

**CAD, CAM, CAE СИСТЕМИ:**  
**методичні рекомендації**  
**до виконання індивідуальних завдань**

Запоріжжя 2025



УДК 004.942(072)  
К13

Рекомендовано Науково-методичною  
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ  
ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 2 від 21.11.2025 р.)

**Укладач**

Міхеєнко Д. Ю., канд. техн. наук, доцент.

**К13** CAD, CAM, CAE системи : методичні рекомендації до виконання індивідуальних завдань (для студентів технічних спеціальностей усіх форм навчання / уклад. Д. Ю. Міхеєнко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА». 2025. 62 с.

Методичні вказівки містять основні теоретичні відомості, приклади, похідні дані для виконання індивідуальних завдань за темою «Розробка 3D моделей технічних виробів в CAD-системі» та «Проведення віртуальних випробувань конструкцій в CAE-середовищі» при вивченні студентами дисципліни «CAD, CAM, CAE системи». Матеріал навчального посібника має на меті підвищити якість виконання завдань, ознайомити студентів з основними методами створення, редагування та аналізу 3D моделей, а також формування навичок використання CAD і CAE середовищ для вирішення інженерних задач у процесі проектування технічних виробів. Крім того, посібник сприяє формуванню практичних навичок використання отриманих знань у реальних проєктних та інженерних завданнях, розвитку критичного мислення при прийнятті рішень і ефективній роботі з сучасними CAD, CAM та CAE системами.

**УДК 004.942(072)**

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2025



## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>4</b>
<b>1 РОЗРОБКА 3D МОДЕЛЕЙ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ В САД-СИСТЕМІ ..</b>	<b>5</b>
1.1 Короткі теоретичні відомості .....	5
1.2 Приклад виконання індивідуального завдання .....	16
<b>2 ПРОВЕДЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ КОНСТРУКЦІЙ В САЕ- СЕРЕДОВИЩІ.....</b>	<b>25</b>
2.1 Короткі теоретичні відомості .....	25
2.2 Приклад виконання індивідуального завдання .....	36
<b>3 ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ .....</b>	<b>45</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>60</b>



## ВСТУП

Сучасне машинобудування, будівництво та промисловий дизайн неможливі без використання комплексних комп'ютерних систем підтримки життєвого циклу виробів, таких як CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing) та CAE (Computer-Aided Engineering). Їх інтегроване застосування забезпечує скорочення часу розробки продукції, підвищення якості конструкторських рішень, оптимізацію технологічних процесів виробництва та зниження витрат на випробування й доопрацювання конструкцій.

CAD-системи призначені для створення точних 2D і 3D моделей деталей та складальних одиниць, оформлення конструкторської документації та проведення геометричного аналізу виробів. За допомогою сучасних CAD-програм користувачі мають змогу створювати складні просторові моделі, що відповідають стандартам промисловості.

CAE-системи забезпечують інженерний аналіз спроектованих моделей без необхідності виготовлення фізичних прототипів. Застосування віртуальних випробувань дозволяє оцінити міцність, стійкість до навантажень, теплові та інші характеристики конструкції ще на етапі проектування. Це мінімізує ризики помилок і дає змогу оптимізувати конструктивні рішення.

Запропоновані методичні вказівки призначені для виконання індивідуальних завдань, спрямованих на формування практичних навичок роботи з CAD і CAE-системами. Вони містять рекомендації щодо поетапного створення тривимірних моделей технічних виробів у CAD-середовищі та проведення їх віртуального аналізу за допомогою CAE-інструментів.



# 1 РОЗРОБКА 3D МОДЕЛЕЙ ТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ В CAD-СИСТЕМІ

## 1.1 Короткі теоретичні відомості

**CAD (Computer-Aided Design)** – це системи автоматизованого проектування, що використовуються для створення, редагування та аналізу технічної документації, а також 2D і 3D-моделей виробів. Завдяки CAD-системам інженери можуть проектувати вироби та конструкції із високою точністю, що значно підвищує якість розробки та скорочує час на виконання проєктів.

