружних тіл, частотний аналіз, динамічне ударне, гармонійне й «випадкове» навантаження, оптимізація конструкції, контактний квазістатичний аналіз.

Конструкція й/або середовище може бути апроксимована різноманітним набором скінченних елементів: одно-, двох- і тривимірних з різними властивостями, з різних матеріалів, характеристики яких можуть залежати від температури або швидкості деформування.

Повний цикл проведення аналізу елемента конструкцій складається з таких етапів:

- аналіз геометрії елемента конструкції (тіла), умов його навантаження, властивостей матеріалу (і_v) тіла, створення розрахункової моделі;
- введення теплофізичних і механічних характеристик матеріалів;
- створення геометричної й на її основі – скінченно-елементної моделі тіла; або створення скінченно-елементної моделі тіла відразу, без геометричної моделі;
- введення початкових і граничних умов;
- створення завдань на розрахунки;
- проведення розрахунків;
- візуалізація отриманих результатів і їхній критичний аналіз;
- при необхідності – модифікація скінченно-елементної моделі тіла, характеристик матеріалів, початкових і граничних умов, повторне проведення розрахунків;
- фіксація результатів (створення малюнків растрової графіки, виведення на друкувальний пристрій текстової й/або графічної інформації, передавання в інші програми).

Користувач повинен бути знайомим з основами теорій теплопровідності, пружності, пластичності, повзучості, коливань і стійкості, які застосовуються при постановках відповідних крайових задач; а також з методом розв'язку цих задач – методом скінченних елементів.

Розглянемо кілька важливих понять (визначень) FEMAP.

Робоче поле – поле «вікна» FEMAP, створене із застосуванням технології комп'ютерної графіки OpenGL, у якому зображені об'єкт або графік. Поточні текстові повідомлення виводяться на інше поле – «**Messages**» (повідомлень).

ID – внутрішній ідентифікаційний номер (код) введених значущих об'єктів: точок, ліній, поверхонь, об'ємів, функцій, матеріалів, наборів властивостей і т.п. Вводиться автоматично або користувачем. Для кожного типу об'єктів нумерація є окремою.

Inc (приріст) – величина автоматичного збільшення **ID** з появою нового об'єкта.

Title – назва деяких введених значущих об'єктів: функцій, матеріалів, поверхонь, об'ємів, наборів властивостей і т.п. Вводиться автоматично або користувачем.

ID й Title потрібні для надання можливості адресного доступу до об'єктів при подальшій роботі з ними.

DOF – ступені вільності кожного вузла скінченно-елементної сітки. Їх шість: три – переміщення (Translation) уздовж кожної координатної осі (позначаються як TX, TY та TZ), три – обертання (Rotation) вузла навколо осей, паралельних до кожної координатної осі (позначаються як RX, RY і RZ).

Workplane (робоча площина) – допоміжна площина із самостійними координатами X та Y. Призначення: полегшення побудови геометричних об'єктів. Координати введених на робочій площині геометричних об'єктів автоматично перераховуються в поточну глобальну систему координат (**Csys**): декартову, циліндричну або сферичну. Значна частина інструментів для побудови елементів геометрії працює тільки у **Workplane**.

Деякі дуже важливі властивості FEMAP й NX Nastran, які користувачеві необхідно враховувати завжди:

- FEMAP створений проект зберігає в **єдиному** файлі проекту, з розширенням імені **.modfem**;
- FEMAP не має конкретної системи вимірів геометричних і фізичних величин. Тому при створенні моделі користувачеві необхідно вибрати якусь конкретну систему вимірів, наприклад: м, Н, Па = Н/м², сек., Дж, К, і дотримуватися її. Є й кілька виключень, зокрема; кути задаються в градусах, швидкість обертання – в обертах за одиницю часу; прискорення обертання – у радіанах, віднесених до квадрата одиниці часу;
- команда «**Undo**» (скасування останньої дії, крок назад) у FEMAP фактично не має повної або фіксованої глибини, хоча максимально можлива кількість кроків назад може встановлюватися користувачем. Не можна скасувати необоротні по суті команди з меню «**File**», «**View...**», «**Window...**» і т.п. Наприклад, запис у файл моделі, ущільнення цього файлу (командою **File Rebuild...**). Є й інші необоротні ситуації. Тому не слід розраховувати на те, що завжди можна буде повернутися до якої-небудь попередньої ситуації. Повідомлення про скасування команди з'являється на поле «**Messages**»;
- NX Nastran при кожному розрахунку створює кілька нових файлів, які не видаляє, а також тимчасові файли, розмір яких залежить від розміру завдання й може бути дуже значним (сотні мегабайт, гігабайти, десятки й сотні гігабайт). Якщо в процесі роботи NX Nastran відбувся крах операційної системи або програми (наприклад, внаслідок вимикання електроенергії), то тимчасові файли не зникнуть. Тому користувачеві потрібно іноді самостійно видаляти непотрібні файли з **трьох** папок: із **робочої** та **системної ...\\Temp** та з папки **...\\Scratch**, особливо після краху системи або програми;

- якщо не створити файл проекту (не дати команду на збереження проекту у файлі з розширенням імені **.modfem**) і дати команду на проведення розрахунків, то FEMAP і NX Nastran будуть створювати частину своїх численних файлів у своїй папці ...**FemapvXXX**, де й так багато своїх файлів програми й, за ідеєю, не повинно бути сторонніх файлів. Коли така ситуація відбулася, то необхідно очистити папку ...**FemapvXXX** від зайвих файлів, відсортувавши їх, наприклад, за часом створення;
- у випадку відсутності папки ...**Scratch** розрахунок проводитися не буде, а за діагностичними повідомленнями FEMAP й NX Nastran дійсну причину відмови в розрахунках зрозуміти практично неможливо;
- NX Nastran не сприймає в іменах папок і файлів деякі символи, розділові знаки, зокрема, й знак пробілу. Це проявляється у «втрагі» деяких файлів, зокрема, файлу із завданням на розрахунок (з розширенням імені **.dat**). Результат – відсутність процесу рахування з незрозумілою діагностикою причини. Тому рекомендується створювати імена із застосуванням латиниці, цифр, знаків **_** , **-** , які NX Nastran точно розпізнає.

Побажання. Щоб швидко очистити робочу папку від вже непотрібних файлів від NX Nastran, є сенс створити командний файл з таким вмістом:

```
del *.mon1, del *.mon2, del *.mon3, del *.log, del *.op2, del *.f04, del *.f06,
del *.dat, del *.dball, del *.master, del *.asm, del *.asg, del *.pch, del *.plt
```

Цей файл зберегти в робочу папку з ім'ям, наприклад, **delete_tempfileNastran.bat**. Після його запуску в роботу всі вказані типи вже непотрібних файлів, характерних для NX Nastran, будуть видалені.

Деякі «гарячі клавіші», які допомагають працювати над проектом:

Клавіші	Призначення
F1	Виклик діалогу « Help » (Допомога)
F2	Виклик діалогу « Workplane Management » зміни робочої площини
F4	Команда « Save... » збереження проекту в файлі
F5	Виклик діалогу « View Select » (налаштування перегляду результатів розрахунків й функцій)
F6	Виклик діалогу « View Option » (налаштування зображень)
F7	Виклик діалогу « View Zoom » (зміни масштабу зображення)
F8	Виклик діалогу « View Rotate » (призначення кутів огляду зображення)
Ctrl+Z,	Команди « Undo » (відмова від останньої дії) та « Redo »

Ctrl+Shift+Z	(відмова від останньої команди « Undo »)
Ctrl+C	Копіювання зображення активного вікна
Ctrl+A	(Autoscale) – стрибкоподібне переміщення зображення в центр робочого поля зі зміною масштабу зображення до стандартного
Ctrl+G	Повна регенерація зображення робочого поля

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 1


Статичний та частотний аналіз елемента конструкції.

Пластина з отворами.

Завдання: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової задачі про напружено-деформований стан елемента конструкції, провести його статичний та частотний аналіз.

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Створення геометричної моделі

1. Запустити програму FEMAP. За допомогою команди **File→Save...** зберегти проєкт у файлової системі (потім періодично зберігати поточну ситуацію за допомогою кнопки  або через **Save as** з новими іменами файлів відповідно до номеру виконаного пункту);

2. За допомогою команди **Tools→Workplane...** встановити опцію «**Draw Workplane**» – показати на робочому полі робочу площину (жовта рамка);

3. За допомогою команди **Geometry→Curve – Line→Rectangle...** створити у робочій площині (обрати за допомогою кнопки «**Methods ^**» варіант «**Locate in Workplane**») прямокутник на основі точок з координатами X= -10 мм, Y= -5 мм; X=10 мм, Y=5 мм;

4. За допомогою команди **Geometry**→**Curve** – **Circle**→**Center...** створити у робочій площині три кола: $X = -7.5$ мм, $Y = 2.5$ мм, $R = 1.5$ мм; $X = -7.5$ мм, $Y = -2.5$ мм, $R = 1.5$ мм; $X = 5.0$ мм, $Y = 0$ мм, $R = 2.5$ мм;

5. За допомогою команди **Modify**→**Fillet...** створити округлення з радіусом $R = 5$ мм у кутах правої частини пластини: обрати дві лінії, що сходяться у куту, призначити радіус та допоміжну точку десь між майбутніми центром дуги та дугою;

6. За допомогою команди **Geometry**→**Boundary Surface**→**From Curves...** створити із замкнених ліній та кіл поверхню (див. рис. 1.1.,*a*).

7. За допомогою команди **Tools**→**Workplane...** прибрати опцію «**Draw Workplane**».

Етап 2. Створення скінченно-елементної сітки

8. За допомогою команди **Model**→**Material...** створити матеріал: назвати його як **Steel_20**, ввести модуль Юнга $E = 2e5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$ та масову густина **Mass Density** = $8e-9$;

9. За допомогою команди **Model**→**Property...** створити «властивість» скінченних елементів (CE):

- зі списку «**Material**» – обрати матеріал **Steel_20**,
- ініціювати кнопку «**Elem/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**»,
- у секції «**Plane Elements**» обрати тип CE «**Plate**»,
- після команди «**OK**» на панелі «**Define Property – PLATE Element Type**» задати товщину CE $T1 = 0.8$ мм, а також ввести назву в полі **Title**: **Plate**;

10. За допомогою команди **Mesh**→**Mesh Control**→**Default Size...** встановити **Element Size** = 0.5 мм;

11. За допомогою команди **Mesh**→**Geometry**→**Surface...** обрати поверхню пластини,

- на панелі «**Automesh Surfaces**», що з'явиться, ініціювати кнопку **More Options...**, обрати створену раніше «**Property**»,
- послідовно встановити опції «**Midside Nodes**» та «**Move to Geometry**» (проміжні вузли – на геометрію), дати команду «**ОК**».

На поверхні пластини з'явиться сітка СЕ (див. рис. 1.1.,*б*);

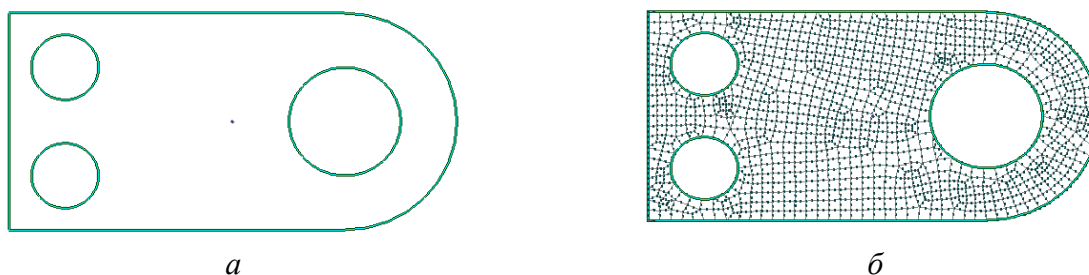


Рис. 1.1. Моделі пластини з отворами.
a – геометрична;
б - скінченно-елементна

Етап 3. Створення завдання для статичного розрахунку елемента конструкції

12. За допомогою команди **Model**→**Load**→**On Surface...** створити набір для навантажень:

- обрати поверхню, на панелі «**Create Load on Surfaces**» у списку обрати варіант навантаження «**Pressure**» та ввести значення **Pressure**=1.0 МПа;

13. За допомогою команди **Model**→**Constraint**→**Nodal...** створити набір для закріплень,

- потім за допомогою кнопки «**Method ^**» обрати метод «**On Curve**»,
- обрати лінію – вертикальну зліва,
- на панелі, яка з'явиться після команди «**ОК**», у секції «**DOF**» встановити прапорці для **TX, TZ, RX, RY, RZ**.
- Після команди «**ОК**» – обрати лівий верхній вузол, у ньому встановити прапорці для всіх ступенів свободи (**Fixed**).
- Після команди «**ОК**» дати відповідь «**Yes**»;


14. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**»,


- ініціювати кнопку «**New...**»,
- на панелі «**Analysis Set**» обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**1..Static**» (тобто статична задача), «**OK**»;



15. Кнопкою **Analysis...** запустити процес аналізу.


Етап 4. Результати статичного розрахунку



16. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...** , **Delete→ ...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися;

17. Після закінчення розрахунків стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель «**Select PostProcessing Data**». На ній у вікні «**Output Set**» обрати набір результатів;

- у вікні «**Deform**» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**1..Total Translation**);
- у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**), обрати **7033..Plate Top Von Mises Stress**, дати команду «**OK**».
- Для відображення результатів на контурі (див. рис. 1.2.,*a*) достатньо ініціювати кнопку .

18. За допомогою кнопки  (або  для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**), закріплення (**Constraint**) та тиск (**Pressure**);

19. За допомогою кнопки  можна включити режим показу деформованого стану (**Deformed**) – див. рис. 1.2.,*б* (повернуто);

20. За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно). Назва вектора виводиться на робочому полі зліва внизу.

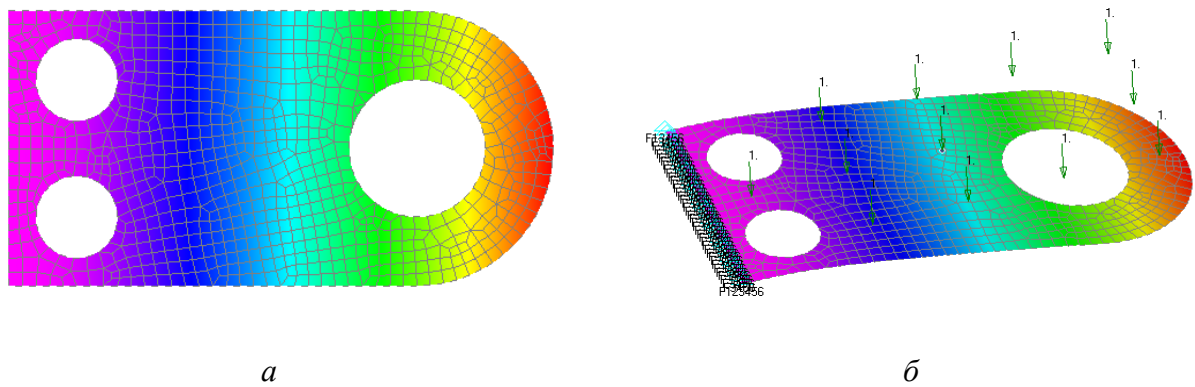


Рис. 1.2. Відображення результатів статичних розрахунків.
a - переміщень на контурі;
б - вигляд деформації

Для перевірки: значення напружень за Мізесом на верхній поверхні пластини **Plate Top Von Mises Stress** (3247 МПа), а максимальне значення повних переміщень **Total Translation** (2.561 мм) (червоний колір на рис. 1.2.,*a*, рис. 1.2.,*б*).


Етап 5. Створення завдання для частотного аналізу

21. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», ініціювати кнопку «**New...**»,

- на панелі «**Analysis Set**» обрати «**Analysis Type**» значення «**2.Normal Modes/Eigenvalue** » (тобто задача на визначення форм коливань та власних частот), «**OK**»;


22. Кнопкою **Analysis...** запустити процес аналізу.



Етап 6. Результати частотного розрахунку

23. Після закінчення розрахунків кнопкою  (**Post Data**) викликати панель «**Select PostProcessing Data**».

- На ній у вікні «**Output Set**» обрати набір результатів (**2..Mode 1, ...** та потім – інші);
- у вікні «**Deform**» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**1..Total Translation**);

- у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**1..Total Translation**), «**OK**»;

24. За допомогою кнопки  включити режим показу анімації деформованого стану (**Deformed**);

25. За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти набір результатів (наступні зі списку, відповідно). Назва набору та значення власної частоти виводиться на робочому полі зліва внизу. Ті зони на пластині, що позначені кольором, що відповідає значенню **0** (див. низ кольорової гами), звуться *вузлами коливань*. Перегляньте всі форми коливань пластини;

26. Командою **View→Advanced Post→Animation...** можна викликати панель «**Animation Control**», на якій, зокрема, за допомогою кнопок «**Slower**», «**Faster**», «**Pause**», «**Play**» та інших можна змінювати швидкість анімації, зупиняти або запускати її тощо. Степінь анімації можна змінити так:

- дати команду **View→Options...**,
- в категорії «**PostProcessing**», обрати опцію «**Deformed Style**»
- в полі «**Scale %**» змінити значення, наприклад, на 2.

Команда «**Apply**» ініціює призначення без виходу з діалогу, команда «**OK**» зберігає призначення, а команда «**Cancel**» – скасовує всі призначення, зроблені після виклику діалогу.

Завдання для самостійної роботи: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової задачі про напружено-деформований стан власного елемента конструкції аналогічної форми, провести його статичний та частотний аналіз.

Зміст звіту: файли у форматі **.modfem**, де представлені моделі з розрахунками елемента конструкції з Комп'ютерного практикума № 1 та з завдання для самостійної роботи, прислати на електронну адресу поштової скриньки викладача.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 2


Створення геометричної моделі складної конструкції (шнека)

Завдання: створити в середовищі FEMAP геометричну модель шнека (рис. 2.1.,б).

Дані для виконання: зовнішній діаметр барабана шнека дорівнює 200 мм; довжина барабана дорівнює 600 мм; діаметр шнека зовнішній дорівнює 250 мм; крок шнека дорівнює 80 мм; товщина гвинтової частини шнека дорівнює 4 мм; кількість витків шнека дорівнює 8.

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Створення геометричної моделі гвинтової поверхні

1. Запустити програму FEMAP. За допомогою команди **File→Save...** зберегти проект у файлової системі (потім періодично зберігати поточну ситуацію за допомогою кнопки  або через **Save as** з новими іменами файлів відповідно до номеру виконаного пункту);

2. За допомогою команди **Geometry→Point...** створити точку з координатами $X=125$ мм, $Y=0$ мм; $Z=-25$ мм. Комбінація клавіш «**Ctrl+A**» дозволяє побачити створену точку;

3. За допомогою команди **Geometry→Rotate→Point...** створити 30 копій точки методом обертання навколо осі Z на кут 18 градусів з одночасним зміщенням у напрямку осі Z на величину $80/(360/18)=4$ мм:

- обрати вже створену точку, вказати кількість копій (**Repetitions=30**)
- положення осі обертання (для полів X – два нулі, для полів Y – теж два нулі, для полів Z – нуль та одиниця; кнопка «**Preview**» показує напрямок вектора),
- кут обертання (**Rotation Angle=18**)
- крок зміщення при копіюванні (**Translation Distance=4**);

4. Повернути зображення так, щоб бачити усі точки та їх чергу;

5. За допомогою команди **Geometry→Curve – Spline→Points...** провести сплайнову криву через всі створені точки:

- на панелі призначення точок обрати кнопкою «**Methods**» варіант «**On Point**»,
- починаючи з крайньої точки по чергові обирати точки та давати команду «**OK**» (або краще – натискати на клавішу «**Enter**»).
- Коли всі точки будуть з'єднані лініями – двічі дати команду «**Cancel**»;

6. За допомогою команди **Geometry→Point...** створити точку з координатами $X=95$ мм, $Y=0$ мм; $Z= - 25$ мм (на панелі призначення точок обрати за допомогою кнопки «**Methods** ^» варіант «**Locate**», тобто у просторі);

7. На основі нової точки повторити пункти 3, 4 та 5 – створити нову сплайнову криву;

8. На основі двох сплайнових кривих створити поверхню:

- дати команду **Geometry→Surface→Aligned Curves...**, обрати обидві сплайнові криві, дати команду «**OK**».
- Якщо поверхня не створюється, а з'являється повідомлення «**Failed to loft Surface ...**», то необхідно змінити напрямок однієї з ліній: дати команду **Modify→Update Other→Reverse Curve...**, обрати одну з ліній, дати команду «**OK**».

Етап 2. Геометрична модель листової частини шнека

9. На основі поверхні створити «тверде» тіло – гвинтову частину:

- дати команду **Geometry→Solid→Extrude...**, на панелі, що з'явиться, за допомогою кнопки «**Surface...**» обрати створену поверхню;
- за допомогою кнопки «**Along Vector...**» вказати напрям – вздовж осі **Z** (для полів X – два нулі, для полів Y – теж два нулі, для полів Z – нуль та одиниця; кнопка «**Preview**» показує напрямок вектора);
- у полі «**To Depth**» встановити товщину гвинтової частини шнека: **4**; дати команду «**OK**»;

10. Відрізати дефектні кінці тіла (сплайнові криві на обох кінцях мають дещо іншу апроксимацію):

- дати команду **Geometry→Solid→Slice...**, обрати всі тверді тіла (**Select All**), дати команду «**OK**».
- На панелі, що з'явиться, вказати 0, 0, 0 для X; 0, 0, 1 для Y та 0, 1, 0 для Z. Кнопка «**Preview**» показує положення площини розсікання. Дати команду «**OK**»;

11. За допомогою команди **Delete→Geometry→Solid...** обрати кінці гвинтової частини шнека та дати команду «**OK**» для видалення.

12. Дати команду **Delete→Geometry→Point...**, обрати всі об'єкти даного класу (**Select All**) – очистити геометрію від вже непотрібних об'єктів – точок (потрібні точки залишаться!). Повинні залишитися дві частини гвинта шнека, у сумі – це повний виток;

13. За допомогою команди **Geometry→Copy→Solid...** зробити ще 7 копій, з одночасним переміщенням вздовж осі Z на відстань 80 мм:

- обрати всі (**Select All**) частини шнека;
- вказати кількість копій (**Repetitions= 7**),
- напрямок та відстань копіювання (для полів X – два нулі, для полів Y – теж два нулі, для полів Z – 0 та 80; кнопка «**Preview**» показує напрямок вектора);

14. За допомогою команди **Geometry→Solid→Add...** «зшити» окремі частини в одне тіло: обрати всі (**Select All**), дати команду «**OK**». Результат зображено на рис. 2.1.,а.

Етап 3. Створення геометричної моделі шнека цілком

15. За допомогою команди **Geometry→Solid→Primitives...** створити циліндричну частину шнека: обрати примітив **Cylinder**, задати Radius= 100, довжину Height= 600;

16. За допомогою команди **Geometry→Solid→Slice...** обрізати надлишки:

- обрати тіло (воно одне), дати команду «**ОК**».
- На панелі, що з'явиться, вказати 0, 1, 0 для X; 0, 0, 1 для Y та 0, 0, 0 для Z. Кнопка «**Preview**» показує положення площини розсікання.
- Дати команду «**ОК**».
- Знов дати ту ж команду, обрати велику частину тіла, дати команду «**ОК**».
- На панелі, що з'явиться, вказати 0, 1, 0 для X; 0, 0, 1 для Y та 600, 600, 600 для Z. Кнопка «**Preview**» показує положення площини розсікання. Дати команду «**ОК**»;

17. За допомогою команди **Delete→Geometry→Solid...** обрати відрізані кінці гвинтової частини шнека та дати команду «**ОК**» для видалення.

18. За допомогою команди **Tools→Workplane...** викликати панель «**Workplane Management**», на якій ініціювати опцію «**Draw Workplane**» та потім кнопку «**Offset Distance**», де у полі «**Z Offset**» ввести значення 10 мм. Дати команду «**Done**»;

19. За допомогою команди **Geometry→Solid→Primitives...** створити циліндричну порожнину шнека:

- обрати примітив «**Cylinder**», задати Radius= 94, довжину Height= 580,
- у секції «**Material**» встановити варіант «**Remove**», а у секції «**Direction**» повинне бути «**Positive**»;

20. За допомогою команди **Geometry→Solid→Primitives...** створити циліндричну маточину:

- обрати примітив «**Cylinder**», задати Radius= 40, довжину Height= 50,
- у секції «**Material**» встановити варіант «**Add**», а у секції «**Direction**» повинне бути «**Negative**»;

21. Аналогічно п.18 перемістити робочу площину на 50 мм у зворотному напрямку, тобто у полі «**Z Offset**» ввести значення -50 мм;

22. За допомогою команди **Geometry→Curve – Circle→Center...** створити у робочій площині коло: обрати за допомогою кнопки «**Methods**» варі-

ант «**Locate in Workplane**», ввести координати точки $X=Y=0$ мм, потім радіус $R=20$ мм;

23. За допомогою команди **Geometry**→**Boundary Surface**→**From Curves...** створити із кола поверхню. За допомогою команди **Geometry**→**Solid**→**Extrude...** створити наскрізний отвір: застосувати опції «**Remove - Hole**», «**Both Directions**» та «**Thru All**»;

24. За допомогою команди **Geometry**→**Curve** – **Line**→**Rectangle...** створити прямокутник на основі точок з координатами $X=26$ мм, $Y=7.5$ мм; потім $X=0$ мм, $Y=-7.5$ мм;

25. Аналогічно п.23 створити з прямокутника поверхню, а потім – наскрізний шліц у отворі. Остаточний результат зображено на рис. 2.1.,б.

