

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до проведення практичних занять

з дисципліни «Інженерні розрахунки та проєктування в
САЕ-системах»

для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка»
освітніх програм «Технології та устаткування зварювання» та
«Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій»
усіх форм навчання

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Інженерні розрахунки та проєктування в САЕ-системах» для студентів спеціальності G9 «Прикладна механіка» освітніх програм «Технології та устаткування зварювання» та «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» усіх форм навчання / Укл.: Г.М. Лаптева, І.М. Білони́к. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 57 с.

Укладачі: Г.М. Лаптева, доцент, канд. техн. наук
І.М. Білони́к, доцент, канд. техн. наук

Рецензент: М.Ю. Осіпов, доцент, канд. техн. наук

Гаранти ОПП: О.Є. Капустян, доцент, канд. техн. наук
М.Ю. Осіпов, доцент, канд. техн. наук

Відповідальний
за випуск: Г.М. Лаптева.

ЗАТВЕРДЖЕНО:
на засіданні кафедри ІТЗ та МК
Протокол №5 від 29.11.2024 р.

Рекомендовано
до видання НМК ІФФ
Протокол №4
від 17.12.2024 р.

ЗМІСТ

1 Практична робота 1 «Аналіз можливостей та областей використання методу скінчених елементів. Етапи скінчено-елементного аналізу»	4
2 Практичне заняття № 2 «Розробка геометричної моделі виробу. Моделювання в препроцесорі»	11
3 Практичне заняття № 3 «Етапи формування фізичної моделі матеріалу»	19
4 Практичне заняття № 4 «Розробка скінчено-елементної моделі. Характеристика скінчених елементів різних типів. Управління якістю сітки»	26
5 Практичне заняття № 5 «Види граничних умов. Визначення переміщень. Завдання навантажень».....	33
6 Практичне заняття № 6 «Вибір типу розрахунку (вирішувача). Аналіз напружено-деформованого стану»	40
7 Практичне заняття № 7 «Оцінка адекватності математичної моделі зварної конструкції. Оцінка якості сітки».....	47
Додаток 1	52
Додаток 2	56
Додаток 3	57

1 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1

Аналіз можливостей та областей використання методу скінчених елементів. Етапи скінчено-елементного аналізу

1.1 Мета роботи

Ознайомлення з можливостями та областями використання методу скінчено-елементного аналізу. Засвоєння послідовності етапів скінчено-елементного аналізу.

1.2 Загальні відомості

Основною задачею інженера являється проектування та розрахунок різноманітних конструкцій. Це вимагає від нього знання багатьох предметів в різних сферах, старанності, уважності та великого запасу часу. Сучасні програми значно полегшують роботу та дозволяють робити розрахунки значно швидше та якісніше. Також вони візуалізують процес прикладання зусиль, моментів, середовищ та показують, що буде з конструкцією, деталлю через той чи інший проміжок часу.

На даний час існує багато систем комп'ютерного розрахунку, але їх можна виділити в дві групи: CAD (Computer – Aided Design) та CAE (Computer – Aided Engineering). CAE-системи призначені для моделювання і аналізу різноманітних фізичних процесів, таких як навантаження балки, руйнування конструкції, протягів повітря в вентиляційних шахтах і т. д. Більшість сучасних CAE-систем заснована на повних математичних моделях, що представляють собою системи рівнянь в частинних похідних, які вирішуються за допомогою методів скінчених різниць, скінчених обсягів і скінчених елементів, зокрема Ansys Mechanical APDL [1] (під час практичних занять використовується ліцензійна версія 4.0).

Основні етапи скінчено-елементного аналізу:

- 1) **Preferences** – вказує тип розрахунку (рис. 1.1).

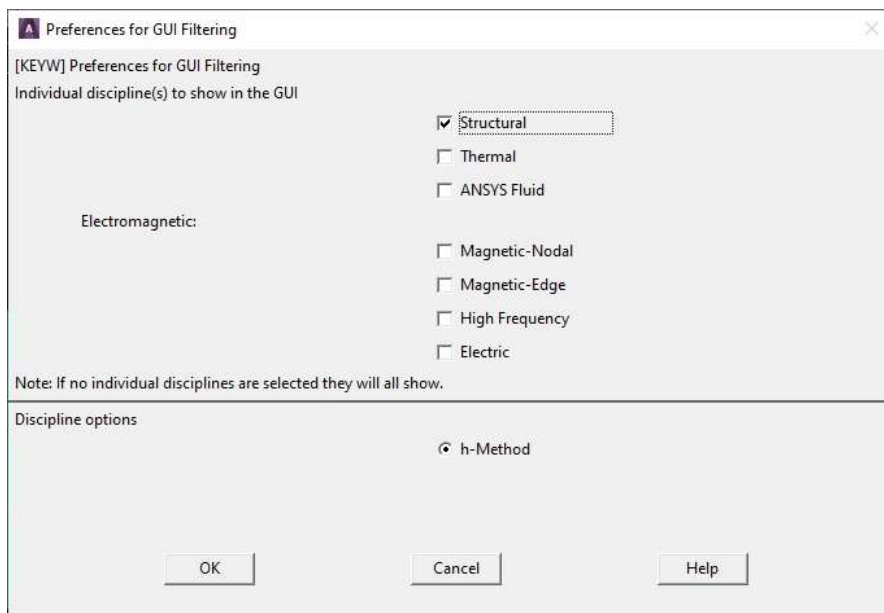


Рисунок 1.1 – Структура розділу головного меню Preferences

2) **Preprocessor** – на стадії препроцесорної підготовки виконується вибір типу розрахунків, побудова моделі й додаток навантажень (включаючи й граничні умови). Тут задаються необхідні для розв'язку вихідні дані. Користувач вибирає координатні системи й типи скінчених елементів, указує пружні постійні й фізико-механічні властивості матеріалу, будує тверду модель і сітку скінчених елементів, виконує необхідні дії з вузлами й елементами сітки, задає рівняння зв'язку й обмеження. Можна також використовувати модуль статистичного обліку для оцінки очікуваних розмірів файлів і витрат ресурсів пам'яті (рис.1.2).

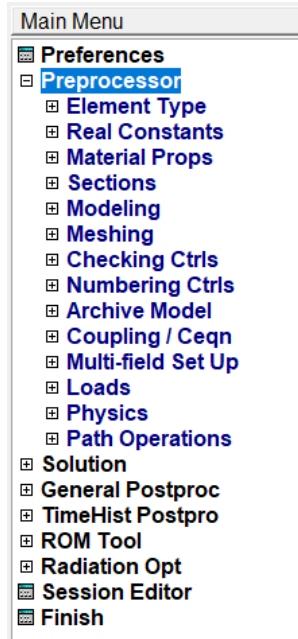


Рисунок 1.2 – Структура розділу головного меню Preprocessor

3) **Solution** – після того, як при препроцесорній підготовці побудована розрахункова модель, можна переходити до стадії розв'язку завдання. Цей етап містить у собі завдання виду аналізу і його опцій, навантажень, кроку розв'язку й закінчується запуском на рахунок скінчено-елементного завдання (рис. 1.3).

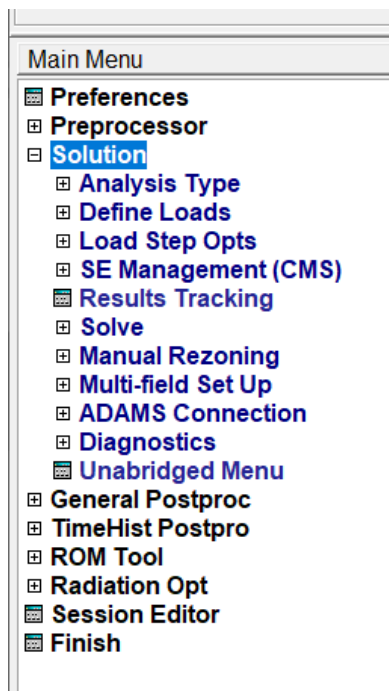


Рисунок 1.3 – Структура розділу головного меню Solution

4) **General Postproc** – у програмі ANSYS стадія постпроцесорної обробки іде за стадіями препроцесорної підготовки й одержання розв'язку. За допомогою постпроцесорних засобів програми є можливість звернутися до результатів розв'язку й інтерпретувати їх потрібним образом. Результати рішення включають значення переміщень, температур, напруг, деформацій, швидкостей і теплових потоків. Підсумком роботи програми на постпроцесорній стадії є графічне й (або) табличне подання результатів. Графічне зображення може бути виведене на монітор в інтерактивному режимі під час постпроцесорної обробки або перетворене у тверду копію (рис. 1.4) [3].



Рисунок 1.4 – Структура розділу головного меню General Postproc

1.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Перерахуйте основні задачі, які вирішуються за допомогою ANSYS?
2. Перелічіть основні розділи головного меню ANSYS.
3. Перерахуйте етапи виконання розрахунків в ANSYS.
4. Назвіть призначення основних розділів головного меню.

5. Перерахуйте найбільш часто використовувані команди панелі інструментів.

6. Назвіть призначення (можливості) основних команд панелі інструментів.

7. Вкажіть основні вимоги до розташування розрахункових файлів ANSYS та їх назви.

1.4 Вказівки з техніки безпеки

1. До практичних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці і пожежної безпеки.

2. Забороняється включати електричні прилади без дозволу завідувача лабораторією чи викладача.

3. У випадку пожежі чи поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці і пожежної безпеки.

1.5 Порядок проведення роботи

1. Відкрити файл в Mechanical APDL Product Launcher (розташування та назву файлу вказує викладач).

2. За допомогою викладача ознайомитися з основними розділами основного меню (Main Menu) (рис. 1.5).

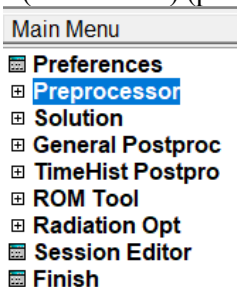


Рисунок 1.5 – Основні розділи головного меню

3. Розрахувати задану модель(Solution – Solve – Current LS).
4. Вивести результати за допомогою General Postproc.
5. По завданню викладача підготувати файл для звіту та зберегти файл із розрахунком.

1.6 Зміст звіту

Мета і методика виконання практичної роботи. Короткі теоретичні відомості. Порядок дій (кроків) для отримання результатів розрахунку. Роздрукований файл з результатами (при наявності можливості). Висновки по роботі.