Основною метою CAD-систем є забезпечення можливості створення точних геометричних моделей об'єктів, що дозволяє конструктору візуально уявити кінцевий виріб до його виготовлення. Це дає змогу аналізувати конструкцію на етапі розробки, визначати її відповідність технічним вимогам і стандартам, а також своєчасно виявляти помилки.

CAD-системи дозволяють створювати креслення, що відповідають стандартам оформлення документації, з можливістю автоматичної генерації специфікацій, розмірних ліній, позначень матеріалів, видів і розрізів. Це спрощує підготовку повного пакету технічної документації для виробництва.

Однією з ключових можливостей CAD є параметричне моделювання, що дозволяє швидко змінювати конструкцію виробу за рахунок редагування параметрів, які визначають його геометрію. Завдяки цьому інженер може легко адаптувати модель до нових вимог без необхідності створення нової моделі з нуля.

CAD-системи підтримують створення твердотільних та поверхневих моделей. Твердотільне моделювання дозволяє розраховувати масово-інерційні характеристики моделі, визначати її об'єм та центр ваги, що важливо для інженерного аналізу. Поверхневе моделювання використовується для створення складних, криволінійних поверхонь,



характерних для обтічних форм та дизайнерських деталей.

Використання CAD-систем значно підвищує ефективність командної роботи, оскільки декілька інженерів можуть працювати над різними частинами виробу одночасно, синхронізуючи свої зміни у єдиній збірці. Це дозволяє організувати ефективний процес розробки складних технічних систем.

У CAD-системах реалізовані інструменти аналізу збірок, що дозволяють перевіряти моделі на наявність колізій (перетинів деталей у збірці) та контролювати правильність з'єднання компонентів. Це допомагає уникнути помилок при складанні виробів у реальному виробництві.

Сучасні CAD-системи інтегруються з **CAM (Computer-Aided Manufacturing)** та **CAE (Computer-Aided Engineering)** системами, забезпечуючи безперервність процесу від створення моделі до її виготовлення та аналізу міцності чи інших характеристик. Це дозволяє створювати єдиний цифровий прототип виробу.

Використання CAD дозволяє скоротити витрати на розробку та виготовлення виробів, оскільки потреба у виготовленні великої кількості фізичних прототипів зменшується завдяки можливості попередньої перевірки конструкції на етапі проектування. Це дає змогу проводити зміни у конструкції швидко та без додаткових витрат.

Найпоширенішими CAD-системами є SolidWorks, Autodesk Inventor, Siemens NX, CATIA, PTC Creo, FreeCAD, які використовуються у машинобудуванні, промисловому дизайні, авіа- та автомобілебудуванні, будівництві. Володіння CAD-системами є важливою компетенцією сучасного інженера та дизайнера технічних систем.

CAD-системи дозволяють створювати високоточні 2D та 3D моделі, що відповідають реальним габаритним і геометричним параметрам виробу. Завдяки інструментам побудови та контролю розмірів, конструктор має можливість виконувати креслення та моделі з точністю



до мікронів, що важливо для виробів, які потребують високої якості складання та точного прилягання деталей.

Використання CAD дозволяє значно скоротити час внесення змін у конструкторську документацію та моделі. При необхідності коригування конструкції достатньо змінити параметри або геометрію окремих елементів, після чого зміни автоматично відображаються у всіх кресленнях, збірках і специфікаціях, що зменшує ризик помилок та втрат часу.

CAD-системи дозволяють створювати як окремі деталі, так і збірки з багатьох компонентів, при цьому деталі можуть зберігатися в бібліотеках і повторно використовуватися у різних проєктах. Це спрощує проєктування складних технічних систем та забезпечує уніфікацію деталей, що важливо для організації серійного виробництва.

Після створення 3D моделі CAD-системи дозволяють автоматично генерувати креслення з потрібними видами, розмірами, розрізами та позначеннями. Це значно прискорює підготовку конструкторської документації для виробництва та мінімізує помилки, що виникають при ручному кресленні.