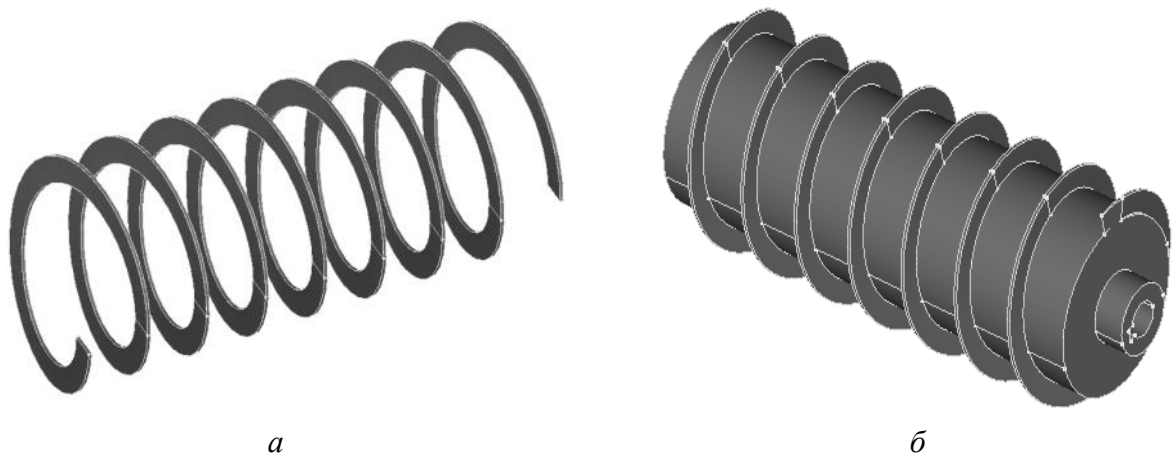


Рис. 2.1. Вигляд геометричних моделей.
a – листової частини шнека;
б – шнека цілком

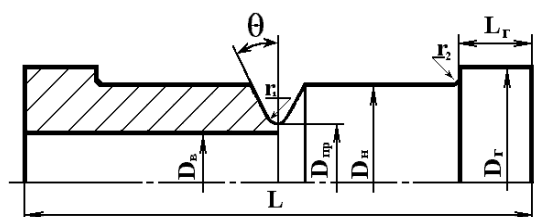
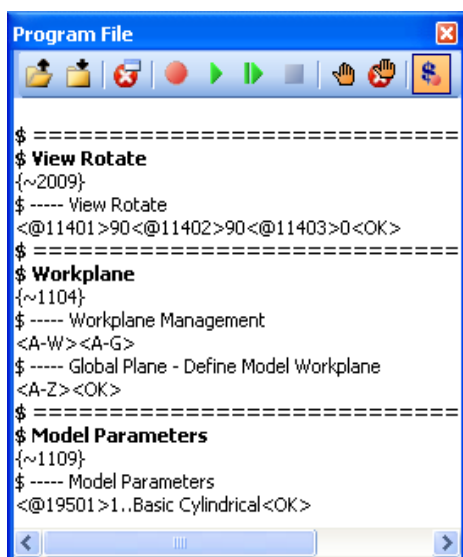
Завдання для самостійної роботи: створити геометричну модель шнека вказаних розмірів, але із другою маточиною на протилежному торці з зовнішнім радіусом, що дорівнює $40+k$, та довжиною, що дорівнює $50+k$, де k - остання цифра номера студента у списку групи.

Зміст звіту: файли у форматі **.modfem**, де представлені моделі з розрахунками елемента конструкції з Комп'ютерного практикума № 2 та з завдання для самостійної роботи, прислати на електронну адресу поштової скриньки викладача.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 3

Статичний аналіз елемента конструкції. Зразок з концентратором напружень.

Завдання: із застосуванням макросу (рис. 3.1.,*а*) провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової статичної задачі про тепловий та напружено-деформований стан осесиметричного зразка (рис. 3.1.,*б*) та провести його аналіз.



Дані для виконання:		
загальна довжина зразка L , мм		40
довжина голівки $L_{Г}$, мм		9.0
діаметр голівки $D_{Г}$, мм		18.0
зовнішній діаметр трубки $D_{н}$, мм		14.0
внутрішній діаметр трубки $D_{в}$, мм		9.0
кут проточки θ , град		30
радіус кривизни дна проточки r , мм		0.6
діаметр проточки $D_{пр}$, мм		10.6
радіус округлення r_2 , мм		1.0

а

б


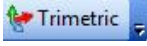



Рис. 3.1. До створення моделі осесиметричного тіла.
а - панель програмування з прикладом тексту макросу;
б) - схема та геометричні дані зразка

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Створення макросу для налаштування середовища під осесиметричну задачу

Макрос – це команди на спеціалізованій мові, які виконують вказані дії. Макрос у FEMAP записується у файл. Призначення макросу – виконувати дії швидко та без помилок. **Увага:** для команд потрібно використовувати клавіші клавіатури та/або команди *меню*, а не їхні дублери у вигляді кнопок інструментів.


Для осесиметричної задачі потрібно: розвернути глобальні осі так, щоб вісь X була вертикальною, а вісь Z – горизонтальною; помістити робочу площину в площину XZ, призначити циліндричну систему в якості глобальної координатної системи.

1. Запустити програму FEMAP;
2. Дати команду **Tools→Programming→Program File**. З'являється панель програмування «**Program File**». Ініціювати кнопку . FEMAP готовий до створення макросу;
3. Дати команду **File→Preferences ...**, на вкладці **Views** у трьох полях «**Trimetric**» ввести 0, 90, 90, дати команду «**OK**»;
4. Ініціювати кнопку  на панелі **View Orient**. Дати команду **OK**. Гарантовано встановили осі в потрібних напрямках: ось X – вертикально вгору, ось Z – зліва-направо;
5. Дати команду **Tools→Workplane...** (або натиснути клавішу «**F2**»); на панелі, що з'явиться, встановити опцію «**Draw Workplane**», ініціювати кнопку «**Global Plane...**», обрати варіант «**ZX Plane**» і дати команду «**OK**».
6. Дати команду **Tools→Parameters...**, на панелі, що з'явиться, обрати у полі «**Coord Sys**» значення **1..Basic Cylindrical**, дати команду «**OK**»;
7. Дати команду закінчення створення макросу: знов ініціювати кнопку .
8. Зберегти макрос: ініціювати кнопку ; з'явиться стандартна діалогова панель запису файлу (з розширенням імені **.pro**). Потрібно знайти йому місце у файлової системі та ввести ім'я файлу **AxiSym.pro**;
9. На панелі програмування макросу «**Program File**» кнопкою  запустити макрос у роботу з метою перевірки;

10. Закрити панель **Program File**;
11. Дати команду **Tools→Toolbars→Customize...**, на вкладці «**User Commands**» – створити команду користувача:
 - у полі «**Command Name**» призначити назву команди: **AxiSym**;
 - у полі «**Program**» за допомогою кнопки знайти у файльовій системі створений файл макросу, дати команду «**Add**» (на великому полі з'явиться ім'я команди) та «**Close**».
 - Знов дати команду **Tools→Toolbars→Customize...**, на вкладці «**Commands**» у полі **Categories**:
 - обрати рядок «**User Commands**», з поля «**Commands**» шляхом «перетаскування» за допомогою «миші» напису **User Commands** додати цю групу команд у меню FEMAP,
 - дати команду «**Close**»;
12. За допомогою створеної команди меню **User Commands→AxiSym** запустити макрос у роботу з метою перевірки;
13. Дати команду **File→Preferences ...**, ініціювати кнопку «**Reset All**» (понизу), дати команду «**Yes**» та потім «**Yes**».

Етап 2. Створення геометричної моделі осесиметричного зразка

Геометрична модель створюється у відповідності до схеми зразка (див. рис. 3.1.,б, причому на робочій площині FEMAP створюється лише заштрихована частина – розріз зразка. При цьому враховується повздовжня та осьова симетрії.

14. За допомогою команди **File→Save...** зберегти проєкт у файльовій системі (потім періодично зберігати поточну ситуацію за допомогою кнопки  або через **Save as** з новими іменами файлів відповідно до номеру виконаного пункту);

15. За допомогою команди **Geometry→Point...** у робочій площині (ініціювати кнопку «**Methods^**», встановити варіант «**Locate in Workplane**») створити точки з координатами: X=0 мм, Y=4.5 мм; X=0 мм, Y=9 мм; X=9 мм, Y=9 мм; X=9 мм, Y=7 мм; X=20 мм, Y=7 мм; X=20 мм, Y=4.5 мм. Комбі-

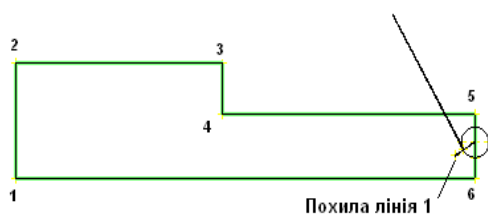
нація клавіш «**Ctrl+A**» дозволяє побачити створені точки (на рис. 3.2.,*a* вони пронумеровані);

16. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Points...** створити з'єднані лінії, що описують контур (поки ще без проточки);

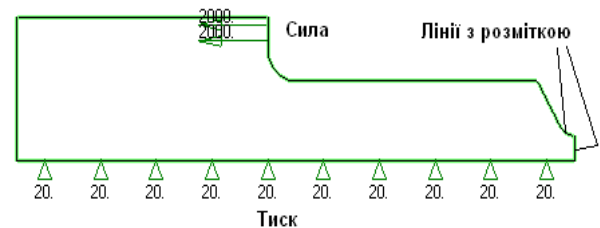
17. За допомогою команди **Geometry→Curve-Circle→Center...** створити коло: ввести координати центра $X=20$ мм, $Y=5.9$ мм, а потім – радіус 0.6 мм;

18. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Angle to Curve...** створити похилу лінію:

- ініціювати кнопку «**Methods^**», встановити варіант «**On Point**»,
- обрати на робочому полі точку – центр кола;
- на панелі «**Line at Angle from Curve**» обрати для поля «**From Curve**» нижню горизонтальну лінію,
- встановити кут -30 градусів (або 30; це залежить від того, як проведена лінія: відповідно від точки 1 до точки 6 (див. рис. 3.2.,*a* або навпаки);
- на наступній панелі обрати допоміжну точку, що лівіше від центра кола;



a



б

Рис. 3.2. До створення моделі.

a) – створення точок та похилої лінії;

б) - лінії призначення по 10 скінченних елементів та створення навантаження

19. За допомогою команди **Geometry→Point...** створити точку пересікання кола та похилої лінії: ініціювати кнопку «**Methods^**», встановити варіант «**Intersect - Curves**»), обрати ці дві лінії, дати команду «**OK**»;

20. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Angle to Curve...** створити нову похилу лінію:

- ініціювати кнопку «**Methods^**», встановити варіант «**On Point**»,
- обрати на робочому полі точку – точку пересічення кола та першої похилої лінії;
- на панелі «**Line at Angle from Curve**» обрати для поля «**From Curve**» першу похилу лінію, встановити кут 90°;
- на наступній панелі обрати допоміжну точку, що лівіше від центра кола;

21. За допомогою команди **Modify→Extend...** продовжити створену лінію: обрати лінію, потім обрати допоміжну точку: будь-яку з точок головки зразка;

22. За допомогою команди **Modify→Trim...** відрізати надлишки ліній: обирати дві лінії, що пересікаються та мають надлишки, після команди «**OK**» вказувати на ту частину лінії, що є надлишком;

23. За допомогою команди **Modify→Fillet...** створити округлення: обрати дві лінії, встановити радіус 1.0 мм, а також допоміжну точку: десь там, де буде створена дуга округлення;

24. За допомогою команди **Geometry→Boundary Surface→From Curves...** створити із замкнених ліній поверхню;

25. Очистити геометрію від зайвих об'єктів: послідовно давати команди **Delete→Geometry→Curve...** та **Delete→Geometry→Point...**, обирати всі об'єкти даного класу (**Select All**).

Етап 3. Створення скінченно-елементної сітки зразка

26. За допомогою команди **Model→Material...** створити матеріал: назвати його як **Steel_20**, ввести модуль Юнга $E = 2e5$ МПа та коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$;

27. За допомогою команди **Model→Property...** створити «властивість» скінченних елементів (СЕ):

- зі списку «**Material**» – обрати матеріал **Steel_20**,
- ініціювати кнопку «**Elem/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**»,
- у секції «**Volume Elements**» обрати тип СЕ «**Axisymmetric**».
- Після команди «**ОК**» на панелі «**Define Property**» ввести назву: **Axis**;

28. За допомогою команди **Mesh→Mesh Control→Default Size...** встановити **Size =0.25** мм (це є максимальний розмір майбутніх скінченних елементів);

29. За допомогою команди **Mesh→Mesh Control→Size Along Curve...** зробити розмітку на дузі кола та лінії розсічення зразка на дві частини (див. рис. 3.2.,б): обрати ці лінії, призначити для них по 10 скінченних елементів;

30. За допомогою команди **Mesh→Geometry→Surface...** обрати поверхню,

- на панелі «**Automesh Surfaces**», що з'явиться, ініціювати кнопку «**More Options**»,
- обрати створену раніше «**Property**»,
- у секції «**Mesher**» обрати варіант «**Quard**»;
- у секції «**Node Options**» встановити опції «**Midside Nodes**» та потім «**Move to Geometry**» (проміжні вузли – на геометрію),
- дати команду «**ОК**». На поверхні пластини з'явиться сітка СЕ;

Етап 4. Створення завдання для розрахунку зразка

31. За допомогою команди **Model→Load→On Curve...** створити набір для навантажень:

- обрати лінію, яка зображає поверхню отвору зразка (нижня горизонтальна),
- на панелі «**Create Loads on Curves**» у списку обрати варіант навантаження «**Pressure**» (тиск), ввести значення **Pressure= 20** МПа,

- у полі **Coord Sys** обрати **1..Basic Cylindrical**, дати команду «**ОК**».
- Потім обрати праву лінію, яка зображує торець голівки (над радіусом округлення), на панелі,
- «**Create Loads on Curves**» у списку обрати варіант навантаження «**Force**» (сила),
- ввести значення **FZ = -2000 Н**,
- у полі **Coord Sys** обрати **1..Basic Cylindrical**;

32. За допомогою команди **Model→Constraint→Nodal...** створити набір для закріплень,

- за допомогою кнопки «**Methods ^**» обрати метод «**On Curve**»,
- обрати вертикальну лінію розсічення зразка навпіл (вертикальна лінія з розміткою),
- на панелі, яка з'явиться після команди «**ОК**», у секції «**DOF**» встановити «прапорець» для **TZ**;


33. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**»,


- ініціювати кнопку «**New...**»,
- на панелі «**Analysis Set**» обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**1..Static**» (тобто статична задача);



34. Кнопкою **Analysis...** запустити процес аналізу.


Етап 5. Результати розрахунку зразка

35. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно спочатку з повідомлень уяснити причини їх появи, потім за допомогою команд **Modify→Edit...**, **Delete→...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі так, щоб фатальні помилки не з'являлися;

36. Після закінчення розрахунків стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель «**Select PostProcessing Data**». На ній у вікні «**Output Set**» обрати набір результатів;



- у вікні «**Deform**» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**1.Total Translation**);
- у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**),
- обрати **6035..Axisym Von Mises Stress**, дати команду «**ОК**».
- Для відображення результатів на контурі (див. рис. 3.3.,*a*) достатньо ініціювати кнопку ;

37. За допомогою кнопки  (або  для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**);

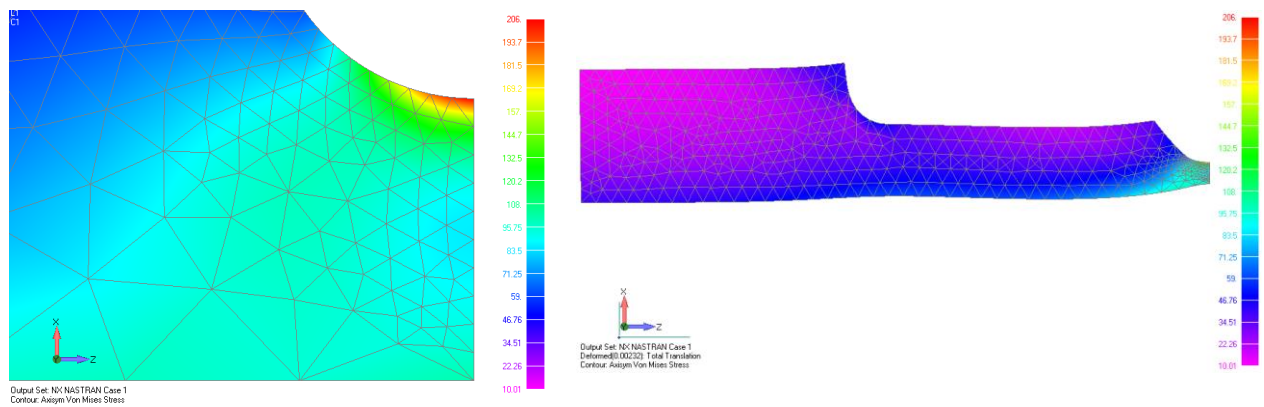
38. За допомогою кнопки  можна включити режим показу деформованого стану (**Deformed**) – див. рис. 3.3.,*б*. Щоб змінити розмах анімації, необхідно:

- клавішею «**F6**» викликати панель «**View Options**»,
- на ній в категорії «**Post processing**» обрати «**Deformed Style**»,
- потім у полі «**Scale %**» встановити інше значення.

Команда «**Apply**» ініціює призначення без виходу з діалогу, команда «**ОК**» зберігає призначення, а команда «**Cancel**» – скасовує всі призначення, зроблені після виклику діалогу;

39. За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно). Назва поточного вектора виводиться на робочому полі зліва внизу.

Для перевірки: максимальне значення повних переміщень (**Total Translation**) повинне дорівнювати 0.00232 мм та **Axisym Von Mises Stress** = 202.9 МПа (червоний колір на рис. 3.3.,*a*).



a

б

Рис. 3.3. Візуалізація розподілу напружень за Мізесом.

a) – у місці концентрації напружень;

б) - по всій моделі

Якщо значення **Axisym Von Mises Stress** приблизно у 6 разів більше вказаного (у декількох версіях програми сила трактується як прикладена на один радіан, а не на всі 2π радіан), то потрібно:

- за допомогою команди **Modify→Edit→Load – Definition...** викликати панель **Select Load Definition to Edit**,
- помітити **Force on Curve...** , дати «ОК»
- та ввести значення **FZ= -2000/6.28** (тобто розділити на 2π),
- отримати новий розв'язок (повторити п.34).

Як свідчить рис. 3.3.,*a*, кільцева проточка є значним концентратором напружень.

Завдання для самостійної роботи: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової статичної задачі про тепловий та напружено-деформований стан осесиметричного зразка, провести його аналіз.

Дані для розрахунків	
загальна довжина зразка L , мм	$1, k \cdot 40$
довжина голівки L_G , мм	$1, k \cdot 9.0$
діаметр голівки D_G , мм	$1, k \cdot 18.0$
зовнішній діаметр трубки D_H , мм	$1, k \cdot 14.0$
внутрішній діаметр трубки D_B , мм	$1, k \cdot 9.0$
кут проточки θ , град	30
радіус кривизни дна проточки r , мм	0.6
діаметр проточки D_{PP} , мм	$1, k \cdot 10.6$
радіус округлення r_2 , мм	1.0
Pressure	$1, k \cdot 20$ МПа

Значення k – це остання цифра номера студента у списку групи.

Зміст звіту: файли у форматі **.modfem**, де представлені моделі з розрахунками елемента конструкції з Комп'ютерного практикума № 3 та з завдання для самостійної роботи, прислати на електронну адресу поштової скриньки викладача.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 4


Статичний термопружний аналіз елемента конструкції. Диск газотурбінного двигуна (ГТД)

Завдання: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової статичної задачі про тепловий та напружено-деформований стан диска ГТД (рис. 4.1.,в) та провести його аналіз.

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Налаштування середовища під задачу

Для задачі потрібно: розвернути глобальні осі так, щоб вісь **X** була вертикальною, а вісь **Z** – горизонтальною; помістити робочу площину в площину **XZ**.

1. Дати команду **View→Rotate→Model...** (або натиснути клавішу «**F8**»); на панелі «**View Rotate**» встановити у полях секції «**View Rotate**» такі значення: $X=90$, $Y=90$, $Z=0$. Дати команду **OK**.
2. Дати команду **Tools→Workplane...** (або натиснути клавішу «**F2**»); на панелі, що з'явиться, встановити опцію «**Draw Workplane**», ініціювати кнопку «**Global Plane...**», обрати варіант «**ZX Plane**» і дати команду «**OK**».
3. За допомогою команди **File→Save..** зберегти проєкт у файлової системі (потім періодично зберігати поточну ситуацію за допомогою кнопки  або через **Save as** з новими іменами файлів відповідно до номеру виконаного пункту);

Етап 2. Створення геометричної моделі диска ГТД з лопаткою

Геометрична модель створюється у відповідності до наближеної схеми диска. При цьому враховується осьова циклічна симетрія.

4. За допомогою команди **Geometry→Point...** у робочій площині (ініціювати кнопку «**Methods^**»,
 - встановити варіант «**Locate Workplane**»).
 - створити точки з координатами **X** та **Y**: 10, 100; 10, 125; 3, 140; 2, 220; 15, 230; 15, 255; -10, 100; -10, 125; -3, 140; -2, 220; -15, 230; -15, 250. Комбінація клавіш «**Ctrl+A**» дозволяє побачити створені точки (на рис. 4.1.,*a* вони пронумеровані за порядком створення);
5. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Points...** створити з'єднувані лінії, що описують контур (поки ще без округлень, див. рис. 4.1,*a*);
6. За допомогою команди **Geometry→Point...** у робочій площині створити нові точки з координатами **X** та **Y**: -16, 202; -16, 208; 18.5, 207; 18.5, 213.

На рис. 4.1.,*a* вони пронумеровані за загальним порядком створення як 13, 14, 15 та 16;

7. Дати команду **Geometry→Point...**, ініціювати кнопку «**Methods^**»,

- обрати варіант **Onto Curve**, обрати поле **Curve ID** та потім обрати лінію, що з'єднує точки 9 та 10 (див. рис. 4.1.,*a*,
- ввести координати: 204, 0, -2, дати команду «**OK**».
- Знову обрати поле **Curve ID** та потім обрати ту ж лінію,
- ввести координати: 210, 0, -2, дати команду «**OK**».
- Знову обрати поле **Curve ID** та потім обрати лінію, що з'єднує точки 3 та 4 (див. рис. 4.1.,*a*,
- ввести координати: 205, 0, 2, дати команду «**OK**».
- Знову обрати поле **Curve ID** та потім обрати ту ж лінію,
- ввести координати: 211, 0, 2, дати команду «**OK**».

На рис. 4.1.,*a* точки пронумеровані за загальним порядком створення як 17, 18, 19 та 20;

8. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Points...** створити з'єднувані лінії між точками 17-13, 13-14, 14-18, 19-15, 15-16, 16-20 (див. рис. 4.1.,*a*);

9. За допомогою команди **Modify→Break...** розрізати лінії точками:

- обрати лінію, що з'єднує точки 3 та 4, дати команду «**OK**»;
- на панелі, що з'явиться, ініціювати кнопку «**Methods^**», встановити варіант «**On Point**»,
- обрати точку 20, дати команду «**OK**».
- Потім обрати лінію, що з'єднує точки 9 та 10, дати команду **OK**,
- на панелі, що з'явиться, обрати точку 18, дати команду «**OK**»

10. За допомогою команди **Modify→Filet...** створити округлення:

- на панелі, що з'являється, обирати дві лінії (**Curve 1** та **Curve 2**),
- ввести значення для радіуса округлення, а також (приблизно) координати точки на майбутній дузі округлення, дати команду «**OK**».

Радіуси такі: **4** мм – біля точок 1, 7 та 20; **10** мм – біля точок 2, 3, 8, 9; **5** мм – біля точок 17, 18 та 19; **3** мм – біля точок 4 та 10;

11. За допомогою команди **Geometry**→**Boundary Surface**→**From Curves...** створити контур перетину диска ГТД: обрати всі лінії, що створюють контур, дати команду «**ОК**». Результат зображений на рис. 4.1.,б;

12. За допомогою команди **Geometry**→**Solid**→**Revolve...** створити «тверде» тіло:

- на панелі, що з'явиться, ввести **всі нулі** для рядка «**Base**», а для рядка «**Tip**» – значення 0, 0, 1 (це напрямок осі обертання),
- дати команду «**ОК**»;
- на панелі, що з'явиться, увести в полі **Angle** значення 2.46575 (це є $1/(77 \times 2)$ частина від 360 градусів; тут 77 – кількість лопаток на диску ГТД),
- встановити опцію «**Both Directions**», дати команду «**ОК**»;

13. За допомогою клавіші «**F2**» викликати панель настроювання робочої площини, ініціювати кнопку «**Rotate...**», ввести **всі нулі** для рядка «**Base**», а для рядка «**Tip**» – значення 1, 0, 0 (це напрямок осі обертання), дати команду «**ОК**»; на панелі, що з'явиться, увести в полі «**Angle**» значення 12 (це кут, під яким встановлена лопатка);

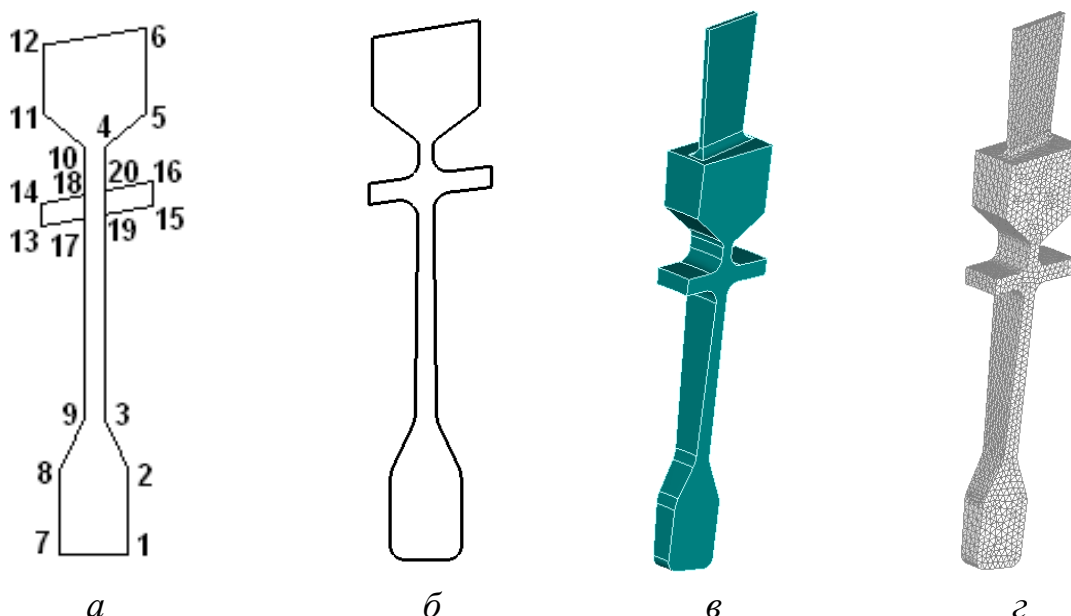


Рис. 4.1. До створення моделі диска ГТД з лопаткою.
а - з'єднувальні лінії, що описують контур (поки ще без округлень);
б - контур радіального перетину диска ГТД;
в - геометрична модель 1/77 частини диска ГТД з лопаткою;
г - сітка СЕ

14. За допомогою команди **Geometry→Point...** у робочій площині (ініціювати кнопку «**Methods^**»), встановити варіант «**Locate Workplane**») створити точки з координатами **X** та **Y**: -10, 240; 10, 240; -13, 297; 13, 300 – профіль майбутньої лопатки;

15. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Points...** створити з'єднувані лінії між чотирма створеними точками – отримати майбутній контур лопатки;

16. За допомогою команди **Geometry→Boundary Surface→From Curves...** створити контур лопатки: обрати всі лінії, що створюють контур, дати команду «**OK**»;

17. За допомогою команди **Geometry→Solid→Revolve...** створити «тверде» тіло – лопатку:

- на панелі, що з'явиться, ввести **всі нулі** для рядка «**Base**», а для рядка «**Tip**» – значення 0, 0, 1 (це напрямок осі обертання), дати команду «**OK**»;
- на панелі, що з'явиться, увести в полі **Angle** значення 0.25, встановити опцію «**Both Directions**», дати команду «**OK**»;

18. Очистити геометрію від зайвих об'єктів: послідовно давати команди **Delete→Geometry→Surface...**, **Delete→Geometry→ Curve...** та **Delete→Geometry→Point...**, обирати всі об'єкти даного класу (**Select All**);

19. За допомогою команди **Geometry→Solid→Filet...** увести округлення при основі лопатки: обрати 4 лінії при основі лопатки, , дати команду «**OK**», ввести значення радіуса: **3**, дати команду «**OK**». Результат – геометрична модель 1/77 частини диска ГТД з лопаткою (див. рис. 4.1.,в).