2 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

Розробка геометричної моделі виробу. Моделювання в препроцесорі

2.1 Мета роботи

Засвоєння способів розробки скінчено-елементної моделі об'ємної деталі чи зварної конструкції.

2.2 Загальні відомості

2.2.1 Основні інструменти розділу головного меню **Modeling**

Preprocessor – на стадії препроцесорної підготовки виконується вибір типу розрахунків, **побудова моделі** й додаток навантажень (включаючи й граничні умови). Тут задаються необхідні для розв'язку вихідні дані. Користувач вибирає координатні системи й типи скінчених елементів, указує пружні постійні й фізико-механічні властивості матеріалу, будує тверду модель і сітку скінчених елементів, виконує необхідні дії з вузлами й елементами сітки, задає рівняння зв'язку й обмеження. Можна також використовувати модуль статистичного обліку для оцінки очікуваних розмірів файлів і витрат ресурсів пам'яті.

Розділ головного меню **Modeling** потрібен для роботи з геометричною моделлю: побудова, видалення, копіювання, переміщення.

Create (з англ. створити) – команда для створення/побудови елементів:

- Keypoints (з англ. точки) – дозволяє створити точки на робочому столі, лінії, вузлі;
- Lines (з англ. лінії) – побудова ліній (Lines), кола (Arcs), крива (Splines);
- Areas (з англ. площа) – створення різних геометричних площин: круг, прямокутник, багатокутник, довільна площа (Arbitrary);

– Volumes (з англ. об'єми) – побудова об'ємних фігур: блок, циліндр, призма, сфера, конус, усічена піраміда;

Move (з англ. переміщення) – команда створена для переміщення елементів;

Copy (з англ. копіювати) – дозволяє копіювати виділені елементи;

Delete (з англ. видалити) – видаляє виділені елементи.

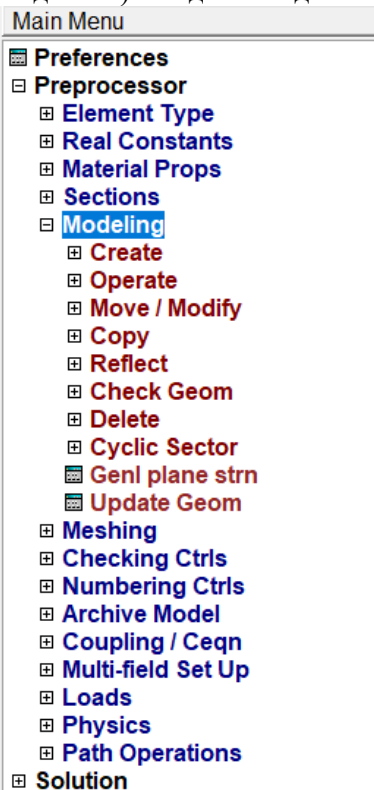


Рисунок 2.1 – Підрозділи розділу головного меню Modeling

2.2.2 Елемент Plot

При роботі з різними проєктами інколи постає завдання розглянути конструкцію в іншому вигляді. Так елемент Plot (рис.2.2)

дозволяє показати точки, площини, об'єми. Зобразити прикладення сил та моментів та ін.

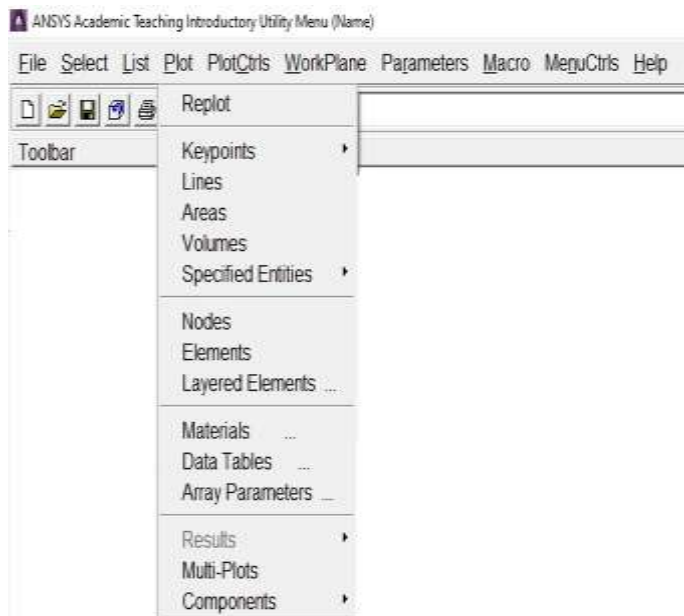


Рисунок 2.2 – Розташування елементу Plot

2.2.3 Елемент PlotCtrls

В ході побудови об'ємної моделі часто буває так, що через нагромадження великою кількістю елементів конструкції, проєкт важко оцінити. Тому для упорядкування та налаштування креслення використовують елемент PlotCtrls (рис. 2.3).

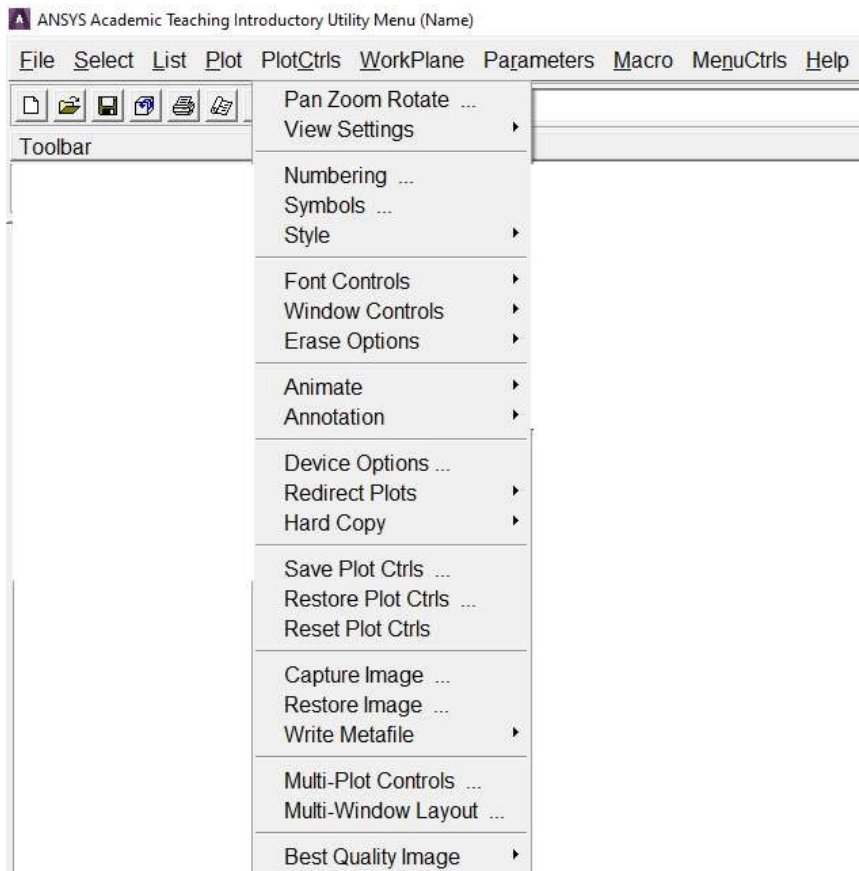


Рисунок 2.3 – Розташування елементу PlotCtrls

За допомогою пункту Numbering користувач може пронумерувати основні елементи: точки, лінії, площини та ін. (рис. 2.4).

При відкритті Symbols, у новому вікні можна вказати різні символи для відображення різних навантажень у програмі: прикладення сили, тиску, моментів, кольорові фільтри та ін. (рис. 2.5).

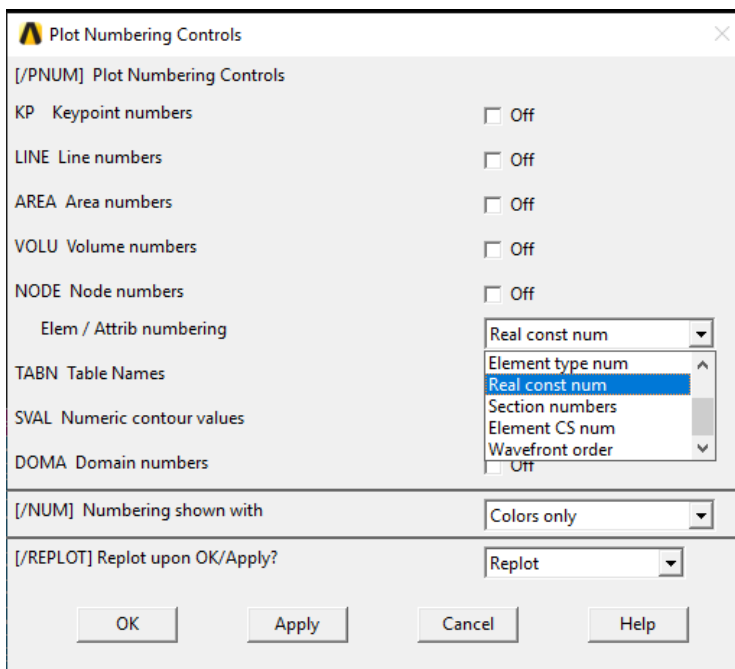


Рисунок 2.4 – Структура пункту Numbering

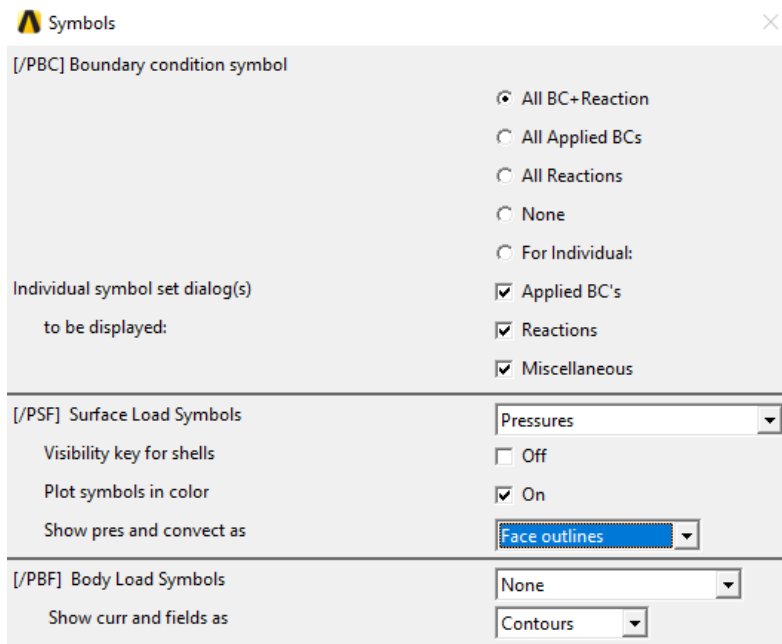


Рисунок 2.5 – Структура пункту Symbols

2.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Наведіть ієрархію (блок-схему) структурних складових, які приймають участь при створенні тривимірних моделей (точок, ліній, поверхонь, об'ємів).