CAD-моделі можуть бути передані безпосередньо в CAE-системи для проведення інженерного аналізу, такого як аналіз міцності, теплових процесів, вібрацій чи гідродинаміки. Це дозволяє на етапі проєктування провести віртуальні випробування конструкцій, виявити слабкі місця та покращити виріб без виготовлення фізичних прототипів.

CAD-системи підтримують параметричне моделювання, що дозволяє швидко змінювати розміри та форму моделі за допомогою зміни параметрів, не створюючи модель заново. Це дає змогу оперативно адаптувати виріб до нових вимог замовника або технологічних змін.

У CAD можна створювати реалістичні візуалізації виробів для їх презентації, анімації роботи механізмів та віртуальні демонстрації складання конструкцій. Це полегшує спілкування між розробником,



замовником та виробництвом, дозволяючи краще уявити кінцевий результат.

CAD-системи легко інтегруються з CAM (Computer-Aided Manufacturing) системами, що дозволяє автоматично генерувати програми для верстатів з ЧПУ на основі створених моделей. Це скорочує час підготовки виробництва та знижує кількість помилок при передачі даних для виготовлення деталей.

Проекти, створені у CAD, можна зберігати у цифрових архівах для подальшого використання, модифікацій чи відновлення деталей у разі потреби. Це створює гнучку систему управління проектною документацією, що підвищує ефективність роботи підприємства.

Використання CAD забезпечує високий рівень якості проектування завдяки точності, автоматизації та гнучкості роботи. Це дозволяє підприємствам скорочувати терміни розробки продукції, зменшувати витрати на помилки у проектуванні та підвищувати конкурентоспроможність на ринку.

Типи 3D-моделювання в CAD охоплюють каркасне, поверхневе та твердотільне моделювання, кожне з яких має свої переваги залежно від завдань проектування. Каркасне моделювання дає можливість швидко створювати просторову структуру виробу та оцінювати його геометрію за допомогою ліній і кривих, що визначають контури об'єкта. Поверхневе моделювання використовується для формування складних криволінійних поверхонь, що особливо важливо для деталей з аеродинамічними та ергономічними формами. Твердотільне моделювання дозволяє створювати цілісні об'ємні моделі з визначенням їхніх фізичних параметрів, що дає можливість проводити інженерний аналіз і розрахунки. У комплексі ці типи моделювання забезпечують гнучкість, точність і ефективність створення 3D моделей технічних виробів у CAD-системах.

**Твердотільне моделювання** є найбільш поширеним типом 3D-моделювання в CAD-системах, що дозволяє створювати моделі як цілісні



об'єкти з визначеними параметрами маси, об'єму та інерційних характеристик. Такий підхід забезпечує максимальну наближеність до реальних фізичних властивостей виробів, дозволяючи використовувати моделі для інженерного аналізу та розрахунків (рисю 1.1).