Етап 3. Створення скінченно-елементної сітки диска ГТД з лопаткою

20. За допомогою команди **Model→Material...** створити матеріал:

- назвати його як Titan BT3-1,
- ввести модуль Юнга $E=1.7e5$ МПа,

- коефіцієнт Пуассона $\nu=0.26$,
- коефіцієнт температурного подовження Expansion Coeff, $\alpha=1.2e-5$,
- коефіцієнт теплопровідності Conductivity, $k=0.023$ Вт/(мм К)
- густину матеріалу Mass Density $5.7e-6$ кг/мм³;

21. За допомогою команди **Model**→**Property...** створити «властивість» скінченних елементів (СЕ):

- зі списку «**Material**» – обрати матеріал **Titan BT3-1**,
- ініціювати кнопку «**Elem/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**»,
- у секції «**Volume Elements**» обрати тип СЕ «**Solid**».
- після команди «**OK**» на панелі «**Define Property**» ввести назву: **Solid_Titan**;

22. За допомогою команди **Mesh**→**Mesh Control**→**Default Size...** встановити **Size=2** (це є максимальний розмір майбутніх скінченних елементів);

23. За допомогою команди **Mesh**→**Geometry**→**Solids...** створити сітку скінченних елементів:

- на панелі «**Automesh Solids**», що з'явиться, обрати створену раніше «**Property**»,
- у секції «**Mesh Generation**» встановити опцію «**Midside Nodes**»;
- ініціювати кнопку «**Options...**», встановити опцію «**Midside Nodes on Surfaces**» (проміжні вузли – на поверхню),
- двічі дати команду «**OK**». Буде побудована сітка СЕ (див. рис. 4.1.,з).

Етап 4. Створення завдань для розрахунку диска ГТД з лопаткою, проведення розрахунків

24. За допомогою команди **Model**→**Load**→**On Surface...** створити набір для навантажень,

- обрати поверхню, яка є поверхнею отвору диска (у самому низу),

- на панелі «**Create Load on Surfaces**» у списку обрати варіант навантаження «**Temperature**», ввести значення **Temperature=300**;
- обрати поверхню лопатки, яка є видимою на рис. 4.1.,*в,г*, на панелі «**Create Load on Surfaces**» у списку обрати варіант навантаження «**Convection**» (конвекційний теплообмін) та ввести значення **Coefficient=0.0015**, ввести значення **Temperature=1000**;

25. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», ініціювати кнопку «**New...**», на панелі «**Analysis Set**» обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**20..Steady-State Heat Transfer**» (тобто задача стаціонарної теплопровідності), дати команду «**OK**»;

26. Кнопкою **Analysis...** запустити процес аналізу. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...**, **Delete→...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися;

27. За допомогою команди **Model→Load→From Output...** отримане температурне поле перевести у навантаження:

- на панелі, що з'явиться, *зліва* обрати «**Temperatures**», потім «**OK**»,
- у полі «**X Vector**» обрати зі списку **31..Temperature**;

28. За допомогою команди **Model→Load→Body...** задати початкову температуру: активувати **Thermal**, увести **Default Temperature T=293**;

29. За допомогою команди **Model→Constraint→Nodal...** створити набір для закріплень,

- за допомогою кнопки «**Methods ^**» обрати метод «**On Surface**», обрати дві поверхні, які є поверхнями розсічення диска,
- на панелі, яка з'явиться після команди «**OK**», обрати координатну систему: **Cylindrical**,
- у секції «**DOF**» встановити «прапорець» для **TT**.
- ще для будь-якого вузла, обраного на диску, у секції «**DOF**» встановити прапорець біля **TZ**;

30. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», ініціювати кнопку «**New...**», на панелі «**Analysis Set**» обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**1..Static**» (тобто статична задача), дати команду «**OK**»;

31. Кнопкою **Analysis...** запустити процес аналізу. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...**, **Delete→ ...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися;



32. За допомогою команди **Model→Load→Body...** задати обертове навантаження: активувати **Time/Freq Dependence**, ввести $Wz=20$ (об/с);



33. За допомогою команди **Model→Load→ On Surface...** створити силове навантаження на лопатку:


- спочатку обрати ту ж поверхню, на якій задавалися умови конвекційного теплообміну,
- на панелі «**Create Load on Surface**» у списку обрати варіант навантаження «**Pressure**» (тиск), ввести значення **Pressure=2** (МПа);



34. Кнопкою **Analysis...** запустити процес аналізу. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...**, **Delete→ ...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися.

Етап 5. Результати розрахунку диска ГТД з лопаткою

35. Після закінчення розрахунків стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель «**Select PostProcessing Data**». На ній у вікні «**Output Set**» обирається набір результатів; у вікні «**Deformation**» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**Deformed Style**); у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**). Для відображення результатів на контурі (див. рис. 4.2.) достатньо ініціювати кнопку .

36. За допомогою кнопки  (або  для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**);

37. За допомогою кнопки  можна включити режим показу деформованого стану (**Deformed**);

38. За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно).

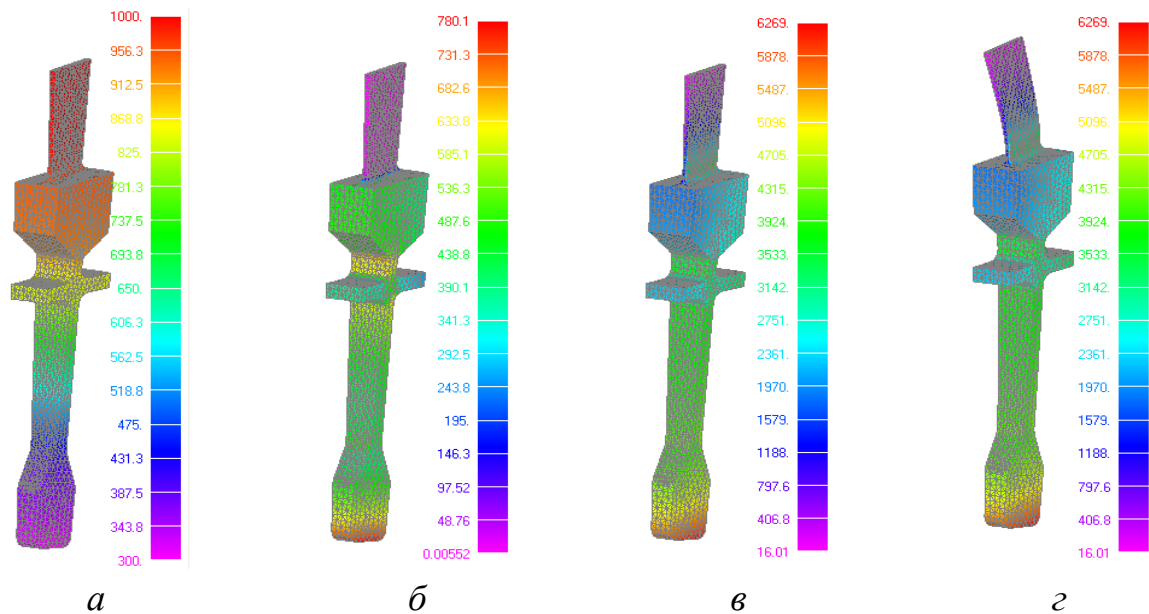


Рис. 4.2. Деякі результати розрахунків.

а – розподіл температури;

б - інтенсивності напружень тільки від температурного поля;

в - інтенсивності напружень від повного навантаження без анімації;

г - з анімацією

Як свідчать деякі результати розрахунків на рис. 4.2.:

- Температурне поле викликає значні напруження (780,1 МПа);
- Запропонована конструкція диска не є оптимальною: локальні напруження є дуже великими (6269 МПа), що набагато перевищує границю міцності матеріалу диску (титановий сплав) при відносно невеликій швидкості обертання.

Зміст звіту: файли у форматі **.modfem**, де представлені моделі з розрахунками елемента конструкції з Комп'ютерного практикума № 4, прислати на електронну адресу поштової скриньки викладача.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 5

Статичний термопружний аналіз елемента конструкції. Згин трубний


Завдання: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової статичної задачі про навантаження згину трубного, зображеного на рис. 5.1.,б, провести його аналіз. Для отримання якісного розв'язку на відносно малій кількості скінченних елементів застосувати гексагональні скінченні елементи другого порядку наближення.

Дані для виконання: зовнішній діаметр 200 мм, внутрішній діаметр 180 мм, радіус згину 500 мм, приєднані трубні блоки – по 200 мм довжиною.

Згин трубний є звичайним елементом трубопровідних систем. Як геометричне тіло він не є осесиметричною оболонкою. Звичайно згин трубний навантажується внутрішнім тиском, а також нагрівається рідиною, яка прокачується через трубопровід.

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Налаштування середовища під задачу

1. Для початку потрібно створити новий проєкт: запустити програму, за допомогою команди **File→Save...** зберегти проєкт у файловій системі (потім періодично зберігати поточну ситуацію за допомогою кнопки  або через **Save as** з новими іменами файлів відповідно до номеру виконаного пункту).

Етап 2. Створення геометричної моделі згину трубного

Геометрична модель згину трубного створюється у припущенні про його ідеальну геометрію. При цьому враховується наявність площини симетрії.

2. За допомогою команди **Geometry→Curve-Circle→Center...** створити два кола з координатами центра 0, 0, 0 та радіусами 90 мм і 100 мм;

3. За допомогою команди **Geometry→ Curve-Line→Points...** з'єднати точки з координатами 0, 90, 0 та 0, 100, 0, а також з координатами 0, -90, 0 та 0, -100, 0;

4. За допомогою команди **Modify→Break...** розрізати кола на частини у точках з координатами 0, 90, 0 та 0, 100, 0, а також з координатами 0, -90, 0 та 0, -100, 0;

5. За допомогою команд **Delete→Geometry...** видалити криві, розташовані в правій частині робочого поля, а також зайві точки;

6. За допомогою команди **Geometry→Rotate→Curve ...** створити одну копію вертикальної лінії (що між точками 0, 90, 0 та 0, 100, 0), повернуту відносно осі Z на кут у 5 градусів;

7. За допомогою команди **Geometry→Curve-Arc→Center-Start-End...** створити відрізки дуг, які з'єднують кінці двох прямих ліній у верхній частині робочого поля;

8. За допомогою команди **Geometry→Boundary Surface→From Curves...** створити контури двох поверхонь: обмежену лініями, створеними у п. 6 та 7 (для створення скінченно-елементної сітки), а також обмежену лініями, створеними у п. 2 ... 5;

9. За допомогою команди **Geometry→Solid→Revolve...** створити згин трубний з радіусом 500 мм: при обертанні навколо осі X призначити значення Y=-500, обрати велику за розміром поверхню, призначити кут 90 градусів;

10. За допомогою команди **Geometry→Solid→Extrude...** створити трубні подовження згину, на довжину 200 мм, з кожного торця згину;

11. Створити новий шар (**Layer**), перемістити до нього створений згин трубний за допомогою команди **Modify→Layer→Solid...** . Зробити активним 1-й шар, сховати інші шари. Після команди на регенерацію зображення на робочому полі повинна залишитися поверхня для створення майбутньої сітки скінченних елементів.

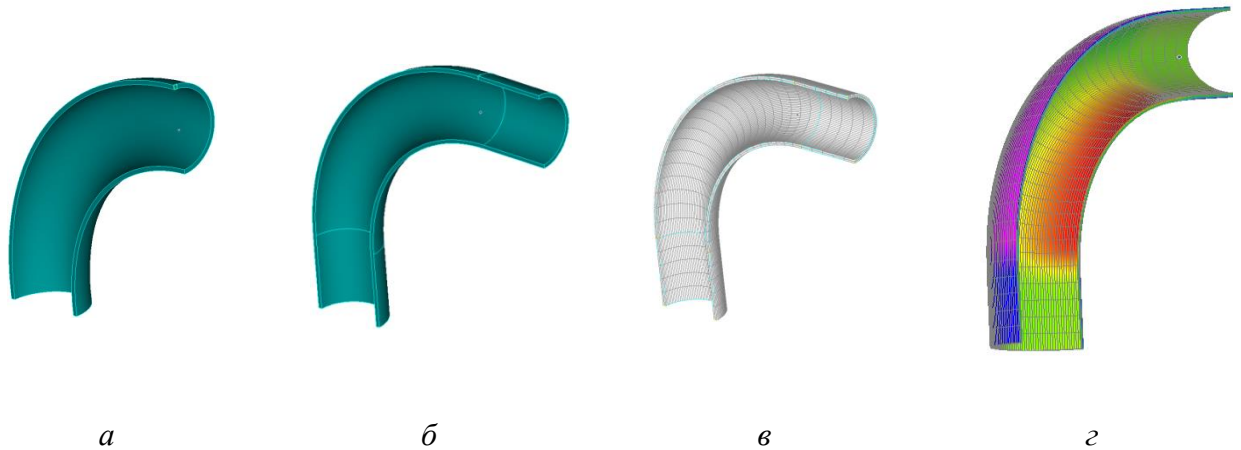


Рис. 5.1. До створення моделі згину трубного.
a – частина згину трубного;
б – згин трубний;
в - модель із СЕ;
г – розподіл еквівалентних за Мізесом напружень

Етап 3. Створення гексагональної скінченно-елементної сітки згину трубного

12. За допомогою команди **Model→Material...** створити матеріал: назвати його як **Steel**, ввести модуль Юнга $E=2.1e5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu=0.3$, коефіцієнт температурного подовження **Expansion Coeff**, $\alpha=1.25e-5$, коефіцієнт теплопровідності **Conductivity**, $k=0.023$ Вт/(мм К) та густину матеріалу **Mass Density** $7.85e-9$ т/мм³;

13. За допомогою команди **Model→Property...** створити «властивість» скінченних елементів (СЕ):

- зі списку «**Material**» – обрати матеріал **Steel**, ініціювати кнопку «**Element/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**»,
- у секції «**Volume Elements**» обрати тип СЕ «**Solid**».
- після команди «**OK**» на панелі «**Define Property**» ввести назву: **Solid_Steel**;

14. За допомогою команди **Model→Property...** створити «властивість» допоміжних СЕ:

- зі списку «**Material**» – обрати матеріал **Steel**, ініціювати кнопку «**Element/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**»,
- у секції «**Plane Elements**» обрати тип СЕ «**Plate**».
- після команди «**OK**» на панелі «**Define Property**» ввести назву: **Plate**;

15. За допомогою команди **Mesh**→**Mesh Control**→**Default Size...** встановити **Size=5** (це є максимальний розмір майбутніх скінченних елементів);

16. За допомогою команди **Mesh**→**Geometry**→**Surface...** створити допоміжну сітку скінченних елементів:

- на панелі «**Automesh Surface**», що з'явиться, обрати створену раніше «**Property**» з назвою **Plate**,
- у секції «**Mesh Generation**» встановити опцію «**Midside Nodes**»;
- у секції **Mesher** ініціювати радіокнопку «**Quad**», дати команду «**OK**». Буде побудована сітка СЕ з чотирьох СЕ;

17. За допомогою команди **Mesh**→**Rotate**→**Element ...** зробити копії СЕ: обрати всі 4 СЕ, вказати кількість копій: 35, вказати вісь обертання – Z та кут обертання 5 (градусів);

18. За допомогою команди **Mesh**→**Rotate**→**Element...** зробити копії СЕ: обрати всі 144 СЕ, вказати кількість копій: 1, при призначенні осі обертання X додатково призначити значення Y=-500, а потім – кут обертання 90 (градусів). Отримали дві групи допоміжних двовимірних СЕ;

19. Показати всі шари;

20. За допомогою команди **Mesh**→**Extrude**→**Element...** створити першу групу гексагональних СЕ:

- обрати перші 144 СЕ (типу **Plate**), на панелі «**Generation Options**» обрати у полі «**Property**» створену раніше «**Solid_Steel**»,
- у полі «**Element along Length**» встановити кількість СЕ: 5.
- Після команди **OK** вказати напрямком (вектор): обрати метод – **Points**, а потім дві точки: вод торця згину до кінця труби;

21. Аналогічну п.20 операцію зробити з другою групою двовимірних СЕ (з номерами 145 ... 288), причому на панелі «**Generation Options**» додатково встановити опцію «**Delete Original Elements**»;

22. За допомогою команди **Mesh→Revolve→Element...** створити третю групу гексагональних СЕ:

- обрати перші 144 СЕ (типу **Plate**), на панелі «**Generation Options**» обрати у полі «**Property**» створену раніше «**Solid_Steel**»,
- у полі «**Element along Length**» встановити кількість СЕ: 20, а на панелі «**Generation Options**» додатково встановити опцію «**Delete Original Elements**».
- Після команди **ОК** обрати метод: **Locate**, вказати вісь обертання.
- При призначенні осі обертання *X* додатково призначити значення $Y=-500$, а потім – кут обертання 90 (градусів);

23. Отримали суцільну на вигляд сітку СЕ (див. рис. 5.1.,*в*), але в ній є багато вузлів, що мають однакові координати, тобто сітка не є зв'язаною. За допомогою команди **Tools→Check→Coincident Nodes...** потрібно їх зв'язати: обрати всі вузли, встановити опцію «**Merge Coincident Entities**», дати команду **ОК**. Остаточно отримали скінченно-елементну сітку з 4320 СЕ, яка містить 24581 вузлів;

24. За допомогою команди команд **Delete→Geometry...** видалити вже непотрібні поверхні, лінії та точки (доцільно для видалення обирати всі об'єкти, потрібні залишаться);

25. За допомогою команди **Modify→Associativity→Automatic...** встановити асоціацію скінченних елементів та об'єму тіла: спочатку обрати всі СЕ та **Solid** моделі;

26. Є сенс дати команду **File→Rebuild...**, потім **Yes**. Потім потрібно дати команду на збереження проекту. Будуть видалені всі накопичені «прогалини» у файлі проекту, він зменшить свій розмір до мінімально можливого.

Етап 4. Створення завдань для розрахунку згину трубного, проведення розрахунків та результати розрахунків

27. За допомогою команди **Model→Constraint→Nodal...** створити набір для закріплень, потім за допомогою кнопки «**Methods ^**» обрати метод «**On Surface**»,


- обрати дві поверхні, які є поверхнями розсічення згину трубного, на панелі, яка з'явиться після команди «**OK**»,
- у секції «**DOF**» встановити «прапорець» для **TX**, увести **Title: X**.
- Потім ще раз обрати метод «**On Surface**», обрати торець згину з координатою **Z= -200** мм, встановити «прапорець» для **TZ**, увести **Title: Z** (призначення потрібно комбінувати).
- Потім обрати будь-який вузол на тому же торці згину, у секції «**DOF**» встановити «прапорець» для **TY**, увести **Title: Y** (призначення теж потрібно комбінувати);


28. За допомогою команди **Model→Load→On Surface...** створити набір для навантажень,






- обрати поверхні, що створюють внутрішню поверхню згину;
- на панелі «**Create Load on Surfaces**» у списку обрати варіант навантаження «**Pressure**», ввести значення **Pressure=10** (МПа);


29. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», ініціювати кнопку «**New...**», на панелі «**Analysis Set**» обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**1..Static**» (тобто статична задача), дати команду «**OK**»;

30. Кнопкою **Analysis...** запустити процес аналізу. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...**, **Delete→ ...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися;

31. Після успішного закінчення розрахунку стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель «**Select PostProcessing Data**». На ній у вікні «**Output Set**» обирається набір результатів; у вікні «**Deformation**» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**Deformed Style**); у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**).

Для відображення результатів на контурі (див. рис. 5.1.,з) достатньо ініціювати кнопку .

За допомогою кнопки  (або  для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**). За допомогою кнопки  можна включити режим показу деформованого стану (**Deformed**). За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно). Назва вектора виводиться на робочому полі зліва внизу;

32. Обрати вектор результатів **60031..Solid Von Mises Stress** та знайти місце з максимальним рівнем напружень. Обрати вектор результатів **4..T3 Translation** та провести анімацію за допомогою кнопки . Пояснити результати;


33. За допомогою команди **Model→Load→On Surface...** обрати поверхню незакріпленого торця згину трубного;

- на панелі «**Create Load on Surfaces**» у списку обрати варіант навантаження «**Force**»,
- ввести значення $FY = -127234,5$ (Н).

Це є значенням сили від внутрішнього тиску «сили у просвіті»;


$$FY = \frac{pA}{2} = \frac{p\pi(R_H^2 - r_B^2)}{2} = \frac{3,1415(100^2 - 90^2)}{2},$$

де p – тиск, A – площа отвору, а ділення на 2 відповідає тому, що розглядається половина згину трубного. Ця сила повинна **завжди** прикладатися на торці отвору при наявності внутрішнього тиску;


34. Кнопкою **Analysis...** запустити процес аналізу. Після успішного закінчення розрахунку потрібно знов обрати вектор результатів **60031..Solid Von Mises Stress** та знайти місце з максимальним рівнем напружень, а також обрати вектор результатів **4..T3 Translation** та провести анімацію за допомогою кнопки . Порівняйте з попередніми результатами, пояснить їх;

35. За допомогою команди **Model→Load→Body...** задати початкову температуру згину: $20\text{ }^\circ\text{C}$;



36. За допомогою команди **Model→Load→Nodal...** задати поточну температуру у вузлах сітки: на панелі «**Create Load on Nodes**» у списку обрати варіант навантаження «**Temperature**», ввести значення **Temperature=300**;

37. Кнопкою **Analysis...** запустити процес аналізу. Після успішного закінчення розрахунку потрібно знов обрати вектор результатів **60031..Solid Von Mises Stress** та знайти місце з максимальним рівнем напружень, а також обрати вектор результатів **4..T3 Translation** та провести анімацію за допомогою кнопки . Порівняйте з попередніми результатами, пояснить їх;

38. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», ініціювати кнопку «**New...**», на панелі «**Analysis Set**» обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**2..Normal Modes/Eigenvalue**» (тобто задача про визначення власних частот та форм коливань), дати «**OK**»;

39. Кнопкою **Analysis...** запустити процес аналізу. Після успішного закінчення розрахунку потрібно обрати вектор результатів **1..Total Translation** та провести анімацію за допомогою кнопки .

40. За допомогою кнопки  включити режим анімації;

41. За допомогою кнопок  та  міняти номер частоти (наступна / попередня зі списку). Номер частоти виводиться на робочому полі зліва внизу. Переглянути всі власні форми коливань. Які форми коливань відсутні?

Завдання для самостійної роботи: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової статичної задачі про навантаження згину трубного, зображеного на рис. 5.1.,б, провести його аналіз. Розміри згину трубного: зовнішній діаметр $200+2n$ мм, внутрішній діаметр $180+2n$ мм, радіус згину 500 мм, приєднані трубні блоки – по $200+2n$ мм довжиною. Навантаження тиском 15 МПа. Матеріал такий самий. n – остання цифра номера студента у списку групи.

Зміст звіту: файли у форматі **.modfem**, де представлені моделі з розрахунками елемента конструкції з Комп'ютерного практикума № 5 та з зав-

дання для самостійної роботи, прислати на електронну адресу поштової скриньки викладача.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 6

Статичний пружно-пластичний аналіз елемента конструкції. Пружно-пластичний аналіз товстостінної труби


Завдання: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової статичної задачі про навантаження товстостінної труби внутрішнім тиском, провести його пружно-пластичний аналіз. Для отримання якісного розв'язку на відносно малій кількості скінченних елементів застосувати гексагональні скінченні елементи другого порядку наближення в сегменті труби довжиною 1 мм та з сегментним кутом у 1 градус.

Дані для виконання

Розміри труби: зовнішній діаметр $D = 200$ мм, внутрішній діаметр $d = 120$ мм. Матеріал труби: сталь з модулем пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнтом Пуассона $\mu = 0,3$ та границею плинності $\sigma_s = 100$ МПа (тобто матеріал не має зміцнення). Навантажується труба внутрішнім тиском $p = 100$ МПа, який створює додаткову осьову силу $F_z = \frac{p\pi d^2}{4} = 565487$ Н.

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Налаштування середовища під задачу

1. Для початку потрібно створити новий проект: запустити програму, за допомогою команди **File**→**Save...** зберегти проект у файлової системі (потім періодично зберігати поточну ситуацію за допомогою кнопки  або через **Save as** з новими іменами файлів відповідно до номеру виконаного пункту).

Етап 2. Геометрична модель сегмента труби

Геометрична модель сегмента труби (див. рис. 6.1.,a) створюється з трубного елемента довжиною 1 мм шляхом вирізання його частини з сегментним кутом у 1 градус.