2. Назвіть основні переваги та недоліки відображення геометричної моделі за допомогою окремих структурних складових.

3. Вкажіть, в якому розділі головного меню розташовуються інструменти для побудови геометричної моделі?

4. Перелічіть операції, які можливо проводити над об'єктами при створенні геометричної тривимірної моделі?

5. Вкажіть, за якими ознаками можна нумерувати та відображати окремі структурні складові геометричної моделі?

6. Опишіть, в яких випадках є можливість будувати

геометричну модель лише за допомогою ліній?

2.4 Вказівки з техніки безпеки

1. До практичних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці і пожежної безпеки.

2. Забороняється включати електричні прилади без дозволу завідувача лабораторією чи викладача.

3. У випадку пожежі чи поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці і пожежної безпеки.

2.5 Порядок проведення роботи

1. Відкрити лаунчер Mechanical APDL Product Launcher «...» (всі назви вказувати латинськими символами).

2. За допомогою викладача ознайомитися з основними розділами основного меню (Main Menu).

3. Створити розрахункову модель (Preprocessor – Modeling – Create...) згідно із завданням (номер ескізу - остання цифра номеру залікової книжки (Додаток 1), номер рядка із розмірами – передостання цифра номеру залікової книжки (Додаток 2)).

4. По завданню викладача показати готову модель за допомогою ліній (поверхонь, точок).

5. По завданню викладача вибрати конкретні поверхні, лінії, поверхні, що контактують з обраними лініями.

6. По завданню викладача підготувати файл для звіту та зберегти файл із побудованою моделлю.

2.6 Зміст звіту

Мета і методика виконання практичної роботи. Короткі

теоретичні відомості. Послідовність побудови геометричної моделі.
Роздруківка файлу із зображенням моделі (при наявності можливості).
Висновки по роботі.

3 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3

Етапи формування фізичної моделі матеріалу

3.1 Мета роботи

Ознайомитися з основними способами врахування властивостей матеріалів при розрахунках та шляхами їх моделювання.

3.2 Загальні відомості

При розрахунку різних проєктів у системі CAE постановка задачі вимагає задання властивостей матеріалу. У залежності від типу задачі, властивості матеріалів можуть бути: лінійними (напруження пропорційні деформаціям) або нелінійними (напруження не пропорційні навантаженням); ізотропними (матеріал проявляє одні й ті самі механічні властивості у всіх напрямках), анізотропними (матеріал проявляє різні механічні властивості у двох напрямках), ортотропними (симетричні відносно трьох ортогональних площин); температурозалежними або не залежними.

Інтерфейс для задання моделі матеріалу відкривається наступним чином: Main Menu – Preprocessor – Material Props – Material Models (рис.3.1).

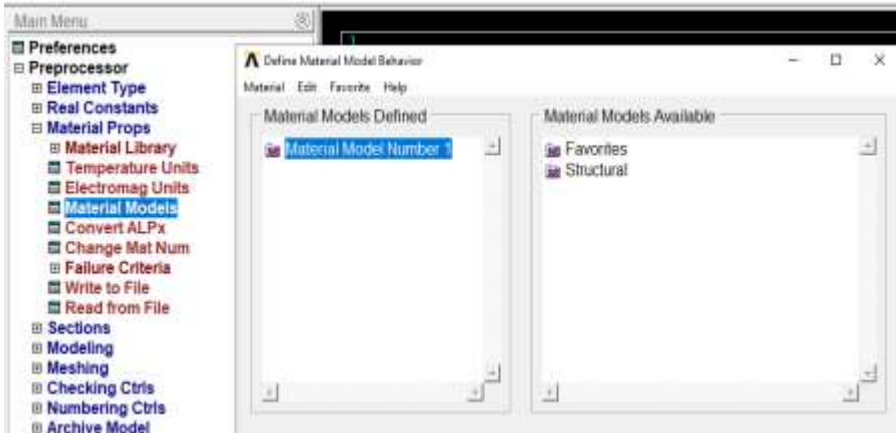


Рисунок 3.1 – Інтерфейс для задання моделі матеріалу

Основні лінійні властивості матеріалу для ANSYS MECHANICAL: модуль пружності (EX) та коефіцієнт Пуассона (PRXY) (рис. 3.2). Значення вводяться в експоненціальній формі в МПа.

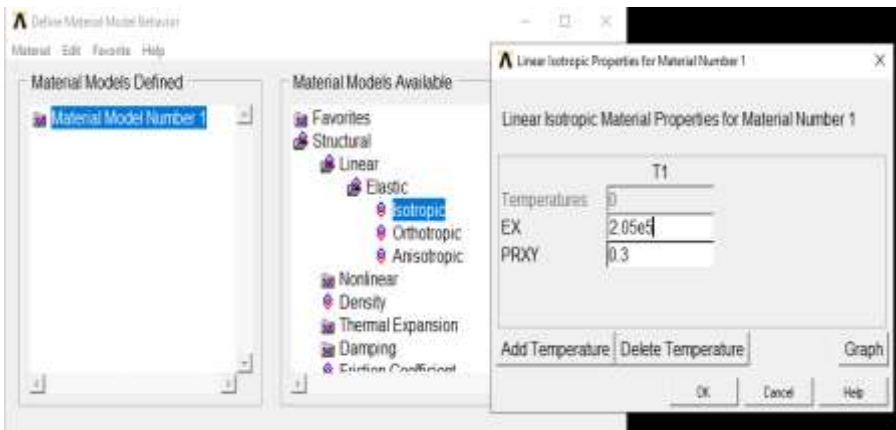


Рисунок 3.2 – Задання лінійних властивостей матеріалу

Основні нелінійні властивості матеріалу для ANSYS MECHANICAL: межа текучості (рис.3.3). Значення вводяться в МПа.

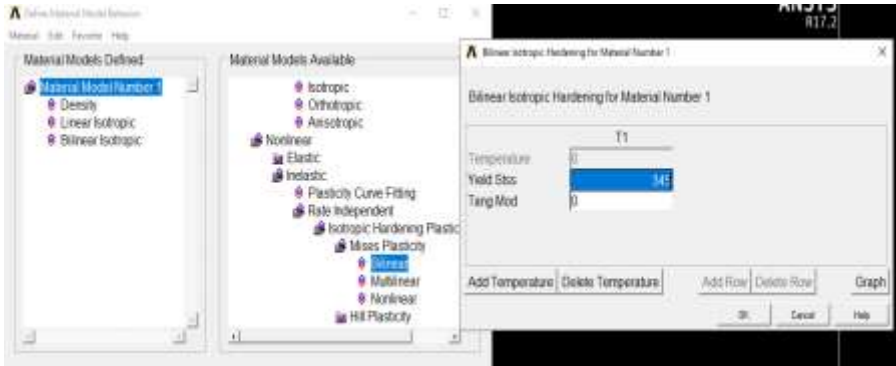


Рисунок 3.3– Завдання нелінійних властивостей матеріалу

Також при вирішенні задачі необхідно враховувати власну вагу конструкції, тому обов'язково задають щільність матеріалу (рис.3.4).

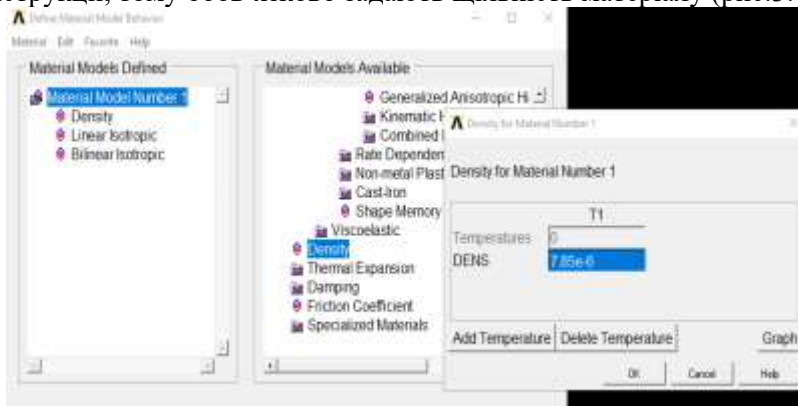


Рисунок 3.4– Завдання щільності матеріалу

Якщо постановка задачі вимагає створення декількох, різних по властивостям, матеріалів, то необхідно виконати додавання нової моделі: Material - New Model (рис.3.5).

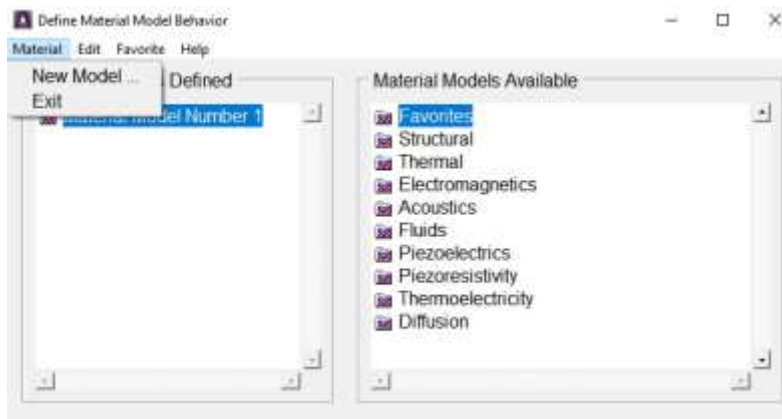


Рисунок 3.5 – Створення нової моделі матеріалу

Для того, щоб присвоїти кожному елементу конструкції відповідну модель матеріалу необхідно зайти в розділ головного меню Main Menu – Preprocessor – Meshing – Mesh Attributes. Обрати відповідну поверхню (лінію, об'єм). Призначити для обраної деталі номер типу матеріалу (рис. 3.6). Повторити для всіх деталей.