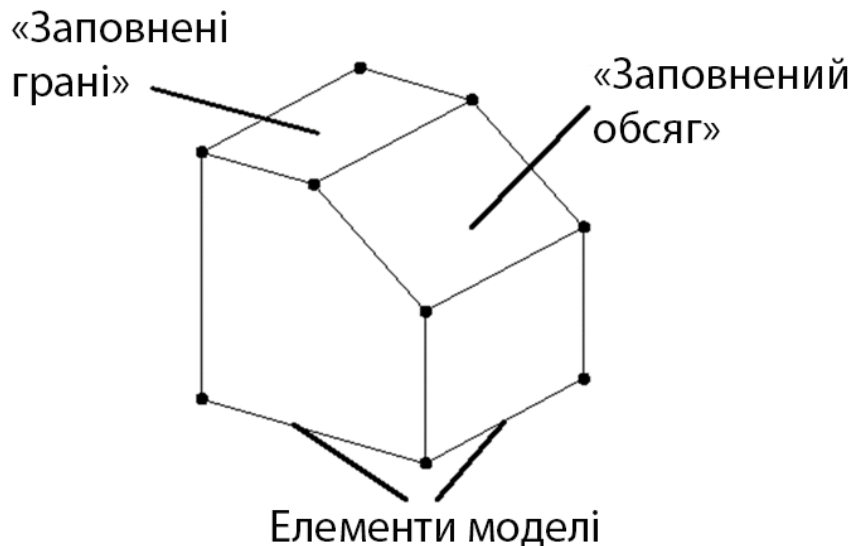


Рисунок 1.1 – Твердотільна модель

У твердотільному моделюванні об'єкти створюються шляхом комбінування базових геометричних форм та операцій редагування, таких як об'єднання, віднімання чи перетин тіл. Це забезпечує зручність поетапного конструювання деталей, додавання отворів, вирізів, фасок, ребер жорсткості та інших конструктивних елементів, що потрібні для досягнення потрібних функцій виробу.

Твердотільні моделі дають можливість автоматично визначати масу деталей, їхній центр ваги та інші фізичні характеристики, що дозволяє аналізувати їх працездатність у складі вузлів та механізмів. Це також дає можливість перевіряти збірки на колізії та коректність взаємного розташування деталей перед початком виготовлення.

**Поверхневе моделювання** застосовується для створення



складних криволінійних форм, характерних для деталей з аеродинамічними або ергономічними поверхнями. Це особливо актуально при проєктуванні автомобільних кузовів, корпусів літальних апаратів, промислового дизайну чи побутової техніки, де важлива плавність та точність поверхонь.

У поверхневому моделюванні створюються окремі поверхні, які визначають зовнішню форму деталі, а після завершення побудови їх можна об'єднати у замкнуту оболонку. У багатьох CAD-системах поверхневі моделі можуть бути перетворені у твердотільні, що дозволяє проводити інженерні розрахунки та аналіз готових форм (рис. 1.2).

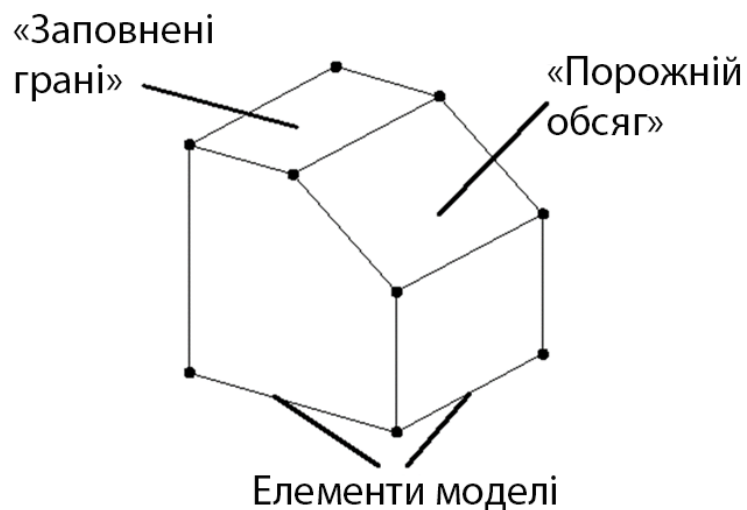


Рисунок 1.2 – Поверхнева модель

Поверхнєве моделювання дозволяє контролювати кривизну поверхні у будь-якій точці, що робить його незамінним інструментом для створення об'єктів зі складною геометрією. Завдяки цьому можна створювати форми, які складно реалізувати за допомогою виключно твердотільного моделювання.

**Каркасне моделювання** є методом створення 3D-моделей на основі ліній, кривих та точок, що формують каркас об'єкта (рис. 1.3). Такий



підхід дозволяє швидко будувати геометричні основи складних об'єктів, оцінювати пропорції та взаємне розташування елементів конструкції, займаючи мінімум пам'яті комп'ютера.