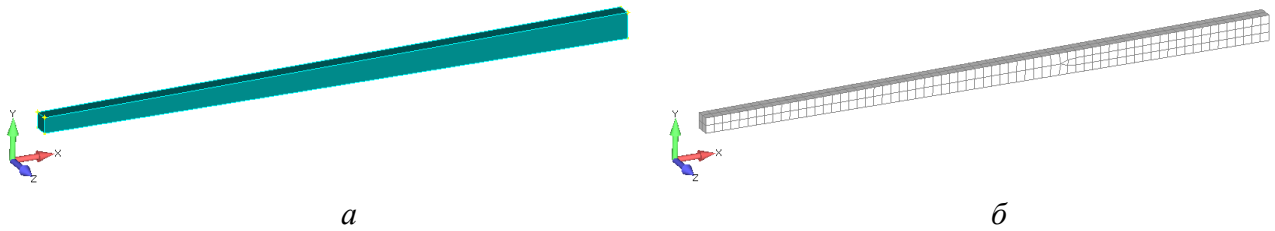


Рис. 6.1. До створення моделі сегмента труби.
a - сегмент труби з кутом навколо осі *Z* в 1 градус;
б - сітка з гексагональних СЕ, симетрична в напрямку кутової координати

2. За допомогою команди **Geometry**→**Point ...** створити чотири точки з координатами 60, 0, 0; 60, 0, 1; 100, 0, 1; 100, 0, 0 (мм);

3. За допомогою команди **Geometry**→**Curve - Line**→**Points...** створити чотири лінії через створені у п.2 точки таким чином, щоб отримати прямокутник;

4. За допомогою команди **Geometry**→**Boundary Surface**→**From Curves...** створити поверхню, обмежену лініями, створеними у п. 3;

5. За допомогою команди **Geometry**→**Solid**→**Revolve...** створити сегмент труби з кутом повороту навколо осі **Z** на 1 градус (див. рис. 6.1.,*a*).

Етап 3. Створення гексагональної скінченно-елементної сітки сектора труби

6. За допомогою команди **Model**→**Material...** створити матеріал: назвати його як **Steel**, ввести модуль Юнга $E = 2e5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$. Перейти на вкладку **Nonlinear**, обрати тип матеріалу **Plastic**, у полі **Initial Yield Stress** увести значення границі плинності матеріалу: **100** МПа;

7. За допомогою команди **Model**→**Property...** створити «властивість» скінченних елементів (СЕ):

- зі списку «**Material**» – обрати матеріал **Steel**, ініціювати кнопку «**Element/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**»,
- у секції «**Volume Elements**» обрати тип СЕ «**Solid**».

8. після команди «OK» на панелі «**Define Property**» ввести назву: **Solid_Steel**;

9. За допомогою команди **Mesh→Mesh Control→Default Size...** встановити **Size= 0.6** (це є максимальний розмір майбутніх скінченних елементів);

10. За допомогою команди **Mesh→Geometry→ HexMesh Solids...** створити сітку скінченних елементів:

- на панелі «**Hex Mesh Solids**», що з'явиться, обрати створену раніше «**Property**» з назвою **Solid_Steel**,
- у секції «**Mesh Generation**» встановити опцію «**Midside Nodes**»; ініціювати радіокнопку «**Options...**», встановити опцію «**Midside Nodes on Surfaces**», дати двічі команду «OK».

Буде побудована тривимірна сітка СЕ з гексагональних СЕ (див. рис. 6.1., б), симетрична в напрямку кутової координати (це важливо для отримання дійсно осесиметричного розв'язку цієї осесиметричної задачі);

Етап 4. Створення завдань для розрахунку сегмента труби, проведення розрахунків та аналіз результатів розрахунків

11. За допомогою команди **Model→Load→On Surface...** створити набір для навантажень,

- обрати поверхню, що є частиною внутрішньої поверхні труби (див. рис. 6.2.);
- на панелі «**Create Load on Surfaces**» у списку обрати варіант навантаження «**Pressure**», ввести значення **Pressure= 50** (МПа).
- Потім обрати поверхню, що є частиною торцевої поверхні труби з координатою **Z=0** мм;
- на панелі «**Create Load on Surfaces**» у списку обрати варіант навантаження «**Force**», ввести значення **FZ = -1570.8** (Н).

Примітка: це значення відповідає силі F_z величиною 565487 Н, поділеною на 360, оскільки використовується 1/360 частка осевого перерізу труби;

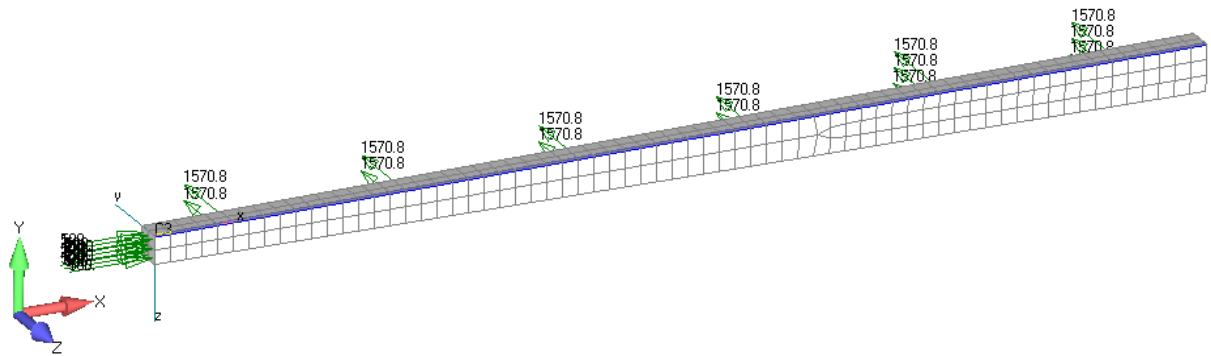


Рис. 6.2. До введення граничних умов у модель сегмента труби

12. За допомогою команди **Model**→**Constraint**→**On Surface...** створити набір для закріплень, потім обрати *нижню* (у площині XZ, див. рис. 6.2.) поверхню відсічення. На панелі «**Create Constraint on Geometry**», обрати радіокнопку «**Arbitral In CSys**», встановити «прапорець» для **TY**, ввести **Title: Y**;

13. Потрібно створити локальну систему координат на «похилій» поверхні відсічення сектора труби, яка створює з площиною XZ кут у 1 градус. Це краще зробити у робочій площині.

- спочатку за допомогою команди **Tools**→**Workplane...** і кнопок «**Select Plane**» та «**Methods^**» обрати варіант завдання площини як «**Points**»,
- потім послідовно обрати три точки на поверхні відсічення, які *створюють прямиий кут*, причому перші дві точки обрати у напрямку осі X.
- за допомогою команди **Model**→**Coord Sys...** створити локальну систему координат: обрати варіант **Workplane**, призначити **Title**, наприклад, **LSys**.

Створена локальна система координат зображена на рис. 6.2.: її координата Z є нормальною до поверхні, а координата X спрямована вздовж глобальної координати X;

14. За допомогою команди **Model**→**Constraint**→**On Surface...**

- обрати «похилу» поверхню відсічення сектора труби, яка створює з площиною XZ кут у 1 градус.
- На панелі «**Create Constraint on Geometry**», обрати радіокнопку «**Arbitral In CSys**»,
- встановити «прапорець» для **TZ**,
- обрати локальну систему координат, тобто **3..LSys**, ввести Title: **Z_LSys**;

15. За допомогою команди **Model**→**Constraint**→**Nodal** та кнопки «**Methods**^» обрати метод «**On Surface...**»,

- обрати поверхню, що є частиною торцевої поверхні труби з координатою $Z=1$ мм (вона протилежна той, до якої прикладена осьова сила).
- На панелі «**Create Nodal Constraint/DOF**», обрати декартову систему координат, тобто **0..Basic Rectangular**,
- встановити «прапорець» для **TZ**,
- ввести Title: **Z**;

16. За допомогою команди **Model**→**Constraint**→**Nodal** та кнопки «**Methods**^» обрати метод «**On Curve**»,

- обрати лінію, що є перетином торцевої поверхні труби з координатою $Z=1$ мм (вона протилежна тій, до якої прикладена осьова сила) та «похилої» поверхні відсічення сектора труби, яка створює з площиною XZ кут у 1 градус (на рис. 6.2. виділена).
- На панелі «**Create Nodal Constraint/DOF**», обрати введену локальну систему координат, тобто **3..LSys**,
- встановити «прапорець» для **TY** (якщо локальна вісь Y паралельна глобальній Z) або для **TX** (якщо локальна вісь X паралельна глобальній Z), а також **TZ**,
- ввести Title: **Line_LSys**.

На запитання, чи комбінувати уведені дані, заперечити, тобто ініціювати кнопку «**No**». Це робиться, щоб у вузлах, що належать обраній лінії, умови закріплення були введені в одній координатній системі (тут – в локальній **3..LSys**);

17. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», ініціювати кнопку «**New...**»,

- на панелі «**Analysis Set**» обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**22..Advanced Nonlinear Static**» (тобто «розвинутий» нелінійний статичний аналіз). Якщо ініціювати кнопку «**Next**», то можна зробити такі уточнення у завданні на розрахунок:
- вказати кількість задіяних на комп'ютері процесорів (**Number of Processors**),
- враховувати великі кути, переміщення або деформації у тілі (**LANGLE, LGDISP, LGSTRN**), кількість кроків навантаження та приріст внутрішнього часу (**Number of Steps** та **Time Increment**),
- не зупиняти аналіз у разі виявлення дуже zdeформованих скінченних елементів (**Continue if Non-Positive Definite**),
- точність проведення розрахунків та критерії їх зупинення (**Convergence**), інші; наслідок дати команду «**OK**»;

18. Кнопкою **Analysis...** запуснути процес аналізу. Якщо з'явилися повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...**, **Delete→...** та наведених вище команд модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися;

19. Після успішного закінчення розрахунку стає активною кнопка (**Post Data**), яка викликає панель «**Select PostProcessing Data**».

20. На ній у вікні «**Output Set**» обирається набір результатів; у вікні «**Deformation**» – вектор ре-зультатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**Deformed Style**); у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**). Для відображення результатів на контурі (див. рис. 6.3.) достатньо ініціювати кнопку . За допомогою кнопки (або для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**). За допомогою кнопки можна включити режим показу zdeформованого стану (**Deformed**). За допомогою кнопок та можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно). Назва вектора виводиться на робочому полі зліва внизу;

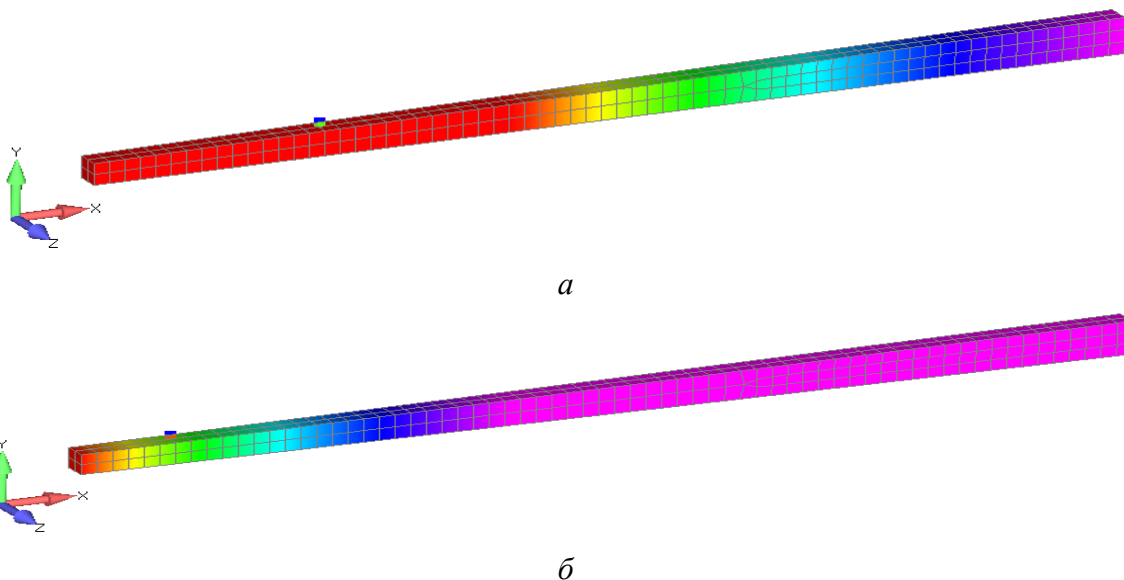


Рис. 6.3. Результати розрахунків.
a - інтенсивності напружень;
б - пластичні деформації

21. Обрати вектор результатів «**60031..Solid Von Mises Stress**» та візуально знайти зону з максимальним рівнем напружень у 100 МПа (див. рис. 6.3.,*a*), тобто зону з пластичними деформаціями. Щоб побачити рівень пластичних деформацій (див. рис. 6.3.,*б*), потрібно обрати вектор результатів «**60072..Solid Plastic Strain**»;


22. Створити групу вузлів, для яких буде будуватися графіки функцій **Solid Von Mises Stress** та **Solid Plastic Strain**: дати команду **Group→Create/Manage...**, створити групу з назвою **Nodes**;


23. Заповнити цю групу номерами вузлів, що містяться вздовж одного з радіусів: дати команду **Group→Node→ID**, метод обиранні вузлів – **On Curve...**, обрати одну з радіальних ліній геометричної моделі;

24. Провести конвертування функцій **Solid Von Mises Stress** та **Solid Plastic Strain** у вузли:

- дати команду **Model→Output→Process...**, обрати варіант **Convert**,
- ініціювати кнопку **Convert Select Output To Process...**,

- обрати набір з результатами (**Output Sets**) та вектори **60031..Solid Von Mises Stress** й **60072..Solid Plastic Strain**, закінчити операцію командами **OK**;

25. На панелі **Panes** (вертикальна внизу правіше) ініціювати кнопку  (**Charting**),

- на панелі **Charting** ініціювати кнопку  та на панелі, що з'явиться ініціювати кнопку **New Data Series....**
- На панелі, що з'явиться, у полі **Position** обрати **X** (сортування даних зі списку буде робитися по принципу зростання координати **X**);
- у полі **Output Set** обрати зі списку результатів розрахунків той, що є, тобто **1..Case 1 Time 1.**;
- у полі **Vector** обрати вектор результатів, отриманих конвертуванням до вузлів з характерним початком назви **..Avg-Converted Vec ...** ,
- після ініціації в секції **Group** радіокнопки **Select** обрати зі списку раніше створену групу вузлів з назвою **1..Nodes**, дати команду **OK**.
- Зробити це для обох функцій. Повинні з'явитися графіки обраних функції вздовж радіусу труби. Пусте поле вказує на відсутність даних (тут – номерів вузлів у обраній групі, або інших даних). Оскільки значення на графіку напружень значно більше, ніж значення пластичних деформацій, то графік останніх буде виглядати як пряма лінія.
- На панелі **Chart Data Series Manager** у списку **Available Chart Data Series** ініціювати вектор напружень та кнопками **Remove from Chart** або **Add to Chart** можна відповідно видаляти зображення обраного графіку або показувати обраний графік.

26. Пояснити отримані результати розрахунків товстостінної труби.

Завдання для самостійної роботи: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової статичної задачі про навантаження товстостінної труби внутрішнім тиском, провести його пружно-пластичний аналіз. Для отримання якісного розв'язку на відносно малій кількості скінченних елементів застосувати гексагональні скінченні елементи другого порядку наближення в сегменті труби довжиною 1 мм та з сегментним кутом у 1 градус.

Матеріал труби: сталь з модулем пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа , коефіцієнтом Пуассона $\mu = 0.3$ та границею плинності $\sigma_s = 100$ МПа (тобто матеріал не

має зміцнення). Навантажується труба внутрішнім тиском $p = 100$ МПа, який створює додаткову осьову силу $F_z = \frac{p\pi d^2}{4}$. Розміри труби: зовнішній діаметр $D = 200 + 2n$ мм, внутрішній діаметр $d = 120 + 2n$ мм, де n – остання цифра номера студента у списку групи.

Зміст звіту: файли у форматі **.modfem**, де представлені моделі з розрахунками елемента конструкції з Комп'ютерного практикума № 6 та з завдання для самостійної роботи, прислати на електронну адресу поштової скриньки викладача.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 7

Статичний контактний аналіз елемента конструкції

Завдання: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової статичної задачі про навантаження болтового з'єднання із застосуванням фланців (зображене на рис. 7.1.,а), провести статичний аналіз з'єднання. Для отримання якісного розв'язку на відносно малій кількості скінченних елементів застосувати тетрагональні скінченні елементи (СЕ) другого порядку наближення.

Розміри частин болтового з'єднання, а також інші характеристики, будуть вказані при подальшому опису роботи.

Болтове з'єднання є звичайним елементом конструкцій. Як геометричне тіло воно являє конструкцію з двома площинами симетрії XY, YZ, а також циклічну повторність вздовж осі Y.

Болтове з'єднання, що аналізується, навантажено в напрямку осі Z силою, яка створює у попереку на достатній відстані від з'єднання напруження $\sigma_z = 200$ МПа.

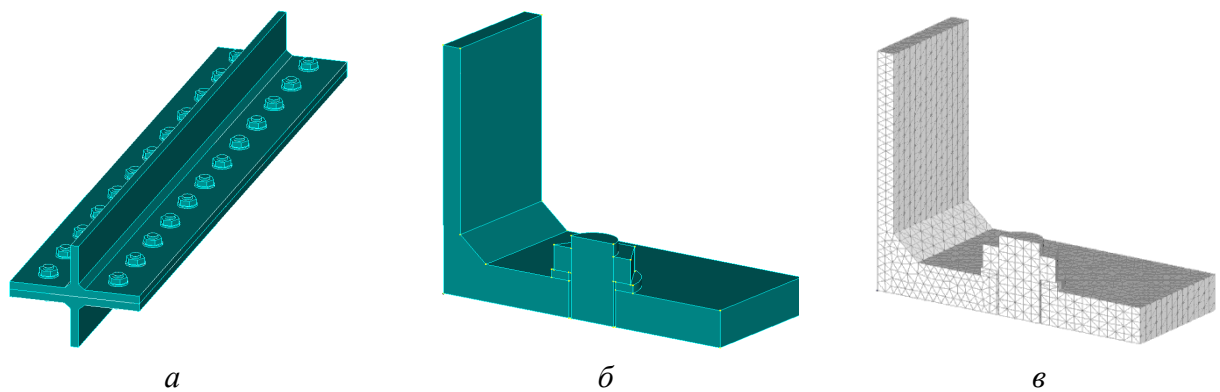



Рис. 7.1. До створення моделі болтового з'єднання.
a - болтове з'єднання із застосуванням фланців;
б – модель, що враховує циклічність болтів та наявність двох площин симетрії;
в - сітка СЕ

Послідовність виконання роботи:

Етап 1. Розрахункова модель. Налаштування середовища під задачу

1. Болт з гайкою, коли під голівкою болта та гайкою встановлюють шайби, можна замінити шпилькою та розглядати половину довжини болта (шпильки) з шайбою та гайкою, тобто можна вважати наявною площину симетрії по довжині болта.

Наявність двох площин симетрії усього з'єднання, циклічної повторності з кроком у 110 мм між болтами, контактний характер взаємодії окремих частин з'єднання, а також наявність терті між ними, дозволяє створити таку розрахункову модель: половина геометрії у напрямку осі *X*, половина геометрії у напрямку осі *Z*, а вздовж осі *Y* – половина кроку між болтами, тобто 55 мм; відсічені частини моделюються заборонаю переміщень вузлів у напрямку нормалі до поверхні розсічення; з'єднані плити в напрямку осі *Z* відрізаються на достатньої відстані від з'єднання (це буде 120 мм), а в площині відсічення буде задаватися тиск з від'ємним значенням $p = -200$ МПа;

2. Для початку потрібно створити новий проект: запустити програму, за допомогою команди **File**→**Save...** зберегти проект у файловій системі (потім періодично зберігати поточну ситуацію за допомогою кнопки  або через **Save as** з новими іменами файлів відповідно до номеру виконаного пункту).

Етап 2. Створення геометричної моделі болтового з'єднання

Геометрична модель болтового з'єднання створюється у припущенні про його ідеальну геометрію. При цьому враховується наявність площин симетрії.

3. За допомогою команди **Geometry**→**Solid**→**Primitives...** створити полку як **Block_center** з координатами початку (**Origin**) $X=65$, та $Y=27.5$ мм та розмірами $X=130$ мм, $Y=55$ мм, $Z=18$ мм;

4. За допомогою команди **Geometry**→**Solid**→**Primitives...** створити плиту як **Block_center** з координатами початку (**Origin**) $X=4$, та $Y=27.5$ мм та розмірами $X=8$ мм, $Y=55$ мм, $Z=120$ мм;

5. За допомогою команди **Geometry**→**Solid**→**Chamfer...** зробити «фасковий» перехід на ребрі, паралельному осі Y : обрати ребро, призначити величину **Length**=12 мм;

6. За допомогою кнопки **F2** на клавіатурі викликати панель **Workplane Management**, де зробити активною опцією **Draw Workplane** (показувати робочу площину), потім кнопкою **Offset Distance...** задати величину **Z Offset**=18 мм;

7. За допомогою команди **Geometry**→**Curve-Circle**→**Center...** створити коло, що позначає майбутній отвір: обрати метод призначення координат як **Locate in Workplane**, призначити координати $X=70$ мм, $Y=0$ мм, ввести радіус **11** мм;

8. За допомогою команди **Geometry**→**Boundary Surface**→**From Curves...** створити контур майбутнього отвору: обрати створене коло;

9. За допомогою команди **Geometry**→**Solid**→**Extrude...** зробити отвір: призначити варіанти **Remove-Hole** та **Thru All**;

10. За допомогою команди **Geometry**→**Curve-Circle**→**Center...** створити коло, що позначає майбутній наріжний контур шайби: обрати метод призначення координат як **Locate in Workplane**, призначити координати $X=70$ мм, $Y=0$ мм, ввести радіус **19** мм;

11. За допомогою команди **Geometry→Curve – From Surface→Project...** спроектувати створене коло на поверхню, до якої вона прилягає. При цьому частина поверхні, обмежена частинами окружностей, буде відділена від загальної (це потім допоможе створити шайбу, а також створити в цій частині моделі кращу скінченно-елементні сітку);

12. За допомогою команди **Geometry→Solid→Extrude...** зробити шайбу: за допомогою кнопки **Surface...** обрати поверхню у вигляді півкільця; призначити варіанти **New Solids** та **To Depth=4** мм;

13. За допомогою кнопки **F2** на клавіатурі викликати панель **Workplane Management**, де кнопкою **Offset Distance...** задати величину **Z Offset=4** мм;

14. За допомогою команди **Geometry→Solid→Primitives...** створити нижню частину тіла майбутньої шпильки як **New Solid**, у напрямку **Negative** (униз), **Cylinder**, з координатами початку (**Origin**) $X=70$, та $Y=0$ мм та розмірами **Radius=10** мм, **Height=22** мм;

15. За допомогою команди **Geometry→Solid→Primitives...** створити верхню частину тіла шпильки як **Add**, у напрямку **Positive** (уверх), **Cylinder**, з координатами початку (**Origin**) $X=70$, та $Y=0$ мм та розмірами **Radius=10** мм, **Height=18** мм;

16. За допомогою команди **Geometry→Solid→Primitives...** створити тіло майбутньої гайки як **New Solid**, у напрямку **Positive** (уверх), **Cylinder**, з координатами початку (**Origin**) $X=70$, та $Y=0$ мм та розмірами **Radius=18** мм, **Height=12** мм;

17. За допомогою команди **Geometry→Copy→Solid...** створити одну копію тіла шпильки (для швидкого створення отвору в гайці): обрати тіло шпильки; кількість копій – 1; встановити нулі у всіх полях, окрім **Tip Z=10** мм;

18. За допомогою команди **Geometry→Solids→Remove...** створити отвір у гайці: спочатку обрати гайку, потім – створену у п.17 копію шпильки (вона *вище* оригінальної);

19. За допомогою команди **Geometry→Solids→Slice...** розрізати гайку та шпильку: спочатку обрати гайку та шпильку, потім обрати метод призначення площини розсічення як **Points**, вказати три точки в площині **XZ**;

20. За допомогою команди **Delete→Geometry→Solid...** видалити непотрібні частини гайки та шпильки (див. рис. 7.1.,б);

21. За допомогою кнопки **F2** на клавіатурі викликати панель **Workplane Management**, де кнопкою **Offset Distance...** задати величину **Z Offset=12** мм. Робоча площина підніметься до рівня верхньої поверхні гайки;

22. За допомогою команди **Geometry→Curve-Circle→Center...** створити кола, що дозволять створити точки, які визначають огранку гайки: обрати метод призначення координат як **On Point**, обрати центрами окружностей одну та (потім) другу крайні точки гайки, призначити радіус 18 мм;

23. За допомогою команди **Geometry→Point...** створити дві точки пересічення створених в п.22 окружностей з контуром гайки: обрати метод створення точки як **Intersect – Curves**, обрати вказані криві (операцію повторити двічі);

24. За допомогою команди **Geometry→Solids→Slice...** відрізати від гайки частини та створити шестигранну огранку гайки:

- спочатку обрати гайку, потім обрати метод призначення площини розсічення як **Points**,
- вказати три точки площини розсічення: на гайці обрати дві крайні ліві точки та створену в п.23 ліву точку.
- Знов дати команду **Geometry→Solids→Slice...**, обрати гайку, потім (аналогічно) вказати нові три точки площини розсічення.
- Повторити останню дію ще раз;

25. За допомогою команди **Delete→Geometry→Solid...** видалити непотрібні частини, відрізані від гайки;

26. За допомогою команди **Geometry→Copy→Solid...** створити одну копію гайки (для створення натягу в з'єднанні): обрати гайку (*запам'ятати*

номер цього Solid !); кількість копій – 1; встановити нулі у всіх полях, окрім **Tip Z=-0.05** мм;

27. За допомогою команди **Delete→Geometry→Solid...** видалити гайку з номером, що було потрібно запам'ятати;

28. Очистити геометрію від залишків перетворених об'єктів: за допомогою команди **Delete→Geometry→Curve...** та потім **Delete→Geometry→Point...** видалити непотрібні лінії та точки (обирати – всі). Повинні отримати геометрію моделі, зображеної на рис. 7.1.,б, в якій є 4 окремих деталі: частина фланця плити, шпильки, шайби та гайки;

29. За допомогою кнопки **F2** на клавіатурі прибрати з екрану зображення робочої площини;

30. За допомогою команди **Geometry→Surfaces→Corners...** створити додаткову поверхню, яка в контактній взаємодії буде моделювати відкинуту нижню частину з'єднання: встановити метод обирання кутів як **On Point**, поспідовно обирати один з 4-х кутів на нижній площині фланця, давати команду **OK**;

Етап 3. Створення контактних регіонів, з'єднань та їх властивостей

31. На панелі **Model Info** потрібно знайти **Connections** та потім **Properties**, клацнути правою кнопкою «миші» та ініціювати **New**.