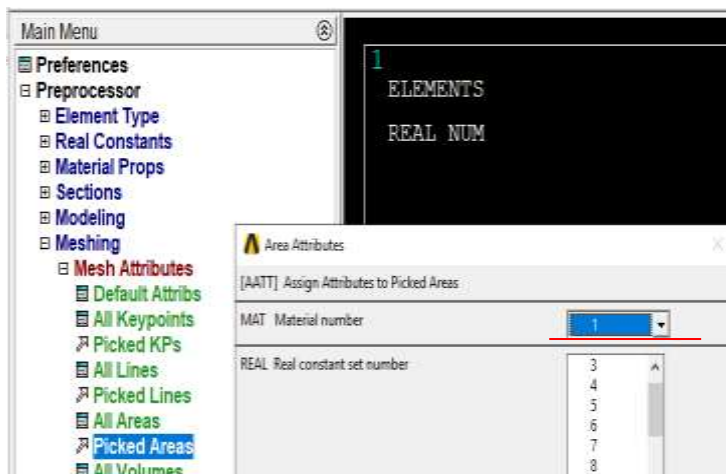


Рисунок 3.6 – Призначення моделі матеріалу конкретній частині конструкції

Для того, щоб переконатися, що кожній частині конструкції присвоєна вірна модель матеріалу, необхідно зайти в розділ PlotCtrls – Numbering на панелі інструментів (рис. 3.7).

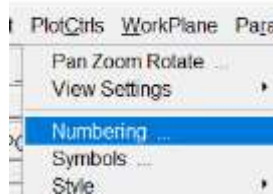


Рисунок 3.7 – Розташування розділу Numbering

Обрати нумерацію за типом матеріалу та виставити опцію нумерування за кольором та номером моделі матеріалу (рис.3.8).

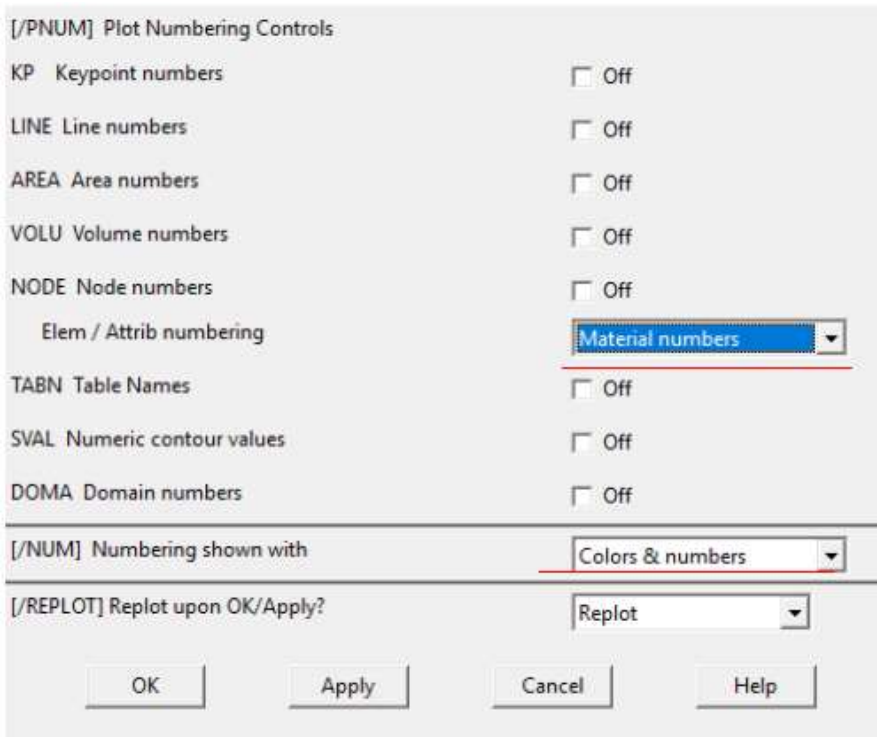


Рисунок 3.8 – Налаштування нумерації елементів конструкції за типом матеріалу

3.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Перерахуйте основні фізико - механічні характеристики матеріалу, з якого виготовлена конструкція для ANSYS MECHANICAL.
2. Наведіть приклад, в якому вигляді можна записати великі значення фізико - механічні характеристики матеріалу?
3. Вкажіть, з якою метою задають щільність матеріалу?
4. Назвіть одиниці виміру, в яких необхідно задавати властивості матеріалу в ANSYS MECHANICAL?
5. Поясніть, яку фізико - механічну характеристику матеріалу описує коефіцієнт Пуассона?
6. В якому випадку можна не враховувати щільність матеріалу?

3.4 Вказівки з техніки безпеки

1. До практичних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці і пожежної безпеки.
2. Забороняється включати електричні прилади без дозволу завідувача лабораторією чи викладача.
3. У випадку пожежі чи поразки електричним струмом, студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці і пожежної безпеки.

3.5 Порядок проведення роботи

1. Відкрити файл в лаунчер Mechanical APDL Product Launcher, створений на попередній практичній роботі (всі назви вказувати латинськими символами).
2. Відобразити побудовану на попередньому практичному занятті геометричну тривимірну модель.
3. Зайти в розділ головного меню Main Menu – Preprocessor –

Material Properties – Material Models (рис.3.9).

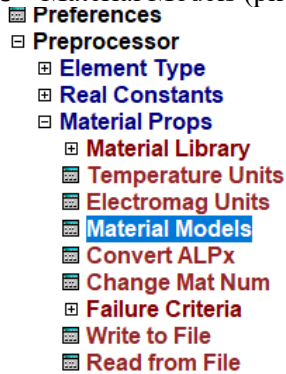


Рисунок 3.9 – Розділ головного меню Material Properties

4. Ввести у відповідні вікна лінійні та нелінійні властивості матеріалу, з якого буде виготовлена конструкція (номер варіанту – остання цифра залікової книжки, Додаток 3), щільність матеріалу.

5. Зберегти зміни у файлі.

3.6 Зміст звіту

Мета і методика виконання практичної роботи. Короткі теоретичні відомості. Послідовність задання властивостей матеріалу. Роздруковка розділу файлу із властивостями матеріалу (при наявності можливості). Висновки по роботі.

4 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4

Розробка скінчено-елементної моделі. Характеристика скінчених елементів різних типів. Управління якістю сітки

4.1 Мета роботи

Ознайомитися з основними типами скінчених елементів та їх призначенням, особливостями та доцільністю використання.

4.2 Загальні відомості

Побудована модель ділиться на скінчені елементи досить простої форми. Є кілька типових форм (таблиця 4.1) скінчених елементів, в яких поле зсувів визначається по зсувах вузлів за допомогою деяких інтерполяційних функцій. За обчисленими, таким чином, зсувів, визначаються поля напружень і деформацій. Найбільш трудомісткий етап вирішення завдань за допомогою МКЕ – це створення скінчено-елементної моделі на стадії препроцесорної підготовки (preprocessor), так як автоматична побудова сітки елементів не гарантує від появи помилок.

Типом елемента визначається:

- Ступені свободи елемента (які в свою чергу впливають і на тип аналізу механічний, тепловий, магнітний, електричний);
- модель об'єкта - одномірна, двовимірна або тривимірна;
- балковий елемент BEAM4, наприклад, має 6 ступенів свободи (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ) у вузлі і використовується для моделювання стержневих конструкцій в 3-х вимірному просторі. Плоский елемент PLANE77 має в якості ступенів свободи вузлові температури і може використовуватися для моделювання тільки плоских об'єктів [4].

Одним з найбільш важливих етапів в скінчено-елементному аналізі є побудова на моделі сітки з скінчених елементів, тобто поділ

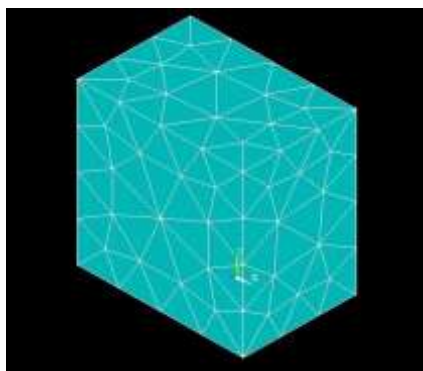
всієї моделі на маленькі шматочки (скінчені елементи), пов'язані між собою у вузлах.

Таблиця 4.1 – Типи скінчених елементів

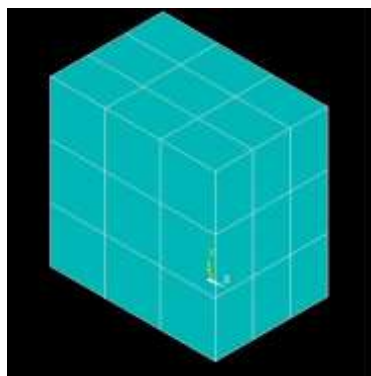
Тип елемента	Моделювання
LINK	Моделювання фермових конструкцій, тросів, канатів і т.д.
BEAM	Моделювання стержневих конструкцій
SHELL	Моделювання тонкостінних конструкцій
SOLID	Моделювання тривимірних об'єктів
PIPE	Моделювання стержневих систем - труба + рідина
MASS	Моделювання абсолютно твердого тіла і матеріальної точки
CONTACT	Моделювання умов контакту

У програмному комплексі ANSYS є два основні методи побудови сітки: побудова довільної сітки (рис. 4.1 а) і побудова впорядкованої сітки (рис. 4.1 б).

Довільна сітка будується автоматично, при цьому сусідні елементи можуть істотно відрізнятися за розмірами. Упорядкована сітка будується шляхом ділення геометричних елементів моделі на деяке число частин.



а



б

Рисунок 4.1 – Види сітки скінчених елементів

В автоматично побудованих сітках з великим числом елементів число вузлів переважає над числом елементів. Відношення між вузлами і елементами, приблизно, 2:1 для плоских довільних сіток і 6:1 для довільних тривимірних сіток з чотиригранними елементами.

Практика розрахунків із застосуванням МКЕ дозволяє дати наступні рекомендації (рис. 4.2): 1) лінійні елементи вимагають більш частієї сітки, ніж квадратичні елементи (з одним проміжним вузлом) або кубічний (з двома проміжними вузлами); 2) упорядкована сітка (б) є більш кращою, ніж довільна сітка (а); 3) прямокутна сітка з 4 вузлами (в) більш краща, ніж сітка з трикутними елементами (б); 4) сітка трикутних елементів з проміжними вузлами (г) має, принаймні, ту ж саму точність, що і сітка прямокутних елементів з 4 вузлами (в); 5) прямокутна сітка з 8 вузлами (д) є більш кращою, ніж сітка трикутних елементів з проміжними вузлами (г), незважаючи на більший розмір прямокутних елементів; 6) апроксимація зсувів кубічним поліномом (е) не вимагає більш дрібної сітки [1].