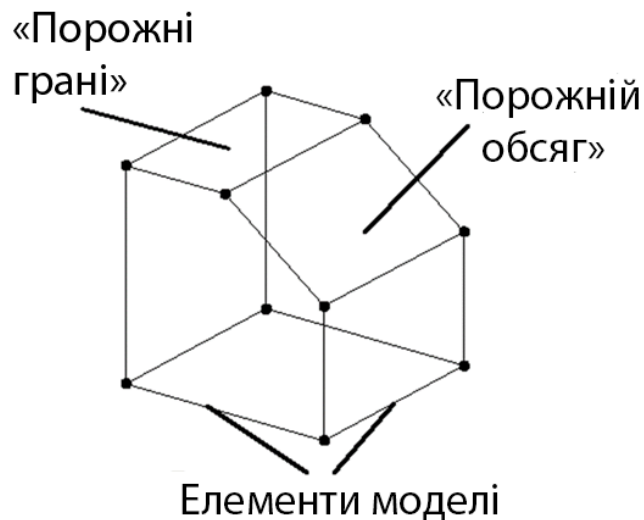


Рисунок 1.3 – Каркасна модель

Каркасні моделі використовуються для попереднього проєктування конструкцій, аналізу взаємного розташування компонентів, а також для перевірки коректності кінематики руху у збірках. Після узгодження каркасної моделі на її основі можна створювати твердотільні або поверхневі моделі для подальшої деталізації конструкції.

**Параметричне моделювання** є важливою частиною CAD, що передбачає створення моделей із використанням параметрів та залежностей між елементами. Це дозволяє швидко змінювати конструкцію, редагуючи числові значення параметрів, таких як довжини, кути, відстані між елементами чи радіуси.

Параметричне моделювання спрощує процес оновлення моделей під час внесення змін у проєкт, забезпечує автоматичну перебудову конструкцій та зменшує ймовірність помилок під час редагування. Завдяки



поєднанню твердотільного, поверхневого, каркасного та параметричного моделювання, CAD-системи дозволяють створювати точні, функціональні та оптимальні 3D-моделі технічних виробів будь-якої складності.

Аналіз технічного завдання є першим етапом створення 3D-моделі, що передбачає визначення функцій виробу, його призначення, умов експлуатації, габаритів та конструктивних обмежень. На цьому етапі студент знайомиться з технічними вимогами та підготовлює початкові розрахунки, що впливатимуть на геометрію виробу.

Також під час аналізу завдання визначаються матеріали, які планується використати для виготовлення деталі, оскільки це впливатиме на масу, міцність та інші характеристики моделі. Оцінюється необхідність технологічних елементів, таких як фаски, заокруглення та отвори, що мають бути передбачені у 3D-моделі.

Побудова **ескізів (скетчів)** є наступним кроком, що передбачає створення двовимірних контурів основних елементів виробу. У CAD-системах скетчі використовуються як основа для побудови тривимірної геометрії та задають форму майбутньої деталі.

Під час створення скетчів визначаються основні габаритні розміри, форма поперечного перерізу, контури та взаємне розташування елементів. Для побудови скетчів використовуються базові інструменти CAD, такі як лінії, кола, дуги, прямокутники, а також параметричні залежності між елементами.

Після створення скетчів здійснюється перехід до побудови 3D-геометрії за допомогою базових операцій, таких як **висунення (Extrude)**, яке дозволяє перетворювати 2D-ескізи у тривимірні об'єкти шляхом протягування їх на задану довжину.

Операція **обертання (Revolve)** використовується для створення об'єктів обертальної симетрії, таких як вали, втулки, фланці, шляхом обертання скетча навколо обраної осі. Це дозволяє швидко формувати об'ємні деталі, що мають круглі контури.



Операція **вирізання (Cut)** застосовується для створення отворів, виїмок або пазів у деталях, видаляючи частину матеріалу відповідно до форми скетча. Вона є важливою для формування конструктивних елементів, необхідних для складання чи роботи виробу.

Операції фаски (Chamfer) та філе (Fillet) використовуються для обробки кромки та заокруглення граней моделі. Фаски знімають гострі кути, полегшуючи обробку деталі та зменшуючи ризик пошкодження під час експлуатації, а філе забезпечує плавні переходи між поверхнями.

Створення **збірок (Assembly)** є наступним етапом, під час якого окремі деталі об'єднуються у єдину конструкцію. У CAD-системі деталі розміщуються у просторі збірки, де визначається їх взаємне розташування та умови взаємодії.