- На панелі, що з'явиться, внизу, потрібно ініціювати кнопку **Default**,
- потім на вкладці **NX Linear** у полі **Friction** ввести значення коефіцієнта тертя 0.3,
- а також на вкладці **NX Adv Nonlin** у полі **Friction Param 1** таке ж значення 0.3.
- У полі **Title** – ввести назву: **Contact**. Перевірити, чи дійсно у списку **Connect Type** обрано варіант **0..Contact**.
- Після команди **OK** панель оновиться. На ній потрібно у списку **Connect Type** обрати варіант **1..Glued** (клей),
- у полі **Title** – ввести назву: **Glued**.
- ще потрібно ініціювати кнопку **Default** на кожній з 2-х вкладок: **NX Linear** та **NX Adv Nonlin**;

32. За допомогою команди **Connect→Automatic...** створити контактні регіони та з'єднання в автоматичному режимі: обрати всі тіла, на панелі, що з'явиться, обрати у секції **Connection Property** радіо-кнопку **Property**, обрати у списку варіант **1..Contact**;

33. Створені контактні регіони та з'єднання доцільно переглянути:

- на панелі **Model Info** відкрити **Connections** та далі –**Connectors**.
- На кожному зі з'єднань (**Connectors**) потрібно клацати правою кнопкою «миші» та ініціювати показ поверхонь, що увійшли в з'єднання: **Show Master** та **Show Slave**. Бажано змінити назви регіонів, наприклад: **шайба-поверхня 1-2**; **низ поверхня-поверхня 3-4**; **шайба-гайка 5-6**; **шпилька-гайка 7-8**.
- З'єднання додаткової поверхні з поверхнею розсічення шпильки потрібно видалити: клацнути на ньому правою кнопкою «миші» та обрати варіант команди **Delete**. **Запам'ятати** номер регіону бічної поверхні шпильки;

34. На з'єднанні (**Connectors**) шпилька-гайка потрібно клацнути правою кнопкою «миші» та ініціювати **Edit**, на панелі, що з'явиться, у списку **Property** потрібно обрати варіант **2..Glued**. Так буде моделюватися різьбове з'єднання;

35. Щоб болт (шпилька) не пересік(ла) поверхні отворів шайби та/або фланця, потрібно додатково створити контактні регіони та з'єднання в «ручному» режимі:

- потрібно клацнути правою кнопкою «миші» на **Regions**, обрати варіант **Connection Region**,
- ініціювати кнопку **Add Multiple...**, обрати поверхні отворів в шайбі та у фланці, закінчити операцію.
- Потім на **Connectors** потрібно клацнути правою кнопкою «миші» та ініціювати **New**;
- на панелі, що з'явиться, у списку **Property** потрібно обрати варіант **1..Contact**;
- у полі **Title** ввести назви, наприклад: **шпилька-отвори у фланці і шайбі**, а у списках **Master** та **Slave** обрати відповідні регіони;

36. Для перевірки: повинне бути 9 регіонів та 5 з'єднань: верхня поверхня фланця – нижня поверхня шайби; верхня поверхня шайби – нижня поверхня гайки; отвір гайки – шпилька; отвори шайби та фланця – шпилька; нижня поверхня фланця (Master) – додаткова жорстка поверхня (Slave). Непотрібний регіон, що залишився, можна видалити за допомогою команди **Delete**→**Connection**→**Region** (обирати всі регіони);

Етап 4. Створення скінченно-елементної сітки болтового з'єднання

37. За допомогою команди **Model**→**Material...** створити матеріал:

- назвати його як **Steel**,
- ввести модуль Юнга $E=2e5$ МПа,
- коефіцієнт Пуассона $\nu=0.3$.
- На панелі, що з'явилася знов, назвати матеріал як **30ХГСА**,
- ввести модуль Юнга $E=2.1e5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu=0.33$;

38. За допомогою команди **Model**→**Property...** створити «властивість» скінченних елементів (CE):

- зі списку «**Material**» – обрати матеріал **Steel**,
- ініціювати кнопку «**Elem/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**»,
- у секції «**Volume Elements**» обрати тип CE «**Solid**».
- Після команди «**OK**» на панелі «**Define Property**» ввести назву: **Solid_Steel**, дати команду **OK**.
- На панелі, що з'явиться знов, зі списку «**Material**» – обрати матеріал **30ХГСА**, ввести назву: **Solid_30ХГСА**, дати команду **OK**.
- На панелі, що з'явиться знов, ініціювати кнопку **Elem/Property Type...**, обрати тип CE – **Plate**,
- у полі **Thicknesses, Tavg or T1** ввести значення **0.1** (товщина, мм),
- ввести назву: **Plate**, дати команду **OK**;

39. За допомогою команди **Mesh**→**Mesh Control**→**Default Size...** встановити **Element Size=4** (це є максимальний розмір майбутніх скінченних елементів);

40. За допомогою команди **Mesh→Geometry→Solids...** створити сітку скінченних елементів: обрати (поштучно!) 4 **Solids**,

- на панелі «**Automesh Solids**», що з'явиться, обрати створену раніше «**Property**» з назвою **Solid_30ХГСА**,
- у секції «**Mesh Generation**» встановити опцію «**Midside Nodes**»;
- ініціювати кнопку **Options...** та встановити опцію **Midside Nodes on Surfaces**, дати команду «**ОК**»,
- ініціювати кнопку **Update Mesh Sizing...**, у полі **Element Size** замінити значення на **4**, а у полі **Min Element on Edge** – на **2**,
- встановити опцію **Max Size of Small Feature**, двічі дати команду «**ОК**».

Буде побудована сітка з 22395 СЕ з 35568 вузлами (див. рис. 7.1.,в);

41. За допомогою команди **Modify→Update Elements→Property ID...** змінити матеріал фланця:

- на панелі вибору СЕ за допомогою кнопки **Method[^]** обрати варіант **In Solid/Volume**,
- обрати фланець, змінити **Property** на **Solid_Steel**. Комбінацією клавіш **Ctrl+G** регенерувати зображення;

42. Ще потрібно створити додаткові *двовимірні* скінченні елементи на додатковій поверхні, створеної в п.30:

- дати команду **Mesh→Geometry→Surface...**, обрати додаткову поверхню,
- на панелі **Automesh Surfaces**, що з'явиться, обрати створену раніше «**Property**» з назвою **Plate**,
- в секції «**Mesher**» обрати варіант **Quad**, а в секції **Node Options** встановити опцію «**Midside Nodes**»;

43. Є сенс дати команду **File→Rebuild...**, потім **Yes**. Якщо виявилися помилки, то їх потрібно виправити, повторити команду. Потім потрібно дати команду на збереження проекту. Будуть видалені всі накопичені «прогаліни» у файлі проекту, він зменшить свій розмір до мінімально можливого.

Етап 5. Створення завдань для розрахунку болтового з'єднання, проведення розрахунків та аналіз результатів розрахунків

44. За допомогою команди **Model**→**Load**→**On Surface...** створити набір для навантажень,

- обрати поверхню, що має координату $Z=120$ мм (верхня на фланці);
- на панелі «**Create Load on Surfaces**» у списку обрати варіант навантаження «**Pressure**», ввести значення **Pressure**= -200 (це тиск, в МПа, з напрямком від поверхні, тобто вверх);

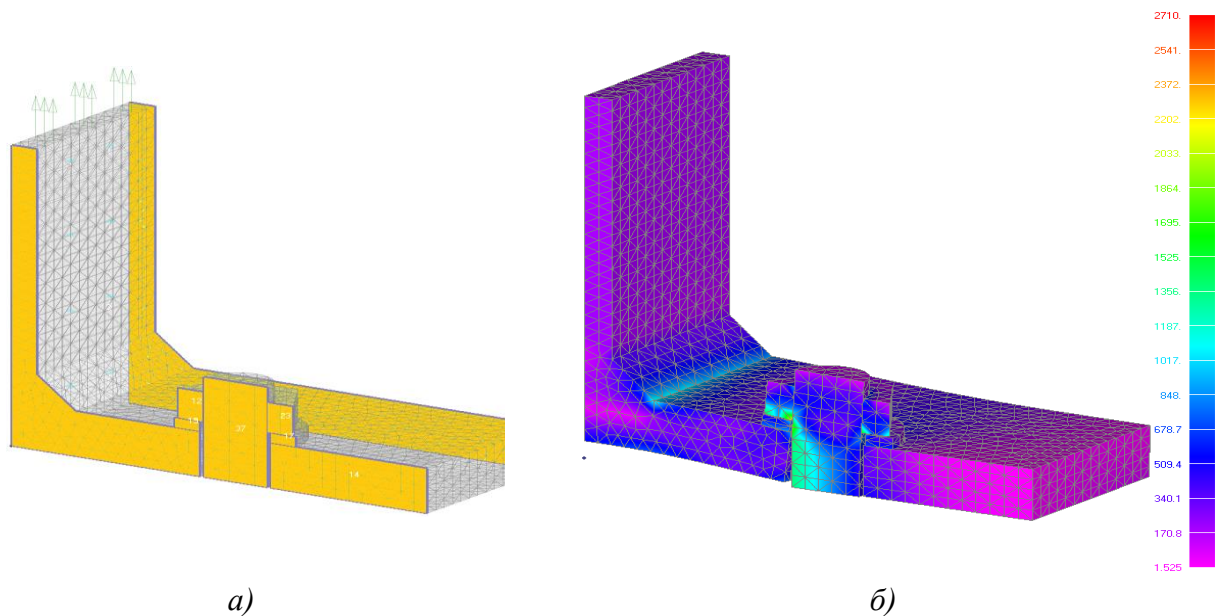



Рис. 7.2 До створення моделі болтового з'єднання.

а) – поверхні розсічення, для яких заборона переміщень у перпендикулярних до них напрямках; б) – розподіл еквівалентних за Мізесом напружень на контурі моделі та вигляд деформації.

45. За допомогою команди **Model**→**Constraint**→**On Surface...** створити набір для закріплень вузлів,

- обрати поверхню фланця з координатою $X=0$ мм (яка є поверхнею розсічення фланця),
- на панелі, що з'явиться після команди «**ОК**», обрати варіант **Arbitrary in CSys**, встановити «прапорець» для **TX**, ввести **Title: X_Flanec**.

- Потім обрати всі поверхні розсічення, які є перпендикулярними до осі **Y** (щоб побачити обрані, достатньо ініціювати кнопку  у правій верхній частині діалогової панелі; потрібний результат зображений на рис. 7.2.,a), на панелі, яка з'явиться після команди «ОК», обрати варіант **Arbitrary in CSys**, встановити «прапорець» для **TY**, ввести **Title: Y**.
- Потім обрати поверхню розсічення болта (шпильки), яка є перпендикулярною до осі **Z** (нижню), на панелі, яка з'явиться після команди «ОК», обрати варіант **Arbitrary in CSys**, встановити «прапорець» для **TZ**, ввести **Title: Z**;

46. За допомогою команди **Model→Constraint→On Surface...** обрати додаткову поверхню та призначити для неї варіант закріплень: **Fixed**, ввести **Title: Fixed**. Так моделюється абсолютна жорсткість додаткової поверхні;


47. За допомогою кнопок  та  (на вкладці **Layer**) створити новий шар (**Layer**), зробити активним 1-й **Layer**, сховати знов створений **Layer**.

48. За допомогою команди **Modify→Layer→Element...** перемістити до нового **Layer** створені СЕ типу **Plate**; для обирання СЕ можна застосувати метод **On Surface**;







49. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», ініціювати кнопку «**New...**», на панелі «**Analysis Set**» обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**1.. Static**» (тобто статичний аналіз), дати команду «**Next...**», ініціювати опцію «**Number of processor**»=**4** (або іншу реальну кількість ядер процесора), дати команду «ОК». (Примітка: можна призначити «**22..Advanced Nonlinear Static**» (тобто просунутий статичний нелінійний аналіз), тоді у розділі **Options→Advanced Nonlinear Iteration/Convergence** на параметрі **Max Iterations per Step** потрібно зробити подвійне клацання лівою кнопкою «миші» та змінити дозволена кількість ітерацій до **25**);

50. Кнопкою **Analyze** запустити процес аналізу. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...**, **Delete→...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися;

51. Процес збіжності контактних ітерацій можна переглядати за допомогою радіокнопки **Contact Convergence** на панелі **NX Nastran Analysis Monitor**, що з'являється;


52. Після успішного закінчення розрахунку стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель «**Select PostProcessing Data**». На ній у вікні «**Output Set**» обирається набір результатів;

- у вікні «**Deformation**» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**Deformed Style**);
- у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**).

Для відображення результатів на контурі (див. рис. 7.2., б, в) достатньо ініціювати кнопку . За допомогою кнопки  (або  на застарілих версіях програми) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**). За допомогою кнопки  можна включити режим показу деформованого стану (**Deformed**). За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно). Назва вектора виводиться на робочому полі зліва внизу;

53. Обрати вектор результатів **60031..Solid Von Mises Stress** та знайти місце з максимальним рівнем напружень. Пояснити результати;

54. Зменшення масштабу анімації можна зробити за допомогою клавіші **F6** клавіатури: обрати варіант **Post Processing**, у ньому – **Deformed Style**, у полі **Scale %** встановити інше значення, наприклад **2**, дати команду **Apply** (для перегляду без виходу з діалогу) або відразу **OK**;

55. За допомогою кнопки  включити режим анімації. Пояснити результати.

56. Якщо права (на рис. 7.2.) частина фланця «пройшла» через додаткову поверхню, створену в п.30, то необхідно відредагувати **Region**, та знов провести розрахунок задачі. Для цього в **Model Info** знайти відповідний додатковій поверхні **Region**:

- відкрити список **Regions**, клацати правою кнопкою «миші» на наступному регіоні та ініціювати команду **Show Expanded**.
- На знайденому регіоні *додаткової поверхні* клацнути правою кнопкою «миші», ініціювати команду **Edit**. З'явиться панель **Connection Region**,
- на ній у великому вікні написано, наприклад, **Surface 67, Positive**. Її потрібно змінити на **Surface 67, Negative** (поміняти сторону, яка контактує, на протилежну). Для цього достатньо клацнути на кнопку **Reverse**.

Після проведення нового розрахунку обрати новий набір з результатами: вони повинні відповідати рис. 7.2.,б.

Завдання для самостійної роботи: аналогічно до розглянутого завдання провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової статичної задачі про навантаження болтового з'єднання із застосуванням фланців (зображене на рис. 7.1.,а), провести статичний аналіз з'єднання. Покласти значення навантаження $200+10n$ МПа, де n - остання цифра номера студента у списку групи.

Зміст звіту: файли у форматі **.modfem**, де представлені моделі з розрахунками елемента конструкції з Комп'ютерного практикума № 7 та з завдання для самостійної роботи, прислати на електронну адресу поштової скриньки викладача.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 8

Статичний аналіз елемента конструкції. Зразок з тріщиною.

Завдання: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової статичної задачі про напружено-деформований стан (НДС) моделі плоского зразка (пластини) с тріщиною, провести аналіз, знайти значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) K_I , який використовується для визначення тріщиностійкості тіла з тріщиною за критерієм $K_I \leq K_{IC}$.

Теорія

Для визначення КІН K_I зазвичай використовують формулу класичного розв'язку для переміщень у вершини тріщини в нескінченній пластині у напрямку, перпендикулярному площині тріщини, причому залишають тільки асимптотичну складову (навантаження – на нескінченності в напрямку осі Y). Для плоского деформованого стану в площині XOY цей розв'язок дається формулою

$$u_y(r, \theta) \approx \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \left(2 - 2\mu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

де $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ – відстань від вершини тріщини; $\theta = \arctg(Y/X)$ – кут, відлічуваний від осі X проти часової стрілки (див. рис. 8.1.); G – модуль зсуву; μ – коефіцієнт Пуассона, u_y – переміщення точок тріщини по осі Y .

Позначимо функцію кута

$$F(\theta) \approx \left(\frac{1}{G} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \left(2 - 2\mu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \sin \frac{\theta}{2} \right)^{-1}, \quad (2)$$

тоді з виразу (1) маємо визначення для КІН:

$$K_I \approx \left| F(\theta) \cdot \lim_{r \rightarrow 0} \frac{u_y(r, \theta)}{\sqrt{r}} \right|. \quad (3)$$

Це теорія. На практиці необхідно виключити з розгляду області, де проходять силові лінії (див. рис. 8.2.) і де розв'язок для $u_y(r, \theta)$ є більш складним, ніж (1). Тобто формулу (3) необхідно застосовувати не скрізь, а при кутах, близьких до 180 градусів (близьких до π радіан), тобто недалеко від поверхні або на поверхні тріщини. А також виключити точку з $r = 0$.

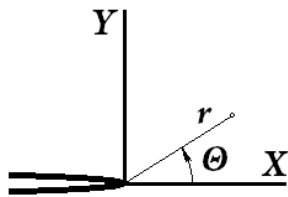


Рис. 8.1. Кут, відлічуваний від осі X

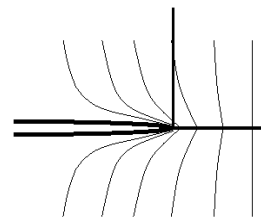


Рис. 8.2. Проходження силових ліній біля тріщини

Підставляючи в (3) значення $u_y(r, \theta)$, отримані розрахунками, у малому околу вершини тріщини й у тій частині, де не проходять силові лінії, а також при однаковому значенні кута $\theta \approx \pi$, заповнюють таблицю $R(r) = \left| u_y(r, \theta) / \sqrt{r} \right|$ з обов'язково присутніми різними значеннями параметра $r > 0$. На основі даних

цієї таблиці будують апроксимацію лінійною функцією $R(r) = A + Br$. Вона дає екстрапольоване значення

$$K_i \approx |F(\theta)| \cdot R(0) = |F(\theta)| \cdot A. \quad (4)$$

При $\theta = \pi$ маємо, що

$$F(\pi) = \left(\frac{2(1-\mu)}{G} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \right)^{-1} = \frac{E}{4(1-\mu^2)} \sqrt{2\pi}. \quad (5)$$

Відомо, що кращу апроксимацію розв'язку в околі вершини тріщини дає параметричний СЕ (рис. 8.3., що ліворуч), трикутний у плані (уздовж лінії фронту тріщини), отриманий у результаті переміщення трьох вузлів ребра чотирикутного СЕ (вузли 1, 4 й 8) в одну точку, розташовану на лінії фронту тріщини (ребро СЕ «стягнуто» у точку). Крім того, до цієї точки зміщені на чверть ребра два сусідніх проміжних вузли СЕ (5 й 7). Цей СЕ одночасно має асимптотичний розв'язок $O(r^{-1})$ для переміщень і $O(r^{-2})$ для деформацій. До СЕ, зображеному на мал.3-б, у якому вузол 1 поміщений у вершину тріщини, є претензії: він несумісний на ребрах, протилежних вузлу 1, але він все ж таки краще описує розв'язок навколо вершини тріщини, ніж будь-який стандартний.

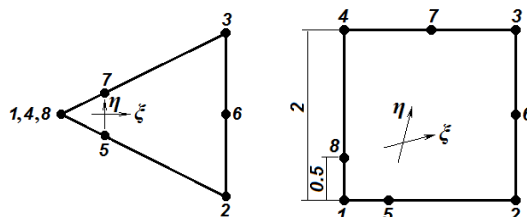


Рис. 8.3. Спеціалізовані СЕ Barsout для фронту тріщини

Але Femap, Nastran й Adina кваліфікують СЕ із профілем (рис. 8.3., що ліворуч) як надмірно перекручений, з наступним діагнозом «FATAL» (фатальна помилка). СЕ із профілем (рис. 8.3., що праворуч) у Femap, Nastran й Adina може бути використаний, якщо в глобальних координатах кут при вузлі 3 не

буде значно перевищувати 90 градусів. Однак для СЕ (рис. 8.3., що праворуч) виявилися й інші проблеми. Перша: значне зниження рівня навантаження, що може сприймати чисельна модель, оскільки СЕ у фронту тріщини в ітераціях вироджуються, розрахунок зупиняється. Друга проблема не настільки важлива для СЕ у вершини тріщини, але все ж таки: збільшені погрішності при перерахуванні значень деформацій і напружень у вузли скінченно-елементної сітки (СЕС), що необхідно робити для подальшого застосування отриманих результатів. Причина ясна з рис. 8.3.: при зсуві вузлів локальна координатна система віддаляється від геометричного центра СЕ. Як відомо, навіть при точному розв'язку для вузлових переміщень, при зсуві координатної системи від геометричного центра швидко зростають завжди існуючі помилки розв'язку по перших похідних, тобто по деформаціях і напруженнях.

З огляду на наявність негативних проблем СЕ (рис. 8.3.), у подальших розрахунках від таких СЕ відмовимося й будемо застосовувати біля вершини тріщини стандартні двовимірні СЕ, а саме 8-ми вузлові Plane Strain Parabolic, наскільки можливо згустивши СЕС в околі фронту тріщини.

Дані для виконання:

- розмір пластини 30х60 мм;
- тріщина – центральна, вздовж осі X , довжиною 12 мм;
- модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Створення геометричної та скінченно-елементної сітки моделі пластини з тріщиною

Розрахункова модель створюється у відповідності до вхідних даних та враховує наявність двох осей симетрії: X та Y , тобто буде моделюватися $1/4$ пластини. При цьому побудову моделі доцільно починати з найменшої її частини – з околу вершини тріщини (див. рис. 8.4.).

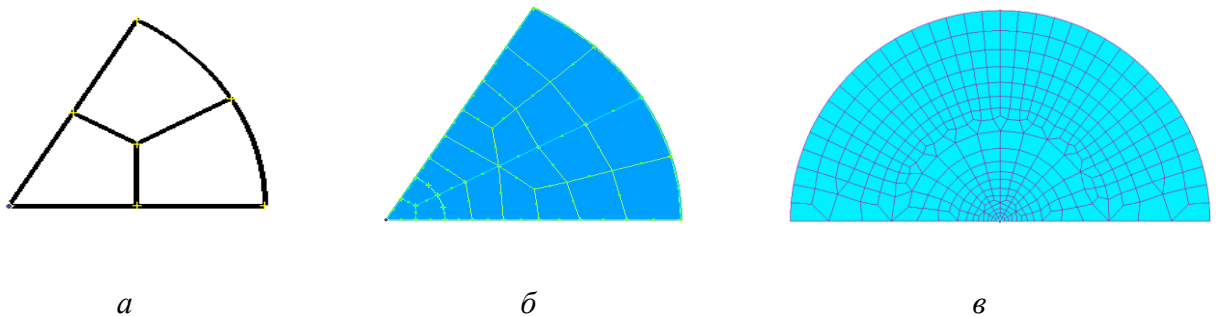



Рис. 8.4. Послідовні геометричні фігури та СЕ біля вершини тріщини.