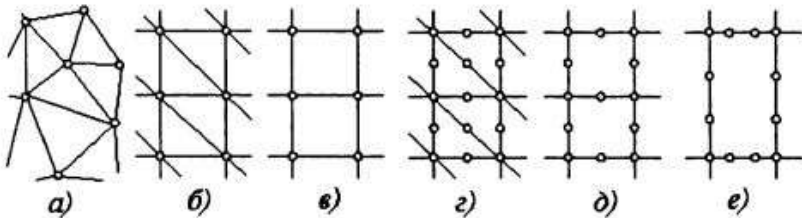


Рисунок 4.2 – Види вузлів при різних видах сітки скінчених елементів

4.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Назвіть, які типи скінчених елементів доступні в програмі ANSYS.
2. Опишіть призначення плоских (двовірних) скінчених елементів.
3. Опишіть призначення тривимірних скінчених елементів.
4. Перерахуйте основні шляхи накопичення похибок результатів при комп'ютерному моделюванні зварних конструкцій.

5. Вкажіть основні критерії вибору доцільності використання сітки з меншим розміром скінчених елементів при розрахунку математичної моделі.

6. Назвіть основні переваги та недоліки сітки з елементами великого розміру для розрахунку моделі.

4.4 Вказівки з техніки безпеки

1. До практичних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці і пожежної безпеки.

2. Забороняється включати електричні прилади без дозволу завідувача лабораторією чи викладача.

3. У випадку пожежі чи поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці і пожежної безпеки.

4.5 Порядок проведення роботи

1. Відкрити файл в лаунчер Mechanical APDL Product Launcher, створений на попередній практичній роботі (всі назви вказувати латинськими символами).

2. Відобразити побудовану на попередньому практичному занятті геометричну тримірну модель.

3. Зайти в розділ головного меню Main Menu – Preprocessor – Element Type – Add/Edit/Delete – Add. Обрати тип кінцевого елемента у відповідності із типом конструкції (рис. 4.3).

4. Задати реальні константи відповідним елементам конструкції для врахування фізичної товщини при розрахунку. Для цього в командному рядку ввести команду $r,2,8$, де r – команда для призначення реальної константи, 2 – порядковий номер константи, 8 – фізична товщина елемента в мм (рис. 4.4).



Рисунок 4.3 – Інтерфейс розділу головного меню Element Type



Рисунок 4.4 – Задання реальних констант

5. Присвоїти кожному елементу моделі відповідну реальну константу, модель матеріалу та тип кінцевого елемента. Для цього зайти в розділ головного меню Main Menu - Preprocessor - Meshing – Mesh Attributes. Обрати відповідну поверхню (лінію, об'єм). Призначити для обраної деталі номер типу матеріалу, номер реальної константи та номер типу кінцевого елемента (рис.4.5). Повторити для всіх деталей.

Area Attributes

[AATT] Assign Attributes to Picked Areas

MAT Material number 1

REAL Real constant set number 3

TYPE Element type number 1 SHELL181

ESYS Element coordinate sys 0

SECT Element section None defined

OK Apply Cancel Help

Рисунок 4.5 – Призначення атрибутів

6. Розбити тримірну модель на елементи. Для цього зайти в розділ головного меню Main Menu – Preprocessor – Meshing – MeshTool – Mesh. (Для вибору розміру скінчених елементів проконсультуватися з викладачем). По завданню викладача змінити форму та розміри скінчених елементів (рис.4.6). Зробити висновки по якості сітки після змін.

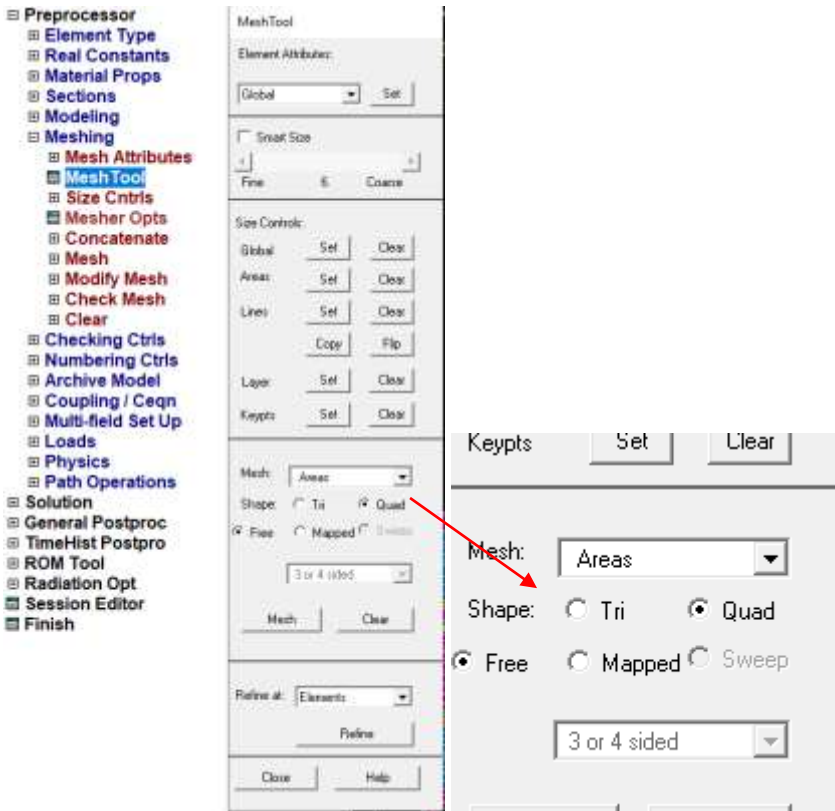


Рисунок 4.6 – Інтерфейс розділу головного меню Meshing

7. Зберегти зміни у файлі.

4.6 Зміст звіту

Мета і методика виконання практичної роботи. Короткі теоретичні відомості. Послідовність дій (кроків) для задання параметрів сітки скінчених елементів. Роздруковка файлу з отриманою скінчено-елементною моделлю (при наявності можливості). Висновки по роботі.

5 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5

Види граничних умов. Визначення переміщень. Завдання навантажень

5.1 Мета роботи

Ознайомитися з послідовністю прикладення граничних умов та навантажень. Засвоїти основні принципи вибору граничних умов та найбільш реалістичне відтворення дії навантажень.

5.2 Загальні відомості

Під навантаженнями розуміють як зовнішні, так і внутрішні зусилля, граничні умови у вигляді обмежень на переміщення.

У програмі ANSYS MECHANICAL шлях до прикладення навантажень знаходиться в розділі головного меню (Main menu – Preprocessor – Loads – Define Loads – Apply (рис.5.1).



Рисунок 5.1 – Розташування розділу головного меню Loads

Навантаження розділені на наступні категорії:

– обмеження ступенів свободи по всім осям (x, y, z) – лінійні, так і в конкретній площині – обертанні відносно будь-якої з вісей (рис.5.2).



Рисунок 5.2 – Задання ступенів свободи

– зосереджені сили і моменти сил (рис.5.3);



Рисунок 5.3 – Прикладення сил та моментів

– поверхневі навантаження (тиск) (рис.5.4);

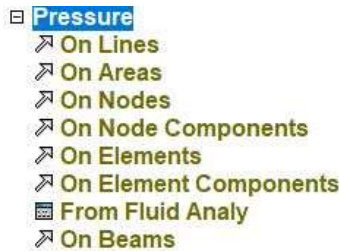


Рисунок 5.4 – Прикладення поверхневих сил

– об'ємні сили (рис. 5.5);

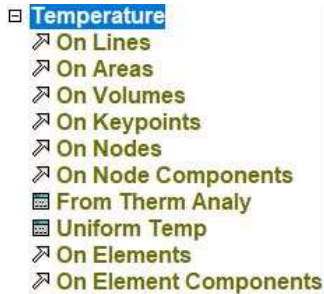


Рисунок 5.5 – Прикладення об'ємних сил

– інерційні навантаження, зокрема гравітація (рис. 5.6).

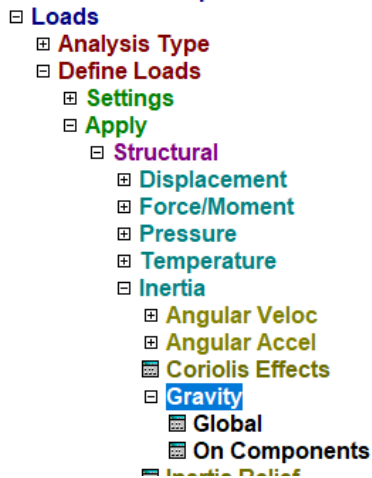


Рисунок 5.6 – Прикладення інерційних сил

Як можна побачити з вище зазначених рисунків, граничні умови задаються по лініям, точкам, вузлам, поверхням, об'ємам. Всі навантаження необхідно прикладати в одиницях, прийнятих в міжнародній системі вимірювань.

5.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1 Перерахуйте граничні умови в переміщеннях відносно координатних вісей.

2 Поясніть, чому необхідно враховувати силу гравітації при розрахунках зварних конструкцій.

3 Наведіть приклад, в якому випадку дію сили гравітації можна не враховувати при розрахунках.

4 Поясніть, як впливає правильність визначення ступенів свободи моделі конструкції на точність розрахунку.

5 Вкажіть випадок доцільності прикладення симетричних граничних умов.

6 Поясніть необхідність перевірки працездатності моделі до прикладення навантажень.

5.4 Вказівки з техніки безпеки

1 До практичних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці і пожежної безпеки.

2 Забороняється включати електричні прилади без дозволу завідувача лабораторією чи викладача.

3 У випадку пожежі чи поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці і пожежної безпеки.

5.5 Порядок проведення роботи

1. Відкрити файл в Mechanical APDL Product Launcher, створений на попередніх практичних роботах (всі назви вказувати латинськими символами).

2. Відобразити побудовану на попередньому практичному занятті геометричну тримірну модель.

3. Зайти в розділ головного меню Main Menu - Preprocessor – Loads – Define Loads – Apply – Structural (рис. 5.7).