У збірках задаються зв'язки між компонентами, такі як співвісність, паралельність, перпендикулярність чи контактні умови, що дозволяє точно визначити розташування деталей відносно одна одної. Це дає можливість перевірити правильність конструкції та забезпечує коректність при подальшій експлуатації.

Аналіз колізій та перевірка збірки дають змогу виявити можливі перетини між деталями та визначити правильність їх взаємного розташування. Це дозволяє уникнути помилок у конструкції, які можуть призвести до ускладнень під час виготовлення чи складання виробу.

Завершальним етапом є генерація креслень і специфікацій, що виконується автоматично на основі створеної 3D-моделі. CAD-системи дозволяють швидко отримувати робочі креслення з різними видами, розрізами, розмірами та технічними вимогами, а також формувати специфікації, що значно спрощує підготовку виробу до виготовлення.

**SolidWorks** є однією з найпоширеніших CAD-систем для створення 3D моделей деталей і збірок, що активно використовується у машинобудуванні та приладобудуванні. Програма має зручний інтерфейс, підтримує параметричне моделювання та дозволяє створювати

креслення автоматично на основі 3D моделей (рис. 1.4).

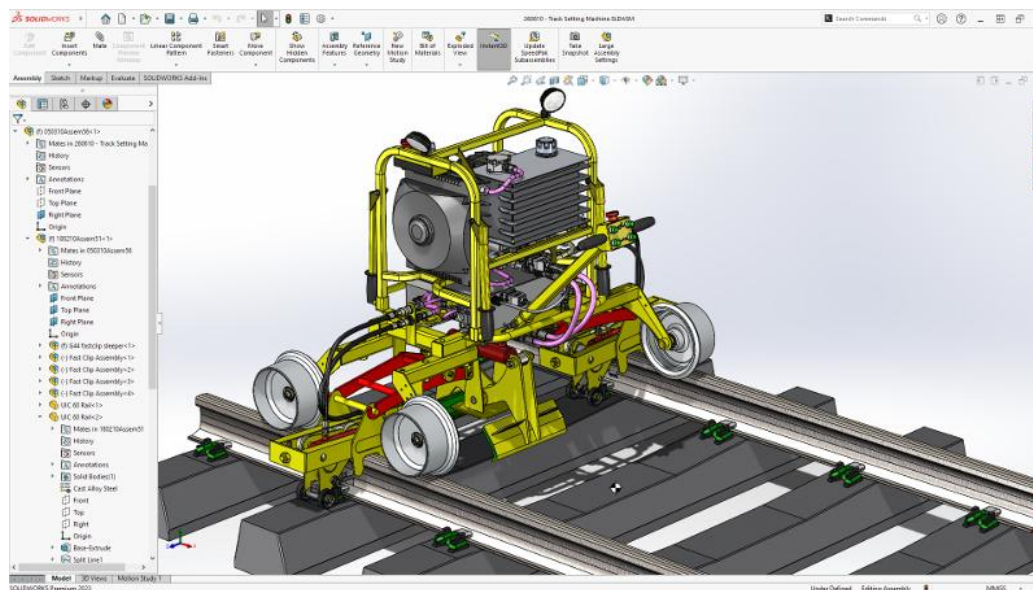


Рисунок 1.4 – SolidWorks

**Autodesk Inventor** використовується для 3D моделювання, проектування збірок та створення креслень, а також має можливості проведення базових розрахунків і симуляцій. Система дозволяє швидко створювати деталізовані моделі та автоматизувати процес розробки конструкторської документації.

**Siemens NX** є потужною CAD/CAM/CAE системою, що використовується у великих промислових підприємствах для комплексного проектування виробів. Вона поєднує моделювання, аналіз, генерацію креслень та CAM-функції, що дозволяє забезпечити повний цикл проектування та підготовки виробництва.

**CATIA** розроблена компанією Dassault Systèmes і активно використовується в авіаційній, автомобільній та суднобудівній промисловості. Вона дозволяє створювати складні поверхневі та твердотільні моделі, розробляти