- a – створення трьох поверхонь;
- b – збільшення кількості СЕ на поверхні;
- c – 369 СЕ навколо вершини тріщини

1. За допомогою команди **File**→**Save...** зберегти проект у файлової системі (потім періодично зберігати поточну ситуацію за допомогою кнопки  або через **Save as** з новими іменами файлів відповідно до номеру виконаного пункту)

2. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Projects Points...** створити лінію від точки (0, 0, 0) до точки (0.01, 0, 0);
3. За допомогою команди **Geometry→Rotate→Curve...** повернуті на 30 градусів навколо осі Z в точці (0, 0, 0) дві копії лінії, що була створена раніше. Комбінація клавіш «**Ctrl+A**» дозволяє побачити всі лінії;
4. За допомогою команди **Geometry→Curve-Arc→Center-Start-End...** та точок створити дугу, що з'єднає кінцівки створених ліній;
5. За допомогою команди **Geometry→Point...** та далі **Methods^ Mid-points...** послідовно створити дві точки посередині ліній: горизонтальної та той, що під кутом 60 градусів;
6. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Points...** створити (вертикальну!) лінію з точки, що лежить посередині горизонтальної лінії, до верхньої точки моделі;
7. За допомогою команди **Geometry→Point...** та далі **Methods^ Intersect Curves** створити точку пересічення двох ліній (приблизно посередині фігури);
8. За допомогою команди **Modify→Break→At Location...** та далі **Methods^ On Point** розрізати обидві лінії в точці, де вони пересікаються;
9. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Points...** створити лінію з точки, що майже у центрі моделі, до точки, що лежить посередині лінії з кутом нахилу 60 градусів;
10. За допомогою команди **Delete→Geometry→Curve...** видалити дві лінії так, щоб залишилася лінії, зображені на рис. 8.4,*a*;
11. За допомогою команди **Modify→Break→At Location...** та далі **Methods^ Point** розрізати дві лінії: горизонтальну та нахилену під 60 градусів, а також дугу кола, в точках посеред цих ліній;
12. За допомогою команди **Geometry→Boundary Surface→From Curves...** створити три поверхні (див. рис. 8.4.,*a*);

13. За допомогою команди **Model**→**Material...** створити матеріал: назвати його як **Steel_20**, ввести модуль Юнга $E = 2e5$ МПа та коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$;

14. За допомогою команди **Model**→**Property...** створити «властивість» скінченних елементів (CE):

- зі списку «**Material**» – обрати матеріал **Steel_20**,
- ініціювати кнопку «**Elem/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**»,
- у секції «**Plane Elements**» обрати тип CE «**Plane Strain**».
- Після команди «**OK**» на панелі «**Define Property**» ввести у полі «**Thicknesses, Tavg or T1**» значення 0.01, а також призначити назву: **PS**;

15. За допомогою команди **Mesh**→**Mesh Control**→**Default Size...** встановити **Size=0.01** мм (це є максимальний розмір майбутніх скінченних елементів);

16. За допомогою команди **Mesh**→**Geometry**→**Surface...** обрати всі три створені поверхні,

- на панелі «**Automesh Surfaces**», що з'явиться, ініціювати кнопку «**More Options**»,
- обрати створену раніше «**Property**»,
- у секції «**Mesher**» обрати варіант «**Quard**»;
- у секції «**Node Options**» встановити опції «**Midside Nodes**» та потім «**Move to Geometry**» (проміжні вузли – на геометрію),
- дати команду «**OK**». На поверхнях з'являться три CE (див. рис. 8.4.,*a*);

17. За допомогою команди **Geometry**→**Point...** створити точку з координатами (0.05, 0, 0);

18. За допомогою команди **Geometry**→**Curve-Line**→**Points...** створити лінію від точки (0.01, 0, 0) до точки (0.05, 0, 0);

19. За допомогою команди **Geometry→Rotate→Curve...** повернуті на 30 градусів навколо осі Z в точці (0, 0, 0) дві копії лінії, що була створена раніше. Комбінація клавіш «**Ctrl+A**» дозволяє побачити всі лінії;

20. За допомогою команди **Geometry→Curve-Arc→Center-Start-End...** створити дугу, що з'єднує кінцівки створених ліній;

21. За допомогою команди **Modify→Break→At Location...** та далі **Methods^ Point** розрізати створену дугу навпіл;

22. За допомогою команди **Geometry→Boundary Surface→From Curves...** створити дві нові поверхні;

23. За допомогою команди **Mesh→Mesh Control→Size Along Curve...** зробити розмітку на двох нових дугах: обрати ці лінії, призначити для них по 2 скінченних елемента;

24. За допомогою команди **Mesh→Mesh Control→Size Along Curve...** зробити розмітку на двох нових прямих (крайніх) лініях:

- обрати ці лінії, призначити для них по 6 скінченних елементів,
- обрати радіо-кнопкою варіант «**Geometrical Bias**» та «**Small Elements at Start**», а в полі «**Bias Factor**» значення 2.
- Якщо згущення розмітки сітки відбулося не в напрямку центру, то знов повторити команду та обрати радіо-кнопку «**Small Elements at End**»;

25. Зробити аналогічно для центральної лінії, але кількість СЕ призначити як 5;

26. За допомогою команди **Mesh→Geometry→Surface...** обрати дві створені поверхні,

- на панелі «**Automesh Surfaces**», що з'явиться, ініціювати кнопку «**More Options**»,
- обрати створену раніше «**Property**»,
- у секції «**Mesher**» обрати варіант «**Quard**»;

- у секції «**Node Options**» встановити опції «**Midside Nodes**» та потім «**Move to Geometry**» (проміжні вузли – на геометрію),
- дати команду «**ОК**». На поверхнях з'являться нові СЕ (див. рис. 8.4.,б);

27. За допомогою команди **Mesh→Rotate→Element...** обрати всі створені СЕ, повернуті на 60 градусів навколо осі Z в точці (0, 0, 0) дві копії сітки. Теж саме зробити зі всіма створеними поверхнями;

28. За допомогою команди **Geometry-Circle→Center...** створити коло радіусом **0.25** мм;

29. За допомогою команди **Modify→Break→At Location...** та далі **Methods^ Point** розрізати створене коло навпіл. Видалити нижню частину кола та всі (вже непотрібні) точки;

30. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Points...** створити лінії між точками, що знаходяться на кінцівках дуг, тобто між точками (-0.25, 0, 0) й (-0.05, 0, 0), а також (0.25, 0, 0) й (0.05, 0, 0);

31. За допомогою команди **Geometry→Boundary Surface→From Curves...** створити нову поверхню, обмежену двома прямими лініями та частками дуг окружностей;

32. За допомогою команди **Mesh→Mesh Control→Size Along Curve...** зробити розмітку на двох нових прямих (крайніх) лініях: обрати ці лінії, призначити для них по **6** скінченних елементів, обрати радіо-кнопкою варіант «**Geometrical Bias**» й «**Small Elements at Start**», а в полі «**Bias Factor**» значення **2**. Якщо згущення розмітки сітки відбулося не в напрямку центру, то знов повторити команду та обрати радіо-кнопку «**Small Elements at End**»;

33. За допомогою цієї ж команди призначити 36 СЕ на новій дузі кола, без згущення;

34. За допомогою команди **Mesh→Geometry→Surface...** обрати створену поверхню та створити на ній нові СЕ. Загалом повинне бути 369 СЕ (див. рис. 8.4.,в);

35. За допомогою команди **Geometry→Point...** створити чотири точки з координатами $(-3, 0, 0)$, $(-3, 30, 0)$, $(15, 30, 0)$, $(15, 0, 0)$;

36. За допомогою команди **Geometry→Curve-Line→Points...** створити лінії, що замикають зовнішній контур моделі пластини;

37. За допомогою команди **Geometry→Boundary Surface→From Curves...** створити нову поверхню, обмежену зовнішніми прямими лініями та часткою дуги кола;

38. За допомогою команди **Mesh→Mesh Control→Size Along Curve...** зробити розмітку на нових прямих лініях:

- обрати вертикальні лінії, призначити для них по **20** скінченних елементів,
- обрати радіо-кнопкою варіант «**Geometrical Bias**» й «**Small Elements at Start**», а в полі «**Bias Factor**» значення **4**.
- Якщо згущення розмітки сітки відбулося не в напрямку центру, то знов повторити команду та обрати радіо-кнопку «**Small Elements at End**».
- На горизонтальній лінії, що належить тріщині, призначити **15** СЕ з коефіцієнтом згущення **10**.
- На іншій нижній горизонтальній лінії призначити **50** СЕ з коефіцієнтом згущення **10**.
- За допомогою цієї ж команди призначити **10** СЕ на верхній лінії, без згущення;

39. За допомогою команди **Mesh→Geometry→Surface...** обрати створену поверхню та створити на ній нові СЕ. Загалом повинне бути **983** СЕ;

40. За допомогою команди **Tools→Check→Coincident Nodes...** «зшити» скінченно-елементну сітку, при цьому обрати **всі** вузли;

41. Очистити геометрію від зайвих об'єктів: послідовно дати команди **Delete→Geometry→Curve...** та **Delete→Geometry→Point...**, обирати всі об'єкти даного класу (**Select All**).

Етап 3. Створення завдання для розрахунку моделі

42. За допомогою команди **Model**→**Load**→**On Curve...** створити набір для навантажень, обрати верхню горизонтальну лінію, на панелі «**Create Loads on Curves**» у списку обрати варіант навантаження «**Force**» (сила) та ввести значення **FY= 15 Н**;

43. За допомогою команди **Model**→**Constraint**→**Nodal...** створити набір для закріплень та далі призначити **Methods**^ **On Curve**, потім обрати ліву вертикальну лінію розсічення пластини навпіл, на панелі, яка з'явиться після команди «**ОК**», у секції «**DOF**» встановити «прапорець» для **TX**;

За допомогою команди **Model**→**Constraint**→**Nodal...**, призначити **Methods**^ **On Curve**, потім обрати нижні горизонтальні лінії розсічення пластини навпіл (починаючи від вершини тріщини! – див. рис. 8.5.);

На панелі, яка з'явиться після команди «**ОК**», у секції «**DOF**» встановити «прапорець» для **TY**;

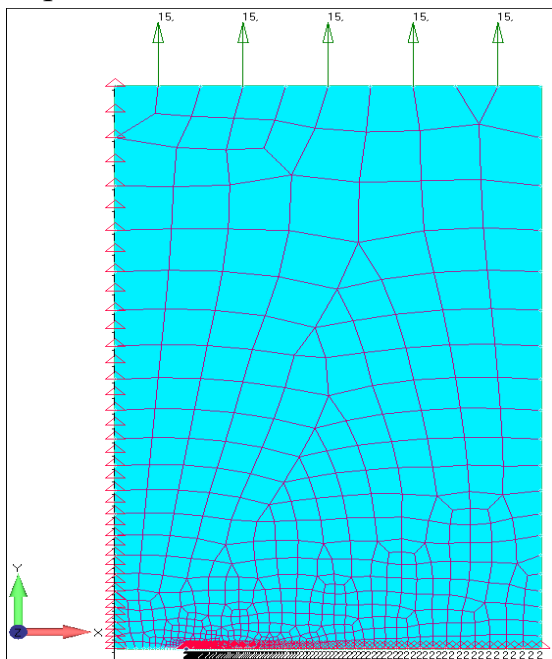


Рис. 8.5. Розрахункова модель пластини з тріщиною


44. За допомогою команди **Model**→**Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», ініціювати кнопку «**New...**», на панелі «**Analysis Set**» обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**1..Static**» (тобто статична задача);


45. Кнопкою **Analysis...** запустити аналіз.



Етап 4. Результати розрахунку моделі пластини з тріщиною


46. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно спочатку з повідомлень уяснити причини їх появи, потім за допомогою

команд **Modify**→**Edit...** , **Delete**→ ... та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі так, щоб помилки не з'являлися;



47. Після закінчення розрахунків стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель «**Select PostProcessing Data**». На ній у вікні «**Output Set**» обрати набір результатів;

- у вікні «**Deform**» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**3..T2 Translation** (u_y – переміщення точок тріщини по осі Y));
- у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**), спочатку обрати **7021..Plate Top Y Normal Stress**, дати команду «**OK**».
- Для відображення результатів на контурі (див. рис. 8.б.,а) достатньо ініціювати кнопку  та збільшити зону біля вершини тріщини;

48. За допомогою кнопки  (або  для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**);

49. За допомогою кнопки  включити режим показу деформованого стану (**Deformed**) – див. рис. 8.б.,а. Щоб змінити розмах анімації, необхідно:


- клавішею «**F6**» викликати панель «**View Options**»,
- на ній в категорії «**Post processing**» обрати «**Deformed Style**»,
- потім у полі «**Scale %**» встановити інше значення, наприклад, **0.5**, щоб отримати зображення рис. 8.б.,а.
- Команда «**Apply**» ініціює призначення без виходу з діалогу, команда «**OK**» зберігає призначення, а команда «**Cancel**» – скасовує всі призначення, зроблені після діалогу;


50. За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно). Переглянути зображення напружень. Назва поточного вектора виводиться на робочому полі зліва внизу;

51. Створити групу вузлів, для яких далі будуть будуватися графіки функцій: дати команду **Group**→**Create/Manage...**, створити групу з назвою **Nodes**;

52. Заповнити цю групу номерами вузлів, що містяться біля вершини тріщини: дати команду **Group→Node→ID**, обрати всі вузли між точками (-0.05, 0, 0) та (0.05, 0, 0);

53. Провести конвертування напружень у вузли: дати команду **Model→Output→Process...**, обрати варіант **Convert**, ініціювати кнопку **Convert Select Output To Process...**, обрати з набору з результатами (**Output Sets**) вектори напружень **7020 ÷ 7026** та **7033**, закінчити операцію командами **OK**;

54. На панелі **Panes** (вертикальна внизу правіше) ініціювати кнопку  (**Charting**),

- на панелі **Charting** ініціювати кнопку  та на панелі, що з'явиться ініціювати кнопку **New Data Series...**
- На панелі, що з'явиться, у полі **Position** обрати **X** (тобто сортування даних зі списку буде робитися по принципу зростання координати **X**);
- у полі **Output Set** обрати зі списку результатів розрахунків той, що є, тобто **1..NX NASTRAN Case 1**;
- у полі **Vector** обрати вектор результатів, отриманих конвертуванням до вузлів з характерним початком назви **..Avg-Converted Vec ...**,
- після ініціації в секції **Group** радіокнопки **Select** обрати зі списку раніше створену групу вузлів, дати команду **OK**.
- Зробити це для всіх конвертованих напружень та для **3..T2 Translation**. Повинні з'явитися графіки обраних функції біля вершини тріщини.
- Якщо виникає пусте поле, це вказує на відсутність даних (тут – номерів вузлів у обраній групі, або інших даних). Оскільки значення на графіку напружень значно більше, ніж значення переміщень, то графік останніх буде виглядати як пряма лінія.
- На панелі **Chart Data Series Manager** у списку **Available Chart Data Series** ініціювати вектор напружень та кнопками **Remove from Chart** або **Add to Chart** можна відповідно видаляти зображення обраного графіку або показувати обраний графік.

Пояснить, чому графік напружень σ_y має ненульові значення на поверхні тріщини, вільної від навантаження, тобто при $X < 0$ (див. рис. 8.6.,б);

Етап 5. Визначення коефіцієнта інтенсивності напружень тріщини.

Сітка 1

55. За допомогою команди **Model→Output→Vector...** викликати панель «**Create or Activate Output Vector**», кнопкою «**New Vector...**» викликати наступну панель, де ввести **Title** (назву) «**X**», ініціювати «**OK**» та «**Done**»;

56. За допомогою команди **Model→Output→Fill...** викликати стандартну панель для обирання вузлів, обрати *всі* вузли, дати команду «**OK**». На панелі, що з'явиться, в полі «**Equation**» потрібно набрати такий текст: **XND(!i)**. Створений вектор буде заповнений координатами всіх вузлів моделі.

57. За допомогою команди **File→Export→Analysis Model...** викликати панель «**Export Method**»,

- ініціювати кнопку «**Other Interfaces**». На панелі, що з'явиться, обрати «**Comma-Separated**», дати команду «**OK**»,
- ввести назву файлу: **X&T2.csv**.
- На панелі «**Write Comma-Separated Results**», що з'явиться, дати команду **OK**.
- На панелі «**Select Results**», що з'явиться, в списках векторів обрати вектори **T2 Translation** (u_y) та **X**.
- Дати команду «**OK**».
- В секції «**Group**» зі списку обрати раніше створену групу з номерами вузлів, дати команди «**More**» та «**OK**». Буде створений текстовий файл з номерами вузлів, їх координатами **X** та з величинами вертикальних переміщень u_y поверхні тріщини біля її вершини;

58. Запустити програму **Excel**.

- Клацнути на вічку **A1**.
- В **MS Excel 2007** та пізніших: дати команду **Данные→Из текста**,
- знайти в файлової системі створений файл **X&T2.csv**, «відкрити» (**Import**) його.
- З'явиться діалог «майстра імпорту текстів», де потрібно дати команду «**Далее >**» («**Next >**»),
- обрати розділовий знак – кома (**,** **Comma**),
- дати команди «**Далее >**» («**Next >**»), «**Готово**» («**Finish**») та «**OK**»

- (у MS Excel 2003: дати команду **Данные** → **Импорт внешних данных** → **Импортировать данные...** (**Data**→**From Text**), ...);

59. Шляхом копіювання вставити дані з координатами X правіше даних про переміщення **T2 Translation**. Видалити всі дані при $X \geq 0$, зокрема й номери вузлів;

60. Методом протягування «миші» виділити **всі числові** дані, за допомогою команд формату вічка (**Format Cells...**) задати в них **числовий (Number)** формат даних з кількістю знаків **6**;

61. Викликати з клавіатури **Ctrl+N** діалог заміни, замінити контекстною заміною (**Replace**,) **всі крапки (.)** на символ **коми (,)**;

62. Правіше від стовпця з координатами X створити стовпці з такими даними: $r = -x$, потім з \sqrt{r} , потім зі значеннями функції $R(r) = u_y(r, \pi) / \sqrt{r}$. При цьому спочатку вводити формулу у перше вічко стовпця, потім шляхом протягування «миші» виділити весь стовпець та дати з клавіатури команду **Ctrl+D**, щоб заповнити стовбець результатами обчислень;

63. За допомогою клавіші «**Ctrl**» виділити стовпці з даними $r = -x$ та зі значеннями функції $R(r)$, дати команду на створення графіка (майстер діаграм), обрати «точковий» (**Insert**→**Scatter**) тип графіка, без з'єднувальних ліній, дати команду «**Готово**». З'явиться графік, зображений на рис. 8.6., в.

64. Численні порівняння експериментальних та розрахункових (MSE) даних привели до висновку, що апроксимацію отриманої в розрахунках MSE функції $R(r) = u_y(r, \pi) / \sqrt{r}$ можна проводити **лінійною функцією на основі даних лише з двох найближчих до вершини тріщини вузлів**. Для застосування формули (4) потрібно мати значення постійної апроксимації A з функції $R(r) = A + Br$. Якщо дві точки нумерувати за ростом величини r , то $A = (R_1 r_2 - R_2 r_1) / (r_2 - r_1)$. Обчислити це значення;

65. Ввести значення модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона та обчислити значення функції $F(\pi)$ згідно з формулою (5);

66. Застосувати формулу (4), тобто обчислити $K_I \approx F(\pi) \cdot A$;

Етап 6. Визначення коефіцієнта інтенсивності напружень тріщини.

Сітка 2

67. Зберегти модель зі «старою» та дещо зміненою (новою) назвою;
68. Видалити **три** SE, що безпосередньо примикають до вершини тріщини, а також закріплення у вузлах в напрямку осі Y та всі зайві вузли;
69. За допомогою команди **Mesh→Mesh Control→Size Along Curve...** зробити розмітку на двох прямих лініях поверхні, що прилягає до вершини тріщини (див. рис. 8.4.,*a*):
- обрати дві лінії, які виходять з вершини, призначити для них по 4 скінченних елемента,
 - обрати радіо-кнопкою варіант «**Geometrical Bias**» й «**Small Elements at Start**», а в полі «**Bias Factor**» значення **3**.
 - Якщо згущення розмітки сітки відбулося не в напрямку центру, то знов повторити команду та обрати радіо-кнопку «**Small Elements at End**»;
70. За допомогою команди **Mesh→Geometry→Surface...** обрати цю поверхню та створити на ній нові 7 SE (аналогічно п.16);
71. За допомогою команди **Mesh→Rotate→Element...** обрати 7 створених SE, повернуті на 60 градусів навколо осі Z в точці (0, 0, 0) **дві** копії цих елементів;
72. За допомогою команди **Model→Constraint→Nodal...**, призначити **Methods^ On Curve**, потім обрати нижні горизонтальні лінії розсічення пластини навпіл (починаючи від вершини тріщини! – див. рис. 8.5.); на панелі, яка з'явиться після команди «**OK**», у секції «**DOF**» встановити «прапорець» для **TU**;
73. За допомогою команди **Model→Analysis→Active...** активувати завдання, провести розрахунок;
74. З двох вузлів, що знаходяться лівіше вершини тріщини, «зняти» (через панель **Entity Info**) значення їх координати X та величин переміщень

T2 Translation (u_y), тобто $r = |-X|$ та u_y . Перейти у програму **Excel**, де підрахувати значення функції $R(r) = u_y(r, \pi) / \sqrt{r}$ у цих вузлах, обчислити $A = (R_1 r_2 - R_2 r_1) / (r_2 - r_1)$ та нове значення КІН $K_I \approx F(\pi) \cdot A$. Порівняти значення КІН та максимальних напружень, отриманих на двох сітках.

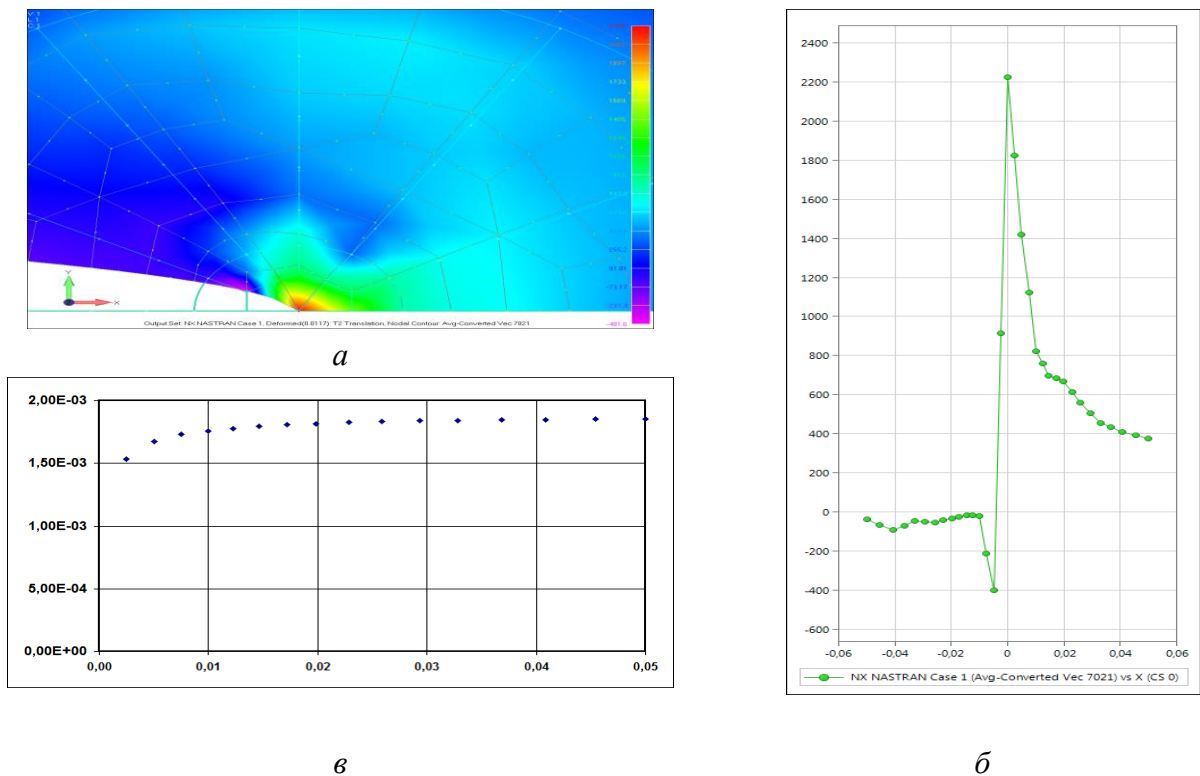


Рис. 8.6. Деякі результати розрахунків.

а - розподіл напружень σ_y , (МПа) біля тріщини;

б - графік розподілу напружень σ_y , (МПа) біля тріщини;

в - функція $R(r) = u_y(r, \pi) / \sqrt{r}$

Зміст звіту: файли у форматі **.modfem**, де представлені моделі з розрахунками елемента конструкції з Комп'ютерного практикума № 8, прислати на електронну адресу поштової скриньки викладача.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 9

Статичний аналіз елемента конструкції із композиційного матеріалу

Завдання: створити в середовищі FEMAP декілька різних (еквівалентних) моделей крайової статичної задачі про напружено-деформований стан пластини із композиційного матеріалу, провести статичний аналіз, порівняти результати.

Дані для виконання: пластина виготовлена з полімерного композиційного матеріалу (ПКМ), який має 24 шари. Шари з вуглецевої однонапрямної стрічки УОЛ-300-1А товщиною 0.235 мм в ПКМ укладені під кутами 0 і 90 градусів відносно повздовжньої осі пластини (осі x), а з вуглецевої тканини УТ-900-3А товщиною 0.220 мм – під кутами ± 45 градусів. Структура ПКМ така: [-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/90]s.

Таблиця 1. Пружні характеристики матеріалів окремих шарів

Матеріал (рос.)	Модулі Юнга, МПа			Модулі зсуву, МПа			Коефіцієнти Пуассона		
	E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}	G_{23}	G_{13}	μ_{12}	μ_{23}	μ_{13}
УОЛ-300-1А	150000	8000	8000	4400	2700	4400	0.29	0.48	0.29
УТ-900-3А	80000	80000	8500	6000	4800	4800	0.40	0.32	0.32

Таблиця 2. Значення «ефективних модулів» ПКМ, отримані за результатами чисельних експериментів

Модулі Юнга, МПа			Модулі зсуву, МПа			Коефіцієнти Пуассона		
E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}	G_{23}	G_{13}	μ_{12}	μ_{23}	μ_{13}
62960	62960	9200	16490	3900	3900	0.414	0.290	0.290

Пластина має наступні розміри в плані: довжина =200 мм, ширина =50 мм.

По коротким сторонам пластина має шарнірне обпирання. Навантажена пластина однобічним тиском у 0,1 МПа.

Потрібно порівняти величини максимального прогину пластини при моделюванні її чотирма варіантами скінченних елементів (СЕ):



1. SE типу **Plate Laminate** з використанням інструменту **Layup** при моделюванні матеріалу та властивостей з табл.1;
2. SE типу **Solid HEXA** з пошаровим моделюванням матеріалу (див. табл.1), не менш одного SE для кожного шару;
3. SE типу **Solid HEXA** з усередненим моделюванням матеріалу (див. табл.2), не менш 6 SE по товщині;
4. SE типу **Solid HEXA Laminate** з використанням інструменту **Layup** при моделюванні матеріалу та властивостей з табл.1, не менш 6 SE по товщині.

Послідовність виконання роботи

Оскільки і сама пластина, і властивості її матеріалу, і навантаження мають по дві однакові площини симетрії, то для розрахунків будемо використовувати $\frac{1}{4}$ від всієї пластини, а відкинуті частини пластини будемо моделювати відповідними умовами закріплення.

МОДЕЛЬ 1

Етап 1. Створення геометричної моделі

1. Запустити програму FEMAP. За допомогою команди **File→Save...** зберегти проект у файловій системі під назвою **CP_9-1.modfem** (потім періодично зберігати поточну ситуацію за допомогою кнопки );
2. За допомогою команди **Geometry→Curve – Line→Rectangle...** створити прямокутник на основі точок з координатами $X=0$ мм, $Y=0$ мм, $Z=0$ мм; $X=100$ мм, $Y=25$ мм, $Z=0$ мм;
3. За допомогою команди **Geometry→Boundary Surface→From Curves...** створити із замкнених ліній поверхню. Кнопка  на панелі дозволяє побачити обрані об'єкти;
4. За допомогою команди **Tools→Workplane...** прибрати опцію «**Draw Workplane**».

Етап 2. Створення скінченно-елементної сітки 1 – моделі 1

5. За допомогою команди **Model**→**Material...** створити матеріал: назвати його як **УОЛ-300-1А**, за допомогою кнопки **Type...** обрати тип матеріалу **Orthotropic (2D)**, ввести модулі пружності згідно з таблицею 1, окрім значень E_{33} , μ_{23} та μ_{13} . Аналогічно створити матеріал **УТ-900-3А**;

6. За допомогою команди **Model**→**Layup...** створити шарувату структуру. Спочатку потрібно ввести 4 шари.

- Для кожного шару зі списку «**Material**» – обрати матеріал, у полі **Thickness** ввести товщину шару, а в полі **Angle** – кут укладання шару.
- Кнопкою **New Ply** створити шар.

Нагадаємо, що шари з вуглецевої стрічки УОЛ-300-1А товщиною 0.235 мм укладені під кутами 0 і 90 градусів відносно повздовжньої осі пластини, а з вуглецевої тканини УТ-900-3А товщиною 0.220 мм – під кутами ± 45 градусів. Структура ПКМ така: [-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/90]_s, тобто від поверхні спочатку тричі повторюється структура [-45/0/45/90] (до центру), а потім далі – як дзеркальне відображення.

Для редагування помилково введених даних потрібно клацнути на шарі з помилкою, у відповідному полі ввести необхідне значення та ініціювати відповідну кнопку **Update ...**. А за допомогою кнопок **Move Up** та **Move Down** можна перемістити обраний шар вгору або вниз у структурі.