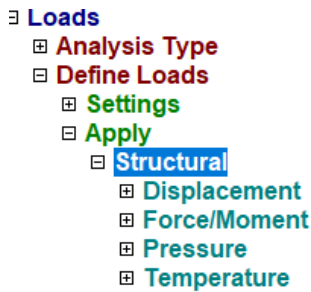


Рисунок 5.7 – Розташування розділу головного меню Loads

4. Згідно з індивідуальним завданням прикласти навантаження (силу, тиск) (рис.5.8).

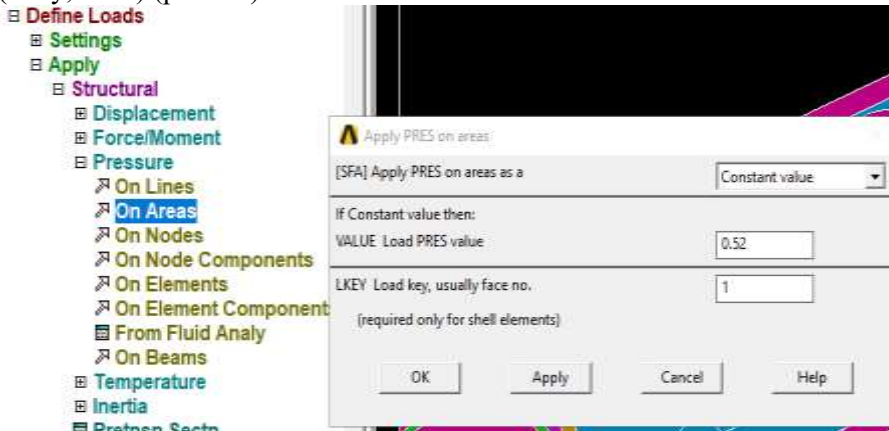


Рисунок 5.8 – Прикладення тиску на поверхню

5. Прикласти граничні умови (закріпити від переміщень) (рис. 5.9).

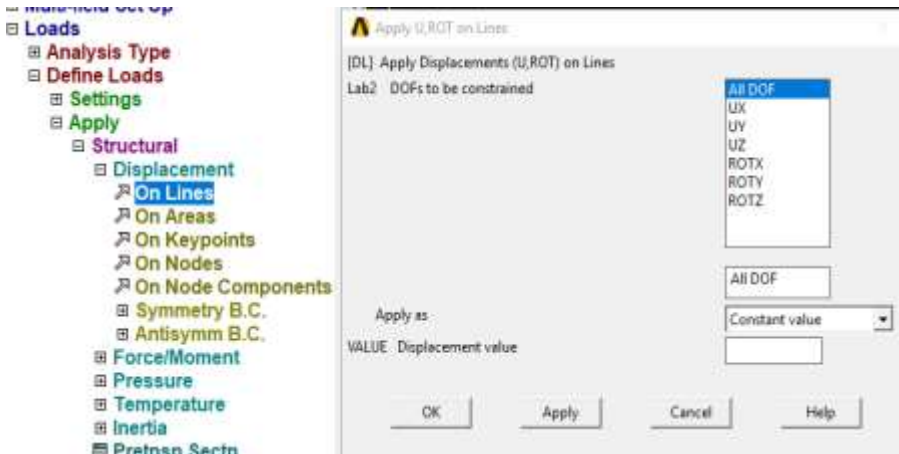


Рисунок 5.9 – Прикладення граничних умов

6. Задати дію гравітації на конструкцію (рис. 5.10).

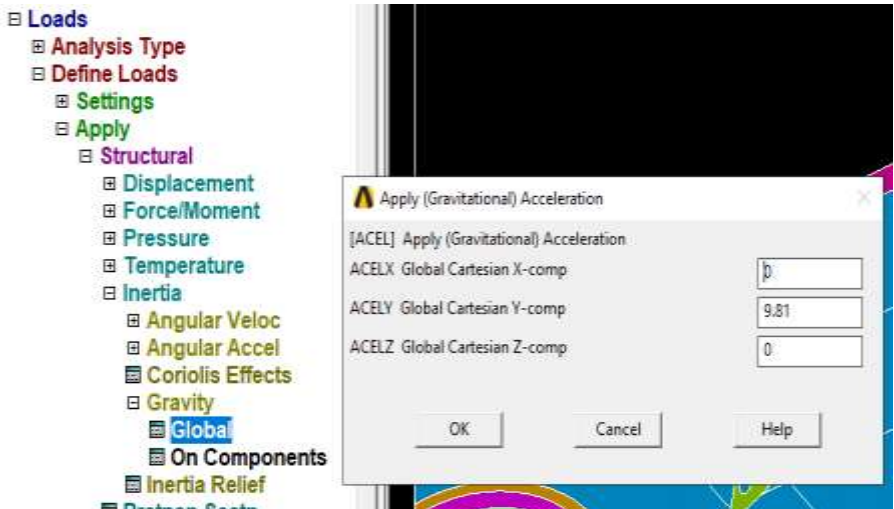


Рисунок 5.10 – Прикладення гравітації

7. Зберегти зміни у файлі.

5.6 Зміст звіту

Мета і методика виконання практичної роботи. Короткі теоретичні відомості. Послідовність кроків для прикладення навантажень та граничних умов. Роздруківка файлу із відображенням прикладених навантажень та граничних умов (при наявності можливості). Висновки по роботі.

6 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6

Вибір типу розрахунку (вирішувача). Аналіз напружено-деформованого стану

6.1 Мета роботи

Ознайомлення з існуючими типами розрахунку (вирішувача). Засвоєння основних принципів вибору типу вирішувача. Засвоєння основних кроків аналізу напружено-деформованого стану.

6.2 Загальні відомості

Наступним кроком, після препроцесорних операцій, є операція рішення (Solve). Ця стадія включає в себе вибір типу вирішувача, його опцій, кроку рішення та запуску задачі.

Програма ANSYS пропонує наступні типи аналізу (рис. 6.1):

Static – статичний аналіз. Використовується для визначення переміщень, напруг, деформацій і зусиль, що виникають в конструкції або її складової частини при дії навантажень, що не супроводжуються процесами розсіювання енергії або появою істотних інерційних ефектів. Передбачається сталість навантаження і відгуку системи, тобто можна знехтувати дуже повільними змінами цих параметрів у часі.

Modal – модальний аналіз – аналіз конструкції на власні частоти та форми, з його допомогою визначаються власні частоти і форми коливань. Використовується тільки для задач механіки твердого тіла, що деформується.

Harmonic – Динамічний аналіз. Використовується для задач механіки твердого тіла, що деформується, механіки рідини і газу та електромагнітного аналізу, для визначення реакції конструкції (у вигляді переміщень, деформацій, напружень і зусиль) на дію довільного навантаження, мінливого в часі таким чином, що доводиться враховувати інерційні ефекти і процеси розсіювання енергії.

Transient – нестационарний аналіз. Використовується для аналізу перехідних процесів.

Spectrum – спектральний аналіз. Необхідне попереднє проведення модального аналізу. Використовується тільки для задач механіки твердого тіла, що деформується.

Eigen buckling – втрата стійкості. Використовується для визначення критичних навантажень і форм втрати стійкості в лінійній постановці. Попередньо має бути проведено стаціонарний аналіз з обчисленням попередньо-напруженого стану. Використовується тільки для задач механіки твердого тіла, що деформується.

Substructuring – аналіз із застосуванням методу підконструкцій. Використовується для вирішення всіх типів завдань.

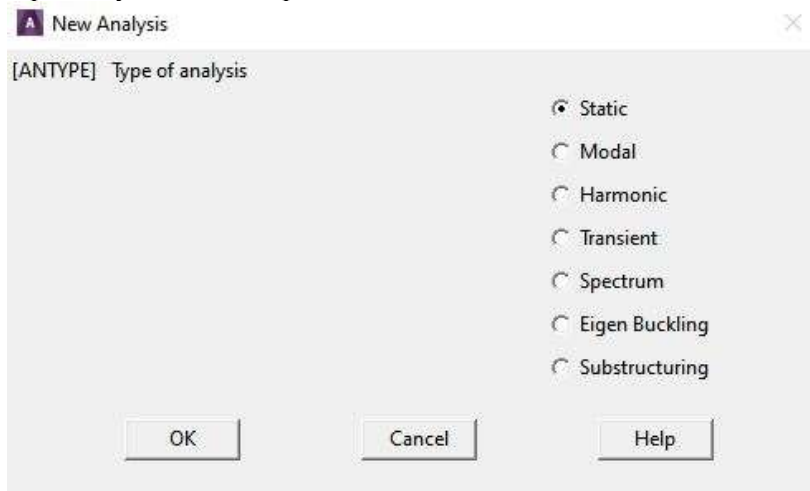


Рисунок 6.1 – Типи аналізу в ANSYS MECHANICAL

Шлях для обрання типу аналізу:

Main Menu → Preprocessor → Loads → Analysis Type – New Analysis або Main Menu → Solve → Analysis Type- New Analysis.

Після обрання типу вирішувача необхідно зробити налаштування ходу рішення задачі (рис.6.2), де обирають масштаб переміщень, час завершення рішення задачі, кількість кроків та підкроків програми, а також частоту записування кроків рішення.

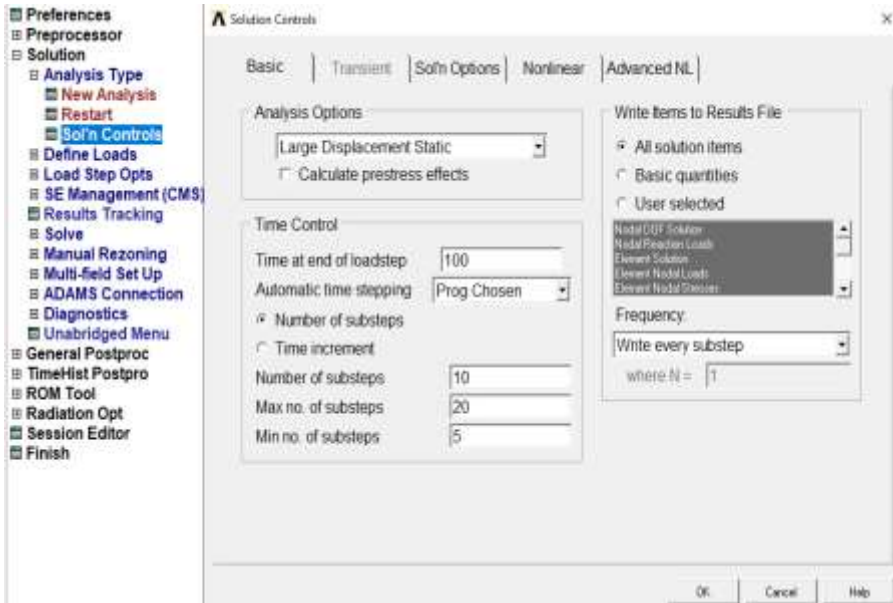


Рисунок 6.2 – Налаштування ходу рішення задачі

Після всіх вище описаних операцій (побудова моделі, визначення властивостей матеріалу, задання навантажень, постановка задачі) потрібно провести розрахунок проєкту - Main Menu → Solution → Solve → Current LS (рис.6.3).

- **Solution**
 - ⊕ **Analysis Type**
 - ⊕ **Define Loads**
 - ⊕ **Load Step Opts**
 - ⊕ **SE Management (CMS)**
 - ⊞ **Results Tracking**
 - **Solve**
 - ⊞ **Current LS**
 - ⊞ **From LS Files**
 - ⊕ **Manual Rezoning**
 - ⊕ **Diagnostics**
 - ⊞ **Unabridged Menu**

Рисунок 6.3 – Розташування розділу головного меню Solve

Окрім того, програма ANSYS має функцію кроку навантаження (Load Step). Вона дозволяє виконувати означувану кількість навантажень з кожним кроком. Наприклад на брус, при першому кроці, діє сила тяжіння, на другому кроці він піддається деформації стиснення, на третьому – деформації кручення (рис.6.4).



Рисунок 6.4 – Розташування розділу головного меню для задання кроків навантаження

Фінальним етапом розрахунку є аналіз деформованого тіла (General Postproc). Для виводу результатів на екран потрібно відкрити - General Postproc → Plot Results → Contour plot → Nodal Solution (рис.6.5).

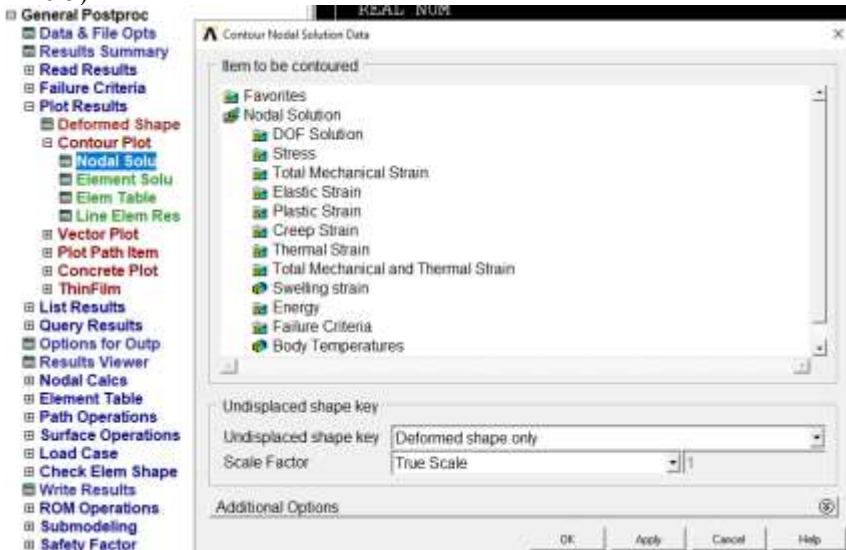


Рисунок 6.5 – Розташування розділу головного меню для аналізу результатів розрахунку

В залежності від того, що треба оцінити та проаналізувати, обирають відповідний підпункт меню (рис.6.6, 6.7).

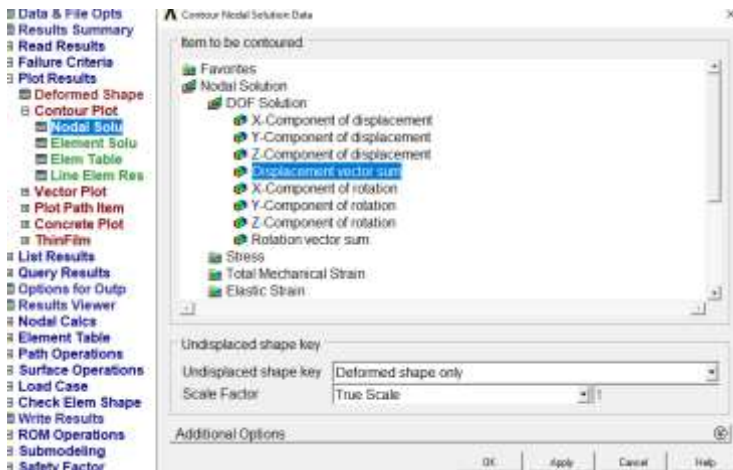


Рисунок 6.6 – Розташування розділу головного меню для аналізу переміщень

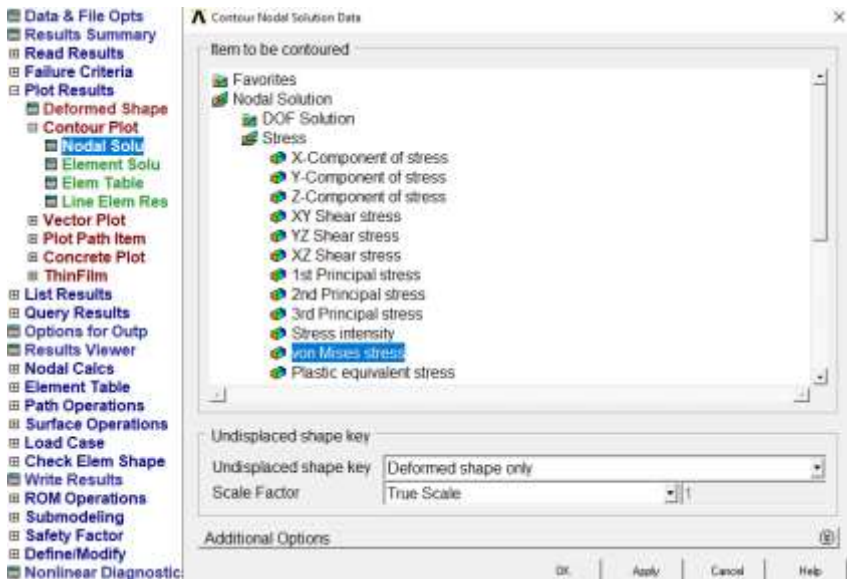


Рисунок 6.7 – Розташування розділу головного меню для аналізу напружень

6.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Перерахуйте основні задачі, які вирішуються за допомогою ANSYS?
2. Поясніть, з якою метою можна використовувати контактні задачі?
3. Назвіть призначення модального аналізу в ANSYS.
4. Вкажіть загальне призначення гармонійного аналізу в ANSYS.
5. Поясніть доцільність запису програмою кожного кроку рішення.
6. Наведіть приклад використання статичного розрахунку.

6.4 Вказівки з техніки безпеки

1. До практичних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці і пожежної безпеки.
2. Забороняється включати електричні прилади без дозволу завідувача лабораторією чи викладача.
3. У випадку пожежі чи поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці і пожежної безпеки.

6.5 Порядок проведення роботи

1. Відкрити файл в Mechanical APDL Product Launcher (розташування та назву файлу вказує викладач).
2. Згідно із завданням обрати тип вирішувача.
3. Провести налаштування перед розрахунком (проконсультувавшись із викладачем).
4. Запустити файл на розрахунок.
5. Проаналізувати отримані результати.

6. По завданню викладача підготувати файл для звіту та зберегти файл із розрахунком.

6.6 Зміст звіту

Мета і методика виконання практичної роботи. Короткі теоретичні відомості. Послідовність кроків для призначення типу вирішувача та налаштувань часу розрахунків. Висновки по роботі.

7 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7

Оцінка адекватності математичної моделі зварної конструкції. Оцінка якості сітки

7.1 Мета роботи

Засвоїти основні принципи оцінки адекватності отриманих результатів. Навчитися оцінювати вплив якості сітки скінчених елементів на точність отриманих результатів.

7.2 Загальні відомості

Після завершення розрахунку на екран виводять результат у вигляді кольорової ізошкали, де лініями одного кольору позначаються ділянки, на яких діють однакові напруження (рис.7.1) чи спостерігаються однакові переміщення (рис.7.2).

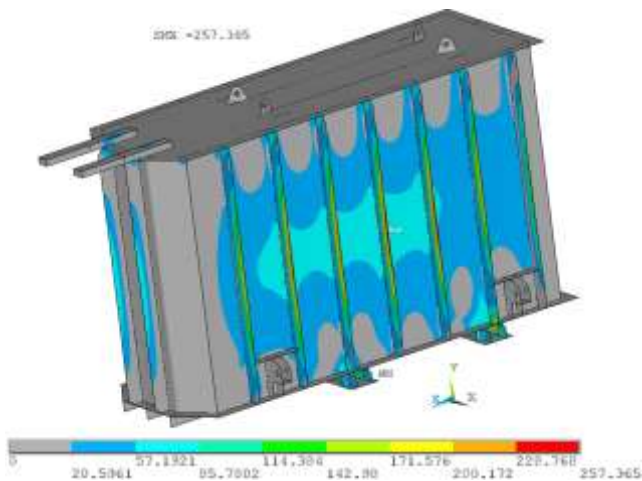


Рисунок 7.1 – Еквівалентні напруження при розрахунку на міцність, МПа

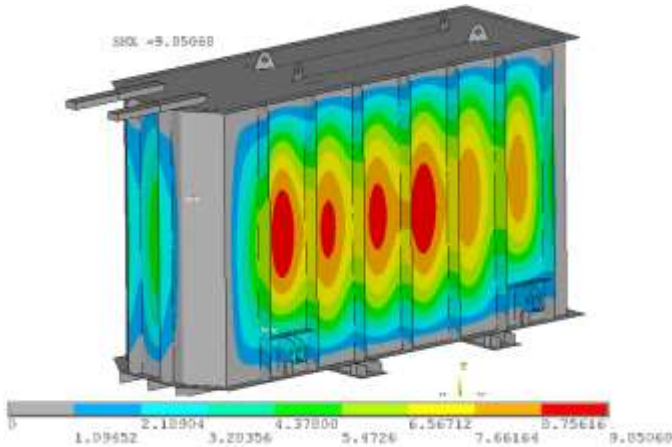


Рисунок 7.2 – Сумарні переміщення при розрахунку на міцність, МПа

Інколи для всебічної оцінки поведінки конструкції та матеріалу необхідно розглянути результати пошарово, встановивши відповідні опції.