Коли структура з 4-х шарів буде сформована, потрібно за допомогою клавіші **Shift** обрати всі 4 шари та двічі дати команду **Duplicate**. Потім за допомогою клавіші **Shift** обрати всі 12 шарів та дати команду **Symmetric**. Буде створена симетрична структура з 24-ма шарами. Її можна назвати, наприклад, як **Str24**.

Якщо дати команду **Compute...**, то в полі **Message** з'явиться звіт про усереднені значення модулів пружності. Порівняйте їх зі значеннями таблиці 2;

7. За допомогою команди **Model**→**Property...** створити «властивість» СЕ типу **Plate Laminate** з використанням шаруватої структури, створеної інструментом **Layup**: ініціювати кнопку «**Elem/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**», у секції «**Plane Elements**» обрати тип СЕ «**Lam-**

inate». Після команди «**OK**» на панелі «**Define Property**» зі списку «**Layup**» – обрати створену структуру а також ввести назву: **Plate24**;

8. За допомогою команди **Mesh→Mesh Control→Default Size...** встановити **Element Size=2** мм;

9. За допомогою команди **Mesh→Geometry→Surface...** обрати поверхню пластини,

- на панелі «**Automesh Surfaces**», що з'явиться, ініціювати кнопку **More Options...**,
- обрати створену «**Property**»,
- встановити опції «**Midside Nodes**» й «**Move to Geometry**» (проміжні вузли – на геометрію). Після команди «**OK**» на поверхні пластини з'явиться сітка СЕ;

10. За допомогою команди **Modify→Update Elements→Material Orientation...** встановити однаковий варіант напрямків властивостей матеріалу:

- спочатку обрати всі СЕ,
- потім на панелі «**Material Orientation Direction**», що з'явиться, ініціювати радіокнопки «**Coordinate Axis**» та «**+X**» (якщо цього не зробити, при запуску завдання на розрахунок з'явиться повідомлення про необхідність встановлення напрямку властивостей матеріалу);

Етап 3. Створення завдання для розрахунку елемента конструкції – моделі 1

11. За допомогою команди **Model→Load→On Surface...** створити набір для навантажень, обрати поверхню, на панелі «**Create Load on Surfaces...**» у списку обрати варіант навантаження «**Pressure**» та ввести значення **Pressure=0.1** МПа;

12. За допомогою команди **Model→Constraint→Nodal...** створити набір для закріплень,

- потім за допомогою кнопки «**Methods^**» обрати метод «**On Curve**»,
- обрати лінію – *ліву вертикальну* (на ній $X=0$),



- на панелі, яка з'явиться після команди «ОК», у секції «DOF» встановити прапорець для **TZ**.
- Після команди «ОК» знов за допомогою кнопки «Methods^» обрати метод «On Curve»,
- обрати лінію – *праву вертикальну* (на ній $X=100$),
- на панелі, яка з'явиться після команди «ОК», у секції «DOF» встановити прапорець для **RY**.
- Після команди «ОК» знов за допомогою кнопки «Methods^» обрати метод «On Curve»,
- обрати лінію – *нижню горизонтальну* (на ній $Y=0$), на панелі, яка з'явиться після команди «ОК», у секції «DOF» встановити прапорець для **TU**.
- Після команди «ОК» дати відповідь «No».
- Після команди «ОК» – обрати *лівий верхній* та *лівий нижній* вузли, для них ініціювати **TX**. Після команди «ОК» дати відповідь «No»;

13. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», ініціювати кнопку «**New...**», на панелі «**Analysis Set**» – обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**1..Static**» (тобто статична задача). Ініціювати кнопку **Next...** та встановити 4 процесора;

14. Кнопкою **Analyze** запустити процес аналізу.

Етап 4. Результати розрахунку елемента конструкції – моделі 1

15. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...**, **Delete→...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися;

16. Після закінчення розрахунків стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель «**Select PostProcessing Data**». На ній у вікні «**Output Sets**» обирається набір результатів; у вікні «**Deformation**» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**Deformed Style**); у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**). Для відображення результатів на контурі (див. рис. 9.1.) достатньо ініціювати кнопку .

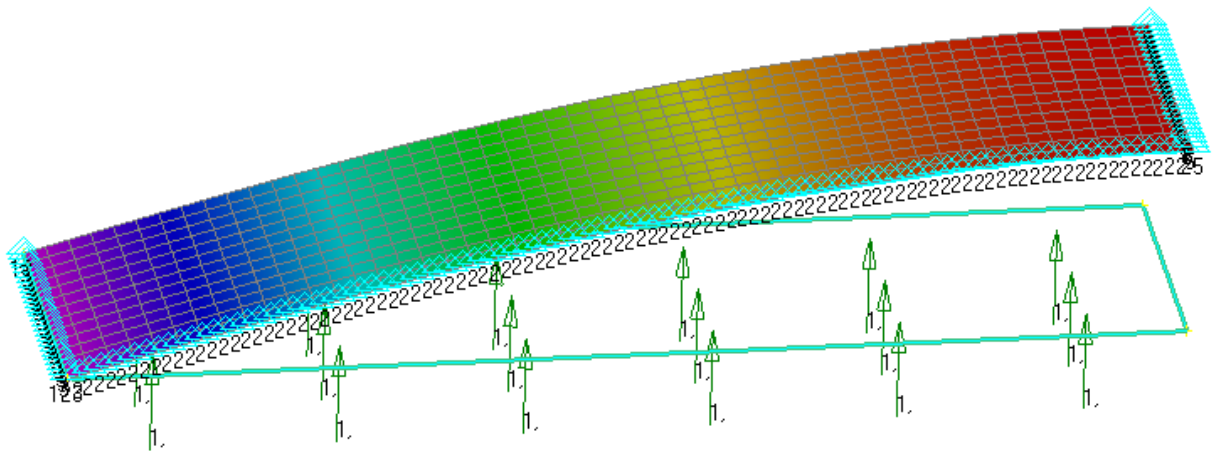







Рис. 9.1. Деформований стан «Моделі 1» пластини. Повні переміщення 2.34 мм

17. За допомогою кнопки  (або  для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**), закріплення (**Constraint**) та тиск (**Pressure**);


18. За допомогою кнопки  можна включити режим показу деформованого стану (**Deformed**) – див. рис. 9.1., повернуто;

19. За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно). Назва вектора виводиться на робочому полі зліва внизу.

Для перевірки: максимальне значення повних переміщень (**Total Translation**) повинне дорівнювати **2.34** мм (червоний колір на рис. 9.1.).

20. За допомогою команди **File→Save As...** зберегти проект у файлової системі під назвою **CP_9-4.modfem**.

21. Видалити результати розрахунків, навантаження та закріплення моделі. Дати команду **File→Rebuild**, щоб «піджати» файл.

За допомогою кнопки  зберегти рештки моделі (тобто в файл **CP_9-4.modfem**), а також за допомогою команди **File→Save As...** послідовно збере-

гти проект під назвами **CP_9-3.modfem** та **CP_9-2.modfem**. Тобто актуальною стає **модель 2**;

МОДЕЛЬ 2

Етап 5. Підготовка моделі 2

22. За допомогою команди **Tools→Workplane...** повернути робочу площину навколо осі **Z** на кут **45** градусів:

- кнопкою **Rotate** викликати діалогову панель **Vector Locate - ...**,
- встановити в полях **X** та **Y** всі нулі, а в полях **Z** – нуль та одиницю,
- дати команду **ОК** та ввести кут **45** градусів.
- За допомогою команди **Model→Coord Sys...** створити в робочій площині локальну систему координат:
- обрати радіокнопку **Workplane**, ввести назву – **45**;

23. Аналогічно п.3 знов повернути робочу площину навколо осі **Z** на кут **45** градусів та створити в ній локальну систему координат з назвою **90**. Ще раз повернути робочу площину навколо осі **Z** на кут **45** градусів та створити в ній локальну систему координат з назвою **-45**;

24. За допомогою команди **Modify→Edit→Material ...** відредагувати матеріали: замінити **Orthotropic (2D)**, на **Orthotropic (3D)**, потім ввести модулі пружності згідно з таблицею 1;

25. За допомогою команди **Model→Property...** створити 4 «властивості» **CE** типу **Solid** з використанням створених матеріалів:

- ініціювати кнопку «**Elem/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**»,
- у секції «**Volume Elements**» обрати тип **CE** «**Solid**».
- Після команди «**ОК**» на панелі «**Define Property - ...**» обрати матеріал **УОЛ-300-1А** та ввести назву: **0_Solid**.
- Потім – змінити напрямок орієнтації матеріалу на **90** градусів:
- в списку **Align to CSys** обрати координатну систему з назвою **90**,
- ввести в полі **Title** назву **90_Solid**.

- Потім – в списку **Align to CSys** обрати координатну систему з назвою **45**,
- обрати матеріал **UT-900-3A**, ввести в полі **Title** назву **45_Solid**.
- І наостаннє, в списку **Align to CSys** обрати координатну систему з назвою **-45**, ввести в полі **Title** назву **-45_Solid**;

26. Для визначеності перенумеруємо СЕ: команда **Modify→Renumber→Element**, оберемо *всі* СЕ, двічі «ОК». Повинно бути 650 СЕ;

27. Будемо створювати СЕ типу **Solid** пошарово, оскільки товщина шарів є різною. Зі структури **[-45/0/45/90/-45/0/45/90/-45/0/45/90]s** спочатку створимо перші 4 шари, потім будемо їх розмножувати копіюванням та дзеркальним відображенням.

- Отже, створюємо 1-й шар: **Mesh→Extrude→Element...**, **Select All**, **ОК**,
- обираємо зі списку **Property** значення **-45_Solid**, вводимо в полі **Elements along Length** значення **1**, **ОК**.
- У полях **X** та **Y** потрібно ввести *нулі*, а у полях **Z** – ввести **0** та **0.22**. **ОК**. Перший шар СЕ типу **Solid** створено;

28. Створюємо 2-й шар:

- **Mesh→Extrude→Element...**, **Method^ →Type → 22..Laminate Plate Parabolic → More → ОК**,
- Потім обираємо зі списку для **Property** значення **2..0_Solid**, вводимо в полі **Elements along Length** значення **1**, **ОК**.
- У полях **X** та **Y** потрібно ввести *нулі*, а у полях **Z** – ввести **0** та **-0.235**. **ОК**. Другий шар СЕ створено, але не на місці, а знизу.
- Тому копіюємо його на місце: **Mesh→Copy→Element...**, **Method^ →Property → 2 → More → ОК, ОК**.
- У полях **X** та **Y** ввести *нулі*, а у полях **Z** – ввести **0** та **0.455**. **ОК**.

29. Видалимо вже непотрібні СЕ.

- Спочатку типу **Laminate** (вони мають тип **22**): **Delete→Model→Element...**, **Method ^ →Type → 22..Laminate Plate, Parabolic → More → ОК, ОК**.
- Потім видалимо СЕ типу **Solid**, що створені не на місці: **Delete→Model→Element...**, **Pick^ → Coordinate**, ініціювати координа-

ту **Z** та радіокнопку **Between**, в поле **Min** ввести **-0.3**, а в полі **Max** ввести **-0.01** (тобто обрати всі СЕ з координатами вузлів, гарантовано меншими ніж $Z=0$), **ОК, ОК**.


- Потім видалимо **Property** типу **Laminate: Delete**→**Model**→**Property...**, **1, More, ОК, ОК**.

Можна видалити **Layup**, але це не обов'язково. Два перших шари СЕ типу Solid створено;

30. Копіюємо створені два шари на місця третього та четвертого шарів, потім змінюємо їх властивості. Отже, **Mesh**→**Copy**→**Element...**, **Select All** → **ОК, ОК**. У полях **X** та **Y** потрібно ввести *нули*, а у полях **Z** – ввести 0 та 0.455, **ОК**;

31. Змінюємо властивості матеріалів 3 та 4 шарів:

- **Modify**→**Update Element**→**Property ID...**, **Pick**^ → **Coordinate**, ініціювати координату **Z** та радіокнопку **Between**, в поле **Min** ввести **0.456**, а в полі **Max** ввести **0.674**, **ОК**,
- обрати зі списку **Entity ID** значення **3..45_Solid**, **ОК**.
- Знову **Modify**→**Update Element**→**Property ID...**, **Pick**^ → **Coordinate**, ініціювати координату **Z** та радіокнопку **Between**, в поле **Min** ввести **0.676**, а в полі **Max** ввести **0.9**, **ОК**,
- обрати зі списку **Entity ID** значення **5..90_Solid**, **ОК**.

Команда **Ctrl+G** (з клавіатури) дозволить побачити всі створені СЕ. Зберегти поточну ситуацію за допомогою кнопки ;

32. Копіюємо створені шари: **Mesh**→**Copy**→**Element...**, **Select All** → **ОК**, в полі **Repetitions** вводимо **2**, **ОК**. У полях **X** та **Y** потрібно ввести *нули*, а у полях **Z** – ввести 0 та **0.91**, **ОК**. Створено 12 шарів СЕ типу Solid;

33. Дзеркально відображаємо всі СЕ відносно площині з координатою $Z=2.73$ мм: **Mesh**→**Reflect**→**Element...**, **Select All** → **ОК, ОК**. У полях **X** потрібно ввести **0, 1, 0**, в полях **Y** – **0, 0, 1**, а у полях **Z** – тричі ввести **2.73**, **ОК**. Створено всі 24 шари СЕ типу Solid;

34. Видалимо зайві вузли: **Delete**→**Model**→**Node...**, **Select All**, **OK**, **OK**.

35. Зшиємо всі шари: **Tools**→**Check**→**Coincident Nodes**, **Select All**, **OK**, **OK**. Маємо сітку з 15600 CE та 69061 вузла (див. зліва понизу);

36. Створимо **Solid: Geometry**→**Solid**→**Extrude...**, у полі **To Dept** ввести **5.46**. При необхідності змінити напрям створення тіла, **OK**;

37. Створимо асоціацію геометрії з сіткою CE: **Modify**→**Associativity**→**Automatic...**, **Select All**, **OK**, **Select All**, **OK**, **OK**.

Етап 6. Створення завдання для розрахунку елемента конструкції – моделі 2

38. За допомогою команди **Model**→**Load**→**On Surface...** створити набір для навантажень, обрати верхню поверхню пластини, на панелі «**Create Load on Surfaces...**» у списку обрати варіант навантаження «**Pressure**» та ввести значення **Pressure=0.1** МПа;

39. За допомогою команди **Model**→**Constraint**→**Nodal...** та за допомогою кнопки «**Methods^**» обрати метод «**On Curve**»,


- обрати лінію з $X=Z=0$, на панелі, яка з'явиться після команди «**OK**», у секції «**DOF**» встановити прапорець для **TZ**.
- Після команди «**OK**» знов за допомогою кнопки «**Methods^**» обрати метод «**On Surface**», обрати поверхню $X=100$, на панелі, яка з'явиться після команди «**OK**», у секції «**DOF**» встановити прапорець для **TX**.
- Після команди «**OK**» знов за допомогою кнопки «**Methods^**» обрати метод «**On Surface**», обрати поверхню $Y=0$, на панелі, яка з'явиться після команди «**OK**», у секції «**DOF**» встановити прапорець для **TY**. Після «**OK**» дати відповідь «**No**»;


40. Завдання на розрахунок існує. За допомогою команди **Model**→**Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», і, якщо його немає, ініціювати кнопку «**New...**», на панелі «**Analysis Set**» – обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**1..Static**» (тобто статична задача). Ініціювати кнопку **Next...** та встановити 4 процесора;



41. Кнопкою **Analyze** запустити процес аналізу.


Етап 7. Результати розрахунку елемента конструкції – моделі 2



42. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...** , **Delete→ ...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися;

43. Після закінчення розрахунків стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель «**Select PostProcessing Data**». На ній у вікні «**Output Sets**» обирається набір результатів;

- у вікні «**Deformation**» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**Deformed Style**);
- у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**);
- для відображення результатів на контурі (див. рис. 9.2.) достатньо ініціювати кнопку .

44. За допомогою кнопки  (або  для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**), закріплення (**Constraint**) та тиск (**Pressure**);

45. За допомогою кнопки  можна включити режим показу деформованого стану (**Deformed**) – див. рис. 9.2., повернуто;

46. За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно). Назва вектора виводиться на робочому полі зліва внизу.

Для перевірки: максимальне значення повних переміщень (**Total Translation**) повинне дорівнювати 2.383 мм (червоний колір на рис. 9.2.).

За допомогою кнопки  або клавіші **F4** зберегти модель.

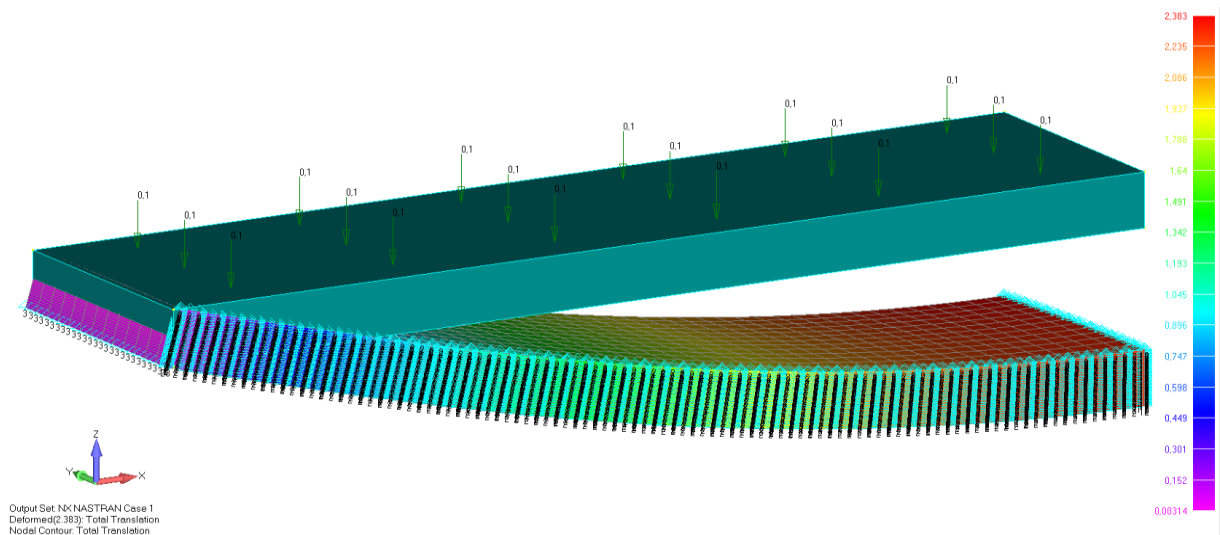


Рис. 9.2. Деформований стан «Моделі 2» пластини. Повні переміщення 2.383 мм

МОДЕЛЬ 3

Етап 8. Підготовка моделі 3

47. За допомогою команди **File**→**Open...** відкрити збережений раніше проект у файловій системі під назвою **CP_9-3.modfem**. Тобто актуальною стає **модель 3**;

48. За допомогою команди **Model**→**Material...** створити матеріал: обрати тип матеріалу **Orthotropic (3D)**, ввести модулі пружності згідно з таблицею 2, тобто матеріал з усередненими пружними характеристиками, дати назву **Composite**;

49. За допомогою команди **Model**→**Property...** створити «властивість» **CE** типу **Solid** з використанням створеного матеріалу:

- ініціювати кнопку «**Elem/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**», у секції «**Volume Elements**» обрати тип **CE** «**Solid**».
 - Після команди «**ОК**» на панелі «**Define Property - ...**» обрати матеріал **Composite** та ввести назву: **Composite_Solid**;
50. Будемо створювати **CE** типу **Solid** в кількості 6 **CE** по товщині:
- **Mesh**→**Extrude**→**Element...**, **Select All**, **ОК**,

- обираємо зі списку Property значення **Composite_Solid**, вводимо в полі **Elements along Length** значення **6**, ініціюємо опцію **Delete Original Elements, OK**.
- У полях **X** та **Y** потрібно ввести *нули*, а у полях **Z** – ввести 0 та 5.46. **OK, OK**.


Усі SE типу Solid створено, а типу Laminate – видалено;

51. Для визначеності перенумеруємо SE: команда **Modify→Renumber→Element**, оберемо *всі* SE, двічі «**OK**». Повинно бути 3900 SE та 18823 вузла;

52. Створимо **Solid: Geometry→Solid→Extrude...**, у полі **To Dept** введи **5.46**. При необхідності змінити напрям створення тіла, **OK**;

53. Створимо асоціацію геометрії з сіткою SE: **Modify→Associativity→Automatic...**, **Select All, OK, Select All, OK, OK**.

54. Видалити всі **Property, Layup** та матеріали (потрібні – залишаться);

55. Дати команду **File→Rebuild**, щоб «піджати» файл. За допомогою кнопки  зберегти файл моделі (тобто в файл **CP_9-3.modfem**).

Етап 9. Створення завдання для розрахунку елемента конструкції – моделі 3

56. За допомогою команди **Model→Load→On Surface...** створити набір для навантажень, обрати верхню поверхню пластини, на панелі «**Create Load on Surfaces...**» у списку обрати варіант навантаження «**Pressure**» та ввести значення **Pressure=0.1** МПа;

57. За допомогою команди **Model→Constraint→Nodal...** та за допомогою кнопки «**Methods^**» обрати метод «**On Curve**»,

- обрати лінію з $X=Z=0$, на панелі, яка з'явиться після команди «**OK**», у секції «**DOF**» встановити прапорець для **TZ**.
- Після команди «**OK**» знов за допомогою кнопки «**Methods^**» обрати метод «**On Surface**», обрати поверхню $X=100$, на панелі, яка

з'явиться після команди «ОК», у секції «DOF» встановити прапорець для TX.

- Після команди «ОК» знов за допомогою кнопки «Methods^» обрати метод «On Surface», обрати поверхню $Y=0$, на панелі, яка з'явиться після команди «ОК», у секції «DOF» встановити прапорець для TY.
- Після команди «ОК» дати відповідь «No»;


58. Завдання на розрахунок існує. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «Analysis Set Manager», і, якщо його немає, ініціювати кнопку «New...»,

- на панелі «Analysis Set» – обрати у списку «Analysis Type» значення «1..Static» (тобто статична задача).
- Ініціювати кнопку **Next...** та встановити 4 процесора;

59. Кнопкою **Analyze** запустити процес аналізу.


Етап 10. Результати розрахунку елемента конструкції – моделі 3

60. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...** , **Delete→ ...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися;

61. Після закінчення розрахунків стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель «Select PostProcessing Data».

На ній у вікні «Output Sets» обирається набір результатів;

- у вікні «Deformation» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**Deformed Style**);
- у вікні «Contour» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**).

Для відображення результатів на контурі (див. рис. 9.3.) достатньо ініціювати кнопку .

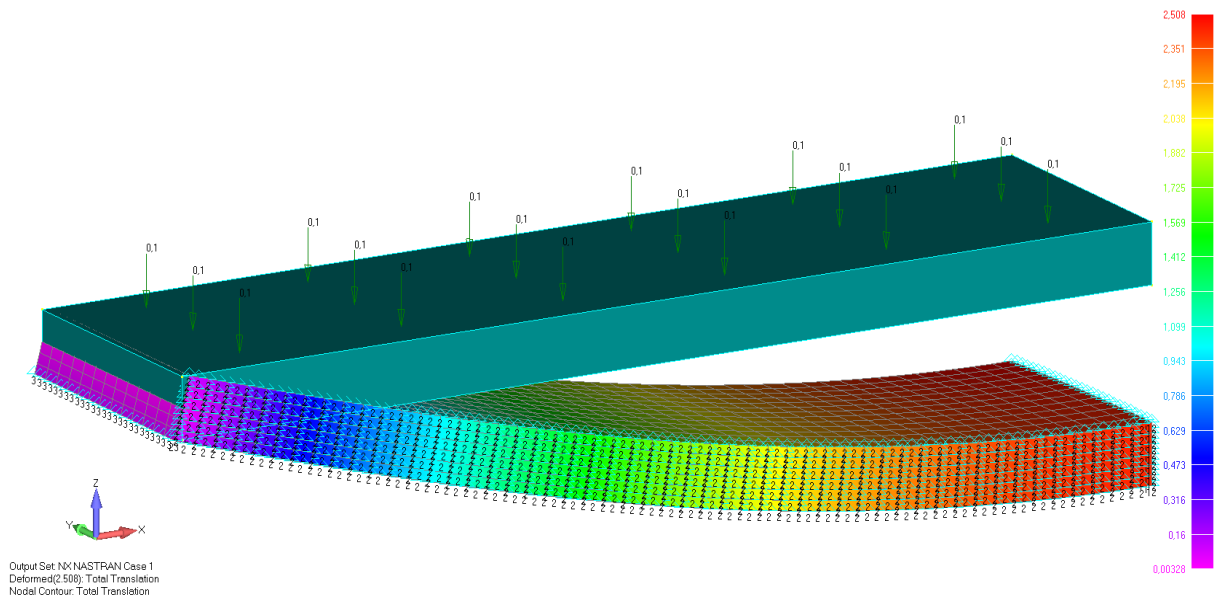







Рис. 9.3. Деформований стан «Моделі 3» пластини. Повні переміщення 2.508 мм

62. За допомогою кнопки  (або  для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**), закріплення (**Constraint**) та тиск (**Pressure**);

63. За допомогою кнопки  можна включити режим показу деформованого стану (**Deformed**) – див. рис. 9.3, повернуто;

64. За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно). Назва вектора виводиться на робочому полі зліва внизу.

Для перевірки: максимальне значення повних переміщень (**Total Translation**) повинне дорівнювати 2.508 мм (червоний колір на рис. 9.3.).

МОДЕЛЬ 4

Етап 11. Підготовка моделі 4

65. За допомогою команди **File**→**Open...** відкрити збережений раніше проект у файловій системі під назвою **CP_9-4.modfem**. Тобто актуальною стає **модель 4**;

66. За допомогою команди **Modify**→**Edit**→**Layup ...** відкрити створену раніше структуру, видалити з неї всі шари, окрім **1, 2, 3** та **4**, назвати структу-

ру, наприклад, як **Str4_1**, за допомогою кнопки **Save...** записати її у пам'ять, дати команду **Cancel**;

67. За допомогою команди **Model→Layup...** та потім – кнопки **Load...** зчитати з пам'яті структуру **Str4_1**, дати команду **OK**

- не виходячи з діалогу, знов зчитати з пам'яті структуру **Str4_1**, змінити назву на **Str4_2**, за допомогою кнопок **Move Up** та/або **Move Down** змінити порядок слідування шарів на протилежний, тобто зверху-вниз щоб були кути укладення -45, 0, 45, 90 градусів,
- дати команду **OK**; та вийти з діалогу;

68. За допомогою команди **Model→Property...** створити «властивість» СЕ типу **Solid Laminate** з використанням **Layup** з назвою **Str4_1**:

- ініціювати кнопку «**Elem/Property Type...**», встановити опцію «**Parabolic Elements**»,
- у секції «**Volume Elements**» обрати тип СЕ «**Solid Laminate**».
- Після команди «**OK**» на панелі «**Define Property - ...**» обрати раніше створену структуру **Layup** з назвою **Str4_1** та ввести назву: **Solid_Layup1**.
- Аналогічно створити **Property** зі структурою **Layup** з назвою **Str4_2**, назвати цю **Property** як **Solid_Layup2**;

69. Створити СЕ типу **Solid Laminate** в кількості 6 СЕ по товщині пластини: **Mesh→Extrude→Element..., Select All, OK**,

- обрати зі списку **Property** значення **Solid_Layup1**, вводимо в полі **Elements along Length** значення **6**, ініціюємо опцію **Delete Original Elements, OK**.
- У полях **X** та **Y** потрібно ввести *нули*, а у полях **Z** – ввести 0 та 5.46. **OK, OK**.

Усі СЕ типу **Solid** створено, а типу **Plate Laminate** – видалено. Повинно бути 3900 СЕ та 18823 вузла;

70. Змінити **Property** для верхніх трьох шарів СЕ:

- **Modify→Update Elements→Property ID**, кнопка **Pick^ → Coordinate...**, ініціювати координату **Z** та радіокнопку **Between**, в поле **Min** ввести 2.74, а в полі **Max** ввести **6, OK, OK**,
- обрати зі списку **Entity ID** значення **Solid_Layup2, OK**.


Тепер пластина має СЕ з дзеркально (відносно середини товщини) розташованими структурами;

71. Створити **Solid: Geometry→Solid→Extrude...**, у полі **To Dept** ввести **5.46**. При необхідності змінити напрям створення тіла, **ОК**;

72. Створити асоціацію геометрії з сіткою СЕ: **Modify→Associativity→Automatic...**, **Select All, ОК, Select All, ОК, ОК**;

73. Видалити всі **Property, Layup** та матеріали (потрібні – залишаться);

74. За допомогою команди **Modify→Edit→Material...** відредагувати матеріали: замінити **Orthotropic (2D)**, на **Orthotropic (3D)**, тобто ввести модулі пружності згідно з табл.1;

75. Дати команду **File→Rebuild**, щоб «піджати» файл. За допомогою кнопки  зберегти файл моделі (тобто в файл **CP_9-4.modfem**).

Етап 12. Створення завдання для розрахунку елемента конструкції – моделі 4

76. За допомогою команди **Model→Load→On Surface...** створити набір для навантажень, обрати верхню поверхню пластини, на панелі «**Create Load on Surfaces...**» у списку обрати варіант навантаження «**Pressure**» та ввести значення **Pressure=0.1** МПа;

77. За допомогою команди **Model→Constraint→Nodal...** та за допомогою кнопки «**Methods^**» обрати метод «**On Curve**»,



- обрати лінію з $X=Z=0$, на панелі, яка з'явиться після команди «**ОК**», у секції «**DOF**» встановити прапорець для **TZ**.
- Після команди «**ОК**» за допомогою кнопки «**Methods^**» обрати метод «**On Surface**», обрати поверхню $X=100$, на панелі, яка з'явиться після команди «**ОК**», у секції «**DOF**» встановити прапорець для **TX**.
- Після команди «**ОК**» знов за допомогою кнопки «**Methods^**» обрати метод «**On Surface**», обрати поверхню $Y=0$, на панелі, яка з'явиться після команди «**ОК**», у секції «**DOF**» встановити прапорець для **TY**. Після команди «**ОК**» дати відповідь «**No**»;

78. Завдання на розрахунок існує. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель «**Analysis Set Manager**», і, якщо його немає, ініціювати кнопку «**New...**», на панелі «**Analysis Set**» – обрати у списку «**Analysis Type**» значення «**1..Static**» (тобто статична задача). Ініціювати кнопку **Next...** та встановити 4 процесора;

79. Кнопкою **Analyze** запустити процес аналізу.

Етап 13. Результати розрахунку елемента конструкції – моделі 4

80. Якщо з'явилося повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...** , **Delete→ ...** та наведених вище модифікувати, видалити або знову створити об'єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з'являлися;

81. Після закінчення розрахунків стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель «**Select PostProcessing Data**». На ній у вікні «**Output Sets**» обирається набір результатів; у вікні «**Deformation**» – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**Deformed Style**); у вікні «**Contour**» – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**). Для відображення результатів на контурі (див. рис. 9.4.) достатньо ініціювати кнопку .

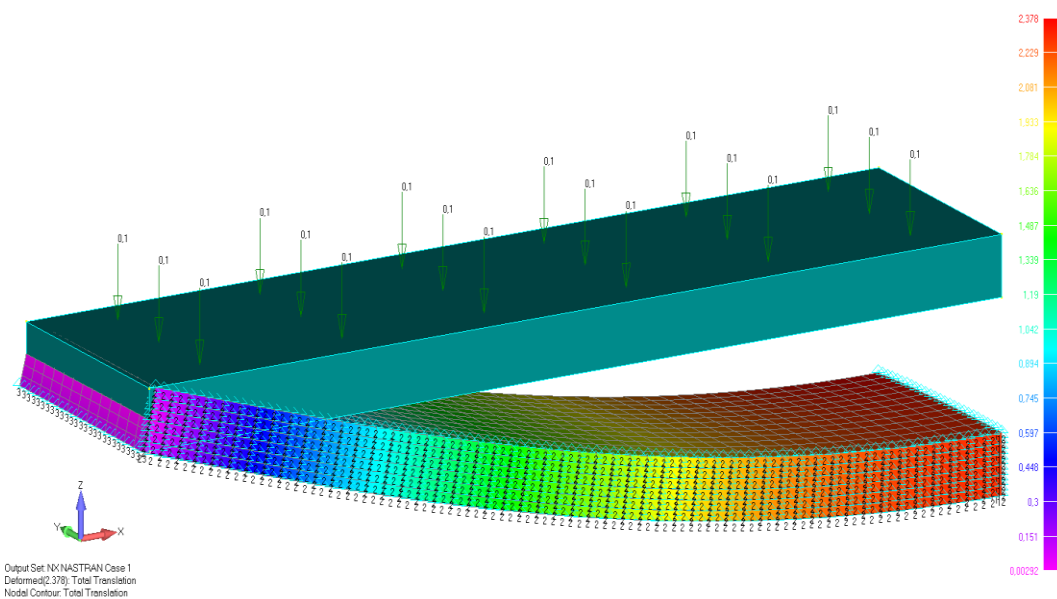







Рис. 9.4. Деформований стан «Моделі 4» пластини. Повні переміщення 2.508 мм

82. За допомогою кнопки  (або  для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати тільки елементи (**Element**), закріплення (**Constraint**) та тиск (**Pressure**);

83. За допомогою кнопки  можна включити режим показу деформованого стану (**Deformed**) (рис. 9.4.).

84. За допомогою кнопок  та  можна швидко міняти вектор результатів (наступні зі списку вниз або вгору відповідно).

Для перевірки: максимальне значення повних переміщень (**Total Translation**) повинне дорівнювати 2.378 мм (червоний колір на рис. 9.4.).

Отже, всі чотири моделі дали близькі результати з повного переміщення: 2.340, 2.383, 2.508 та 2.378 мм. Чому **модель 3** дала найбільше відхилення?

Перевірити, чи такі ж незначні відхилення мають найбільші значення напруження за Мізесом. Результати обґрунтувати: чому прогини близькі, а напруження – дуже різні?

Зміст звіту: файли у форматі **.modfem**, де представлені окремо моделі 1, 2, 3, 4 з розрахунками елементів конструкції з Комп'ютерного практикума № 9, прислати на електронну адресу поштової скриньки викладача.

КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ № 10

Аналіз елемента конструкції на пружну стійкість

Завдання: провести в середовищі FEMAP створення моделі крайової задачі про пружну стійкість елемента конструкції – пластини з отворами. Для отримання якісного розв'язку на відносно малій кількості скінченних елементів застосувати скінченні елементи типу **Plate** другого порядку наближення. Потрібно знайти **10** форм втрати стійкості.

Дані для виконання


Розміри пластини з отворами: довжина $L = 190$ мм, ширина $H = 40$ мм, товщина $t = 4$ мм, діаметр 6-ти отворів, розташованих симетрично, $d = 20$ мм

Матеріал пластини: сталь з модулем пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнтом Пуассона $\mu = 0,3$ та густиною 7.85 г/см³. Лівий торець пластини жорстко закріплений, а правий – шарнірно опертий.

Навантажується пластина з отворами розподіленою по всій поверхні правого торця пластини силою 50000 Н, яка має 2 варіанта напрямлення: нахил у 90 та 0 градусів від вертикалі, тобто стискує та згинає пластину в її площині.

Послідовність виконання роботи

Етап 1. Налаштування середовища під задачу

Для початку потрібно створити новий проект: запустити програму, за допомогою команди **File**→**Save...** зберегти проект у файловій системі (потім періодично зберігати поточну ситуацію за допомогою кнопки  або через **Save as** з новими іменами файлів відповідно до номеру виконаного пункту).

Етап 2. Створення геометричної моделі пластини з отворами

Геометрична модель пластини з отворами (див. рис.1) створюється з прямокутника розмірами 190×40 мм та 6-ти отворів. Товщина пластини задається як властивість скінченних елементів.

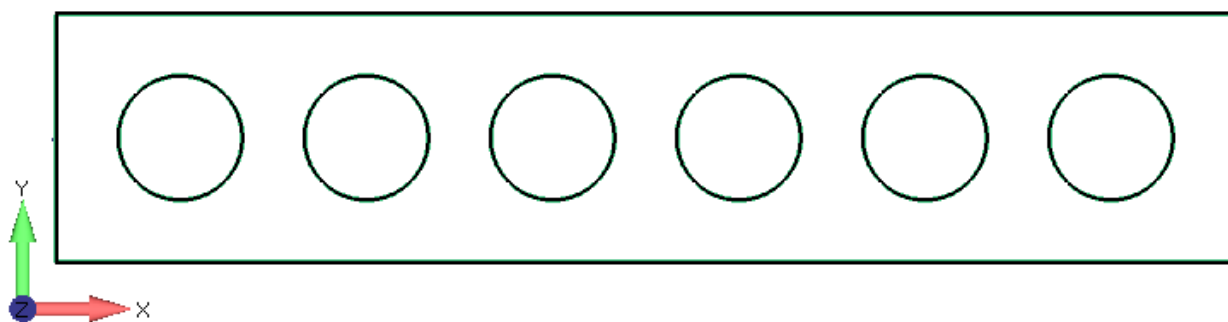


Рис.1. До створення моделі пластини з отворами

1. За допомогою команди **Geometry**→**Curve-Line**→**Rectangle...** створити прямокутник на основі двох точок з координатами: $0, -20, 0$ та $190, 20, 0$ мм;
2. За допомогою команди **Geometry**→**Curve-Circle**→**Center...** створити окружність з координатою центра $20, 0, 0$ та радіусом 10 мм;

3. За допомогою команди **Geometry→Copy→Curve...** зробити 5 копій окружностей зі зміщенням у напрямку осі X на 30 мм;

4. За допомогою команди **Geometry→Boundary Surface→From Curves...** створити поверхню, обмежену лініями, створеними у п.2...4;

Етап 2. Створення скінченно-елементної сітки пластини з отворами

5. За допомогою команди **Model→Material...** створити матеріал: назвати його як **Steel**, ввести модуль Юнга **E=2.1e5** МПа, коефіцієнт Пуассона **nu=0.3**, густину матеріалу **Mass Density 7.85e-9** т/мм³;

6. За допомогою команди **Model→Property...** створити „властивість” скінченних елементів (CE):

- зі списку „**Material**” – обрати матеріал **Steel**,
- ініціювати кнопку „**Elem/Property Type...**”,
- встановити опцію „**Parabolic Elements**”,
- у секції „**Plane Elements**” обрати тип CE „**Plate**”.
- Після команди „**OK**” на панелі „**Define Property**” задати товщину пластини у полі **Thicknesses, Tavg or T1 = 4** мм
- ввести назву: **Plate_Steel**;

7. За допомогою команди **Mesh→Mesh Control→Default Size...** встановити **Element Size= 3** (це є максимальний діаметр майбутніх скінченних елементів);

8. За допомогою команди **Mesh→Geometry→Surface...** створити сітку скінченних елементів:

- на панелі „**Automesh Surface**”, що з’явиться, ініціювати кнопку **More Options...**,
- обрати створену раніше „**Property**” з назвою **Plate_Steel**,
- встановити опції „**Midside Nodes**” й „**Move to Geometry**” (проміжні вузли – на геометрію),
- у секції „**Meshes**” обрати варіант „**Quad**”, дати команду „**OK**”.

Буде побудована двовимірною сітка CE типу **Plate** (див. рис.2);

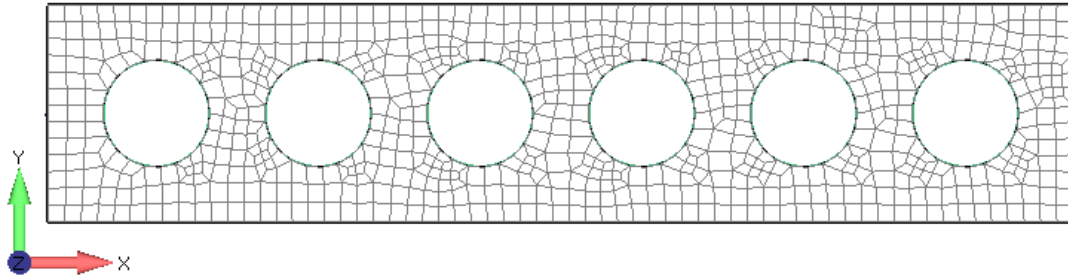


Рис.2. Двовимірний сітка SE типу **Plate** моделі пластини з отворами

Етап 4. Створення завдань для розрахунку пластини з отворами, проведення розрахунків та аналіз результатів розрахунків

9. За допомогою команди **Model→Load→On Curve...** створити набір для навантажень, потім обрати лінію, що відображує *праву* границю пластини (див. рис.3); на панелі „**Create Load on Curves**” у списку обрати варіант навантаження „**Force**”, ввести значення $F_x = -50000$ (Н). **Примітка:** цей варіант відповідає куту нахилу сили від вертикалі у 90 градусів;

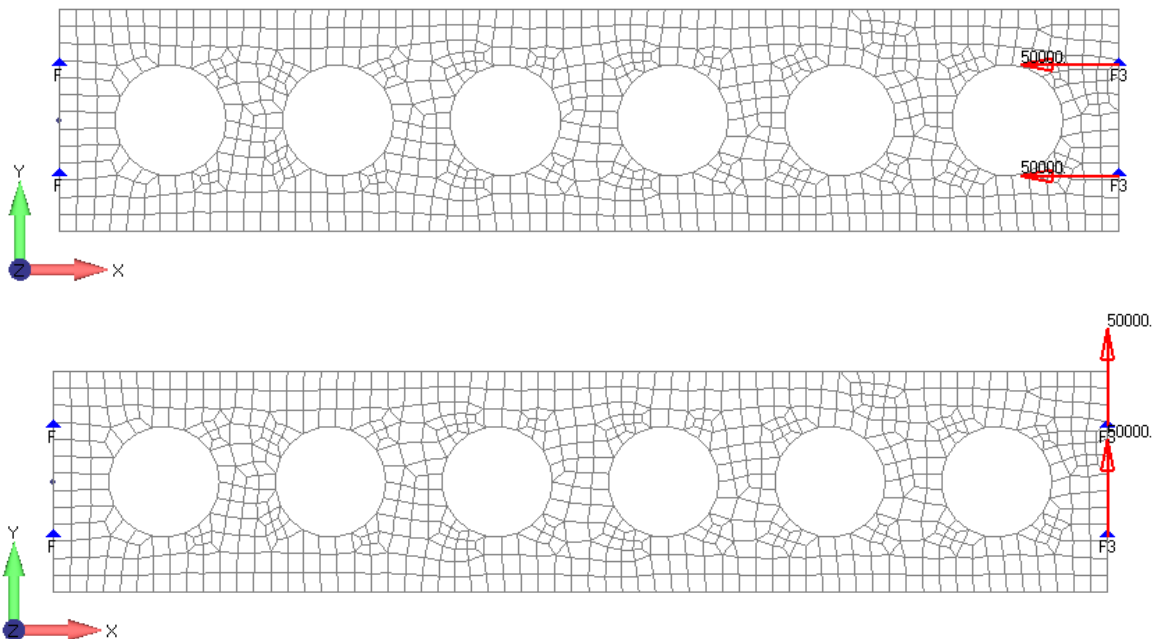


Рис.3. До введення граничних умов у модель пластини з отворами

10. За допомогою команди **Model→Constraint→On Curve...** створити набір для закріплень, потім обрати *ліву* границю пластини. На панелі „**Cre-**

ate **Constraint on Geometry**”, обрати радіокнопку „**Fixed**”. З’явиться позначення **F** (див. рис.3);

11. За допомогою команди **Model→Constraint→On Curve...** обрати *праву* границю пластини (див. рис.3). На панелі „**Create Constraint on Geometry**”, обрати радіокнопку „**Arbitrary In CSys**”, встановити „прапорець” для **TZ** (шарнірне обпирання). З’явиться позначення **F3** (див. рис.3);

12. За допомогою команди **Model→Analysis...** викликати панель „**Analysis Set Manager**”,

- ініціювати кнопку „**New...**”,
- на панелі „**Analysis Set**” обрати у списку „**Analysis Type**” значення „**7..Buckling**” (тобто стійкість).
- П’ять разів ініціювати кнопку „**Next**”, зробити таке уточнення у завданні на розрахунок: на панелі „**NASTRAN Buckling Analysis**” у полі „**Number Desires**” поставити **10** – кількість форм втрати стійкості;
- наслідок дати команду „**OK**”;

13. Кнопкою **Analyze** запустити процес аналізу. Якщо з’явилися повідомлення про фатальні помилки, то потрібно за допомогою команд **Modify→Edit...** , **Delete→ ...** та наведених вище команд модифікувати, видалити або знову створити об’єкти моделі таким чином, щоб фатальні помилки не з’являлися;

14. За допомогою команди **Model→Load→Create/Manage Set...** створити новий набір для навантажень. Він автоматично стане активним;

15. За допомогою команди **Model→Load→On Curve...** обрати лінію, що відображує *праву* границю пластини (див. рис.3);

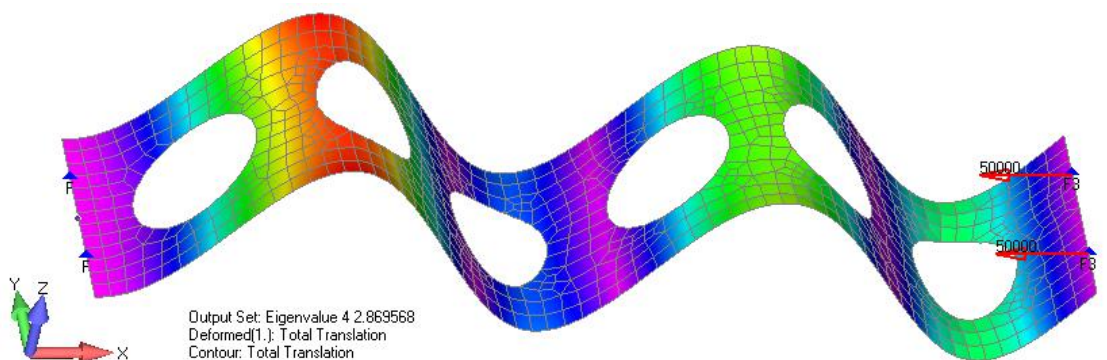
- на панелі „**Create Load on Curves**” у списку обрати варіант навантаження „**Force**”,
- ввести значення **FY= 50000** (Н).

Примітка: цей варіант відповідає куту нахилу сили від вертикалі у 0 градусів;

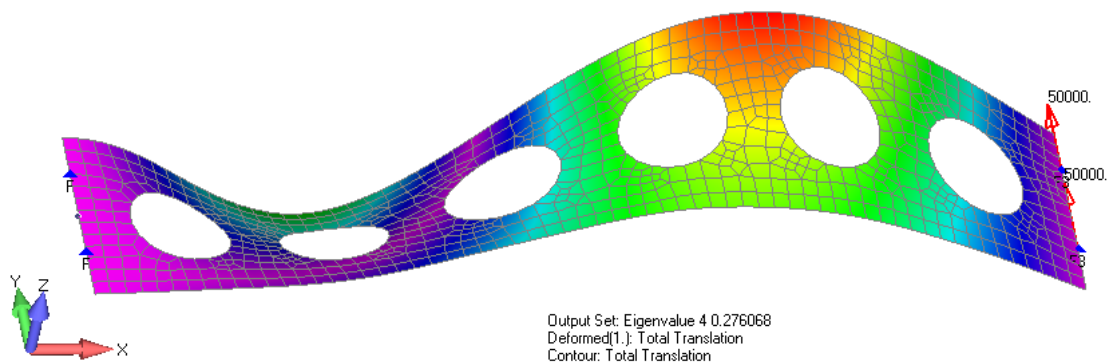
16. За допомогою команди **Model**→**Analysis...** викликати панель „**Analysis Set Manager**”,

- ініціювати кнопку „**New...**”,
- на панелі „**Analysis Set**” обрати у списку „**Analysis Type**” значення „**7..Buckling**” (тобто стійкість).
- П’ять разів ініціювати кнопку „**Next**”,
- зробити таке уточнення у завданні на розрахунок: на панелі „**NASTRAN Buckling Analysis**” у полі „**Number Desired**” поставити **10** – кількість форм втрати стійкості;
- наслідок дати команду „**OK**”;

17. Кнопкою **Analyze** запустити процес аналізу;



a)







б)

Рис.4. Результати розрахунків, варіанти навантажень.
а) – 1 (вздовж осі пластини); б) – 2 (поперек осі пластини)

18. Після успішного закінчення розрахунків стає активною кнопка  (**Post Data**), яка викликає панель „**Select PostProcessing Data**”.

- На ній у вікні „**Output Set**” обирається набір результатів;

- у вікні „**Deformation**” – вектор результатів, на основі якого буде проводитися анімація відображення (**Deformed Style**);
- у вікні „**Contour**” – той, на основі якого буде створюватися кольорове відображення результатів (**Contour Style**).
- Для відображення результатів на контурі (див. рис.3) достатньо ініціювати кнопку . За допомогою кнопки  (або  для старих версій Femap) можна очистити зображення: вказати, щоб показувати, наприклад тільки елементи (**Element**), сили (**Force and Bearing**) та лінії (**Curve**). За допомогою кнопки  можна включити режим показу деформованого стану (**Deformed**);

19. Обрати набір результатів з характерним початком „...**Eigenvalue**”, наприклад, „**3..Eigenvalue 2 0.344898**”, де перша цифра вказує номер геометричної форми втрати стійкості тілом, а число наприкінці – коефіцієнт, на який потрібно помножити всі навантаження, щоб отримати критичне навантаження (набори зі знаком мінус можна не розглядати). Вектор результатів можна обрати будь-який, наприклад, „**1..Total Translation**”.

20. Потрібно переглянути всі форми геометричної форми втрати стійкості тілом при двох різних варіантах навантаження (див. рис.4). Пояснити отримані результати.

Примітка. Розв’язок задачі про пружну втрату стійкості проводиться за два етапи. На першому розв’язується звичайна пружна статична задача. На основі її результатів до матриці жорсткості додається ще одна матриця, яка зветься матрицею геометричної жорсткості, хоча вона відображає вплив силових факторів на форми втрати стійкості.

- Матриця геометричної жорсткості додається з коефіцієнтом, який визначає степінь завантаженості тіла по відношенню до критичного навантаження та отримує сенс власного числа матриці.
- Тому другий етап розв’язування задачі про втрату стійкості – знаходження призначеної кількості власних чисел матриці – коефіцієнтів навантаження. Детермінант отриманої матриці прирівнюється до нуля.
- Друга та всі вищі форми втрати стійкості можуть реалізуватися лише при швидкому (динамічному) навантаженні.

Література

1. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій. В 2-х томах. Т.І. Чисельні методи алгебри: Навч. посібник [для студ. вищ. навч. закл. Електронний ресурс] / К.М. Рудаков – Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. – 148 с.
2. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій. В 2-х томах. Т.ІІ. Класичні крайові задачі: Навч. посібник [для студ. вищ. навч. закл. Електронний ресурс] / К.М. Рудаков – Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2020. – 300 с.
3. Бігун Я.Й. Числові методи: навчальний посібник. - Чернівці : Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, 2019. - 435 с.
4. Гончаров О.А. Чисельні методи розв'язання прикладних задач : навчальний посібник / О.А. Гончаров, Л.В. Васильєва, А.М. Юнда ; Міністерство освіти і науки України, Сумський державний університет. - Суми : Сумський державний університет, 2020. - 141 с.
5. Рудаков К.Н. FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций / К.Н. Рудаков. К., 2011. 317 с. Електрон. аналог друк. вид. : URL:<http://mmidmm.kpi.ua/index.php/ua/vikladachikafedri/16-rudakov-kostyantyn-mikolajovich.html>
6. Дифучин Ю.М., Рудаков К.М. Чисельне моделювання болтових з'єднань з ПКМ. Повідомлення 2. Вплив зазорів і структури ПКМ на характеристики напружено-деформованого стану болтів // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. машинобудування. №3(78), 2016. – С. 132-145.
7. FINITE ELEMENTS AND APPROXIMATION (1983) O.C. Zienkiewicz, K. Morgan. University of Wales, Swansea, United Kingston.
8. Bathe Klaus-Jürgen. Finite Element Procedures. Second Edition – Prentice Hall, 2014. – 1043 p.
9. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник / К.М. Рудаков. К.: НТУУ «КПІ», 2007. 379 с.
10. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ : програмна реалізація та візуалізація результатів : навч. посіб. / А.Я. Карвацький ; М-во освіти і науки України, НТУУ «КПІ». - Київ : НТУУ «КПІ», 2015. - 390 с.
11. Числові методи в динаміці і міцності машин. Стаціонарні задачі. Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус) https://mmidmm.kpi.ua/images/2022/silabus_22_23/bak_vibor/PV8_1.pdf