Рисунок 7.3 – Розташування розділу для налаштування опцій виводу результатів на екран

Для оцінки точності результатів розрахунку необхідно враховувати якість сітки скінчених елементів. Елементи неправильної форми або розміру можуть накопичувати помилки, які спотворюють картину результатів (рис.7.4).

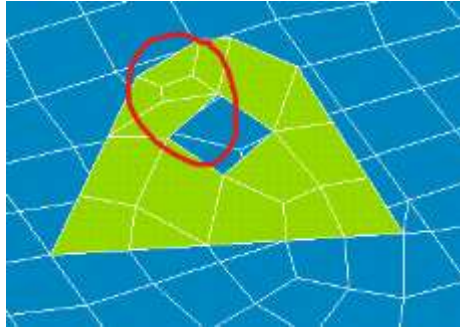


Рисунок 7.4 – Приклад елемента неправильної форми, який може привести до похибки розрахунку

Вміння розпізнавати помилки, що виникли внаслідок неякісної сітки, приходять з досвідом. Це дозволяє не переробляти модель, якщо виникли сумніви і, тим самим, зекономити час розрахунку.

7.3 Контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи

1. Вкажіть розширення файлу бази даних, що створюється програмою ANSYS.

2. Наведіть приклад змісту файлу з розширенням dbb.

3. Яким чином формується файл з розширенням dbb?

4. Пояснить, в якому з перерізів шару металу одержуються найбільш достовірні результати розрахунку: верхньому, середньому, нижньому.

5. Вкажіть послідовність кроків для внесення змін в геометричну модель або фізико-механічні властивості матеріалу.

6. Вкажіть послідовність наступних дій для зміни типу скінчених елементів з метою підвищення точності подальших розрахунків після отримання результатів.

7.4 Вказівки з техніки безпеки

1. До практичних робіт допускаються студенти після інструктажу з охорони праці і пожежної безпеки.
2. Забороняється включати електричні прилади без дозволу завідувача лабораторією чи викладача.
3. У випадку пожежі чи поразки електричним струмом студенти повинні діяти у відповідності із затвердженими інструкціями з охорони праці і пожежної безпеки.

7.5 Порядок проведення роботи

1. Відкрити файл в Mechanical APDL Product Launcher (із завданням, виконаним на попередніх заняттях).
2. За вказівками викладача представити результати розрахунку у тому чи іншому вигляді.
3. Вказати місця, де неякісні елементи могли спричинити похибку розрахунку. Запропонувати шляхи усунення цієї похибки.
4. Зробити необхідні зміни у моделі. Продемонструвати новий результат.

7.6 Зміст звіту

Мета і методика виконання практичної роботи. Короткі теоретичні відомості. Послідовність кроків для перегляду отриманих результатів на ПК та відображення їх у звітах. Роздруківка файлу з графічним відображенням результатів (за наявністю можливості). Висновки по роботі.

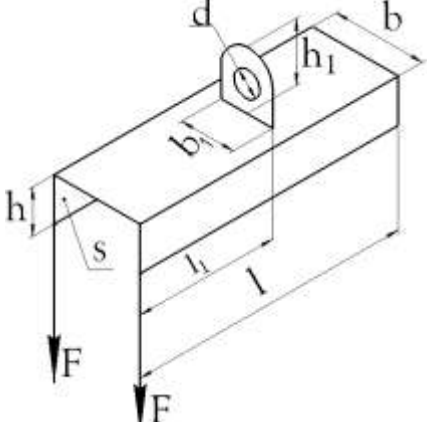
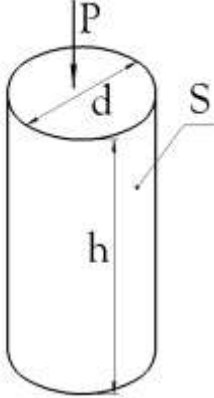
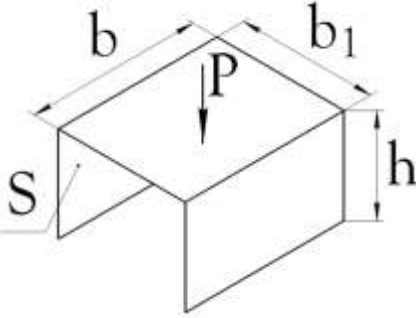
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

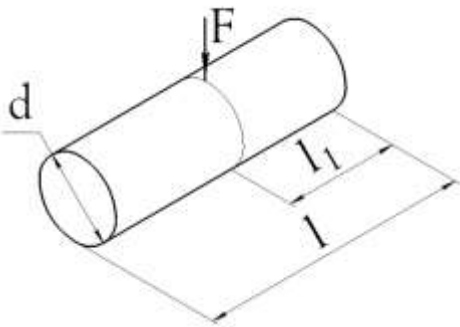
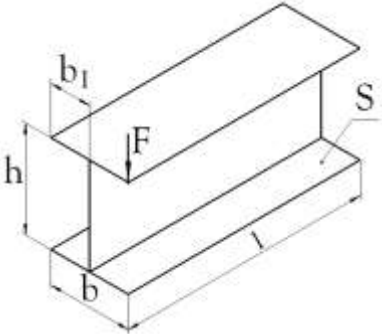
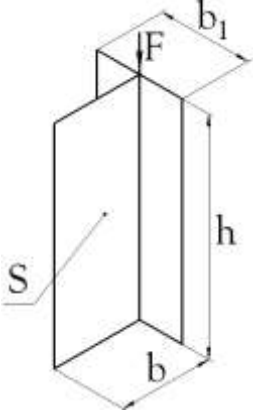
1. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів [Електронний ресурс]: навч. посіб. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 391 с.

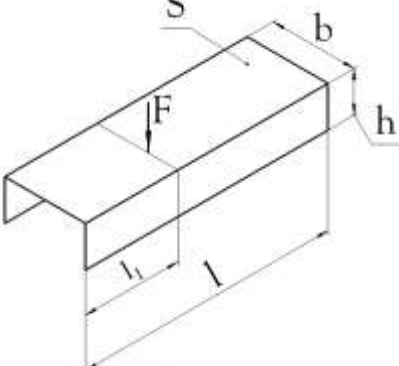
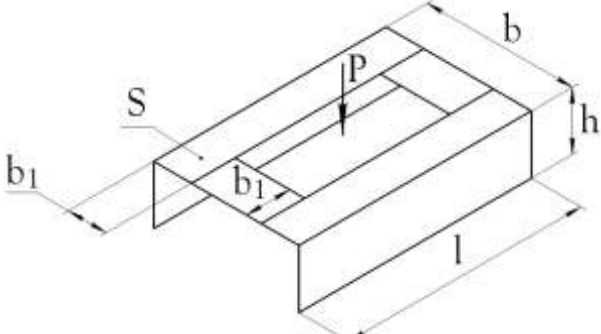
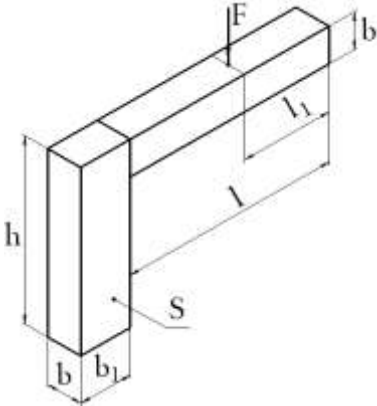
2. Павленко І.В. Метод скінченних елементів в задачах коливань механічних систем: Навчальний посібник. – Суми: Вид-во СумДУ, 2007. – 180с.

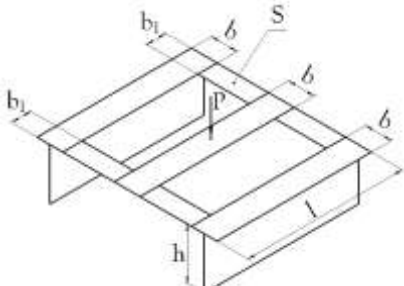
3. ANSYS Mechanical APDL Structural AnalysisGuide. – ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive, 2013. – 522 p.

Додаток 1

№	Ескіз конструкції
1	
2	
3	

№	Ескіз конструкції
4	 A 3D perspective diagram of a cylindrical beam. The diameter is labeled d. The total length is labeled l. A downward force F is applied at a distance l_1 from the left end.
5	 A 3D perspective diagram of a rectangular beam. The width is labeled b, the height is labeled h, and the length is labeled l. A downward force F is applied at a distance b_1 from the left edge. The thickness of the beam is labeled S.
6	 A 3D perspective diagram of a rectangular beam. The width is labeled b, the height is labeled h, and the length is labeled l. A downward force F is applied at a distance b_1 from the left edge. The thickness of the beam is labeled S.

№	Ескіз конструкції
7	
8	
9	

№	Ескіз конструкції
10	 A 3D perspective sketch of a rectangular frame structure. The structure consists of two parallel horizontal beams of length l and height h, connected by two vertical beams of height h. The top surface of the horizontal beams is labeled S. The width of the horizontal beams is labeled b_1 at the front and b at the back. A central vertical element, labeled P, is positioned between the two horizontal beams. The distance between the inner faces of the horizontal beams is labeled b at the top and b_1 at the bottom.

Додаток 2

№	Розміри, мм									
	l	l1	b	b1	h	h1	d	S	F, Н	P, МПа
1	1000	500	200	100	200	400	25	3	75	0,5
2	1200	600	100	50	200	400	50	2	50	0,25
3	1300	650	200	100	100	200	35	3	75	0,5
4	1400	700	300	150	150	300	50	5	100	1
5	1500	750	400	200	200	400	100	4	120	0,8
6	1600	800	500	250	250	500	150	5	130	1,1
7	1700	850	600	300	300	600	200	6	140	1,2
8	1800	900	700	350	350	700	250	4	150	0,9
9	1900	950	800	400	400	800	300	5	160	1,3
10	2000	1000	900	450	450	900	350	6	170	1,4

Додаток 3

№	Матеріал
1	Сталь 09Г2С
2	Сталь Ст3
3	Сталь 12Х18Н10Т
4	Алюміній
5	Сталь 65Г
6	Сталь 45
7	Сталь 12Х18Н9Т
8	Сталь 45Г17Ю3
9	Сталь 12Х18Н9Т
10	Сталь 09Г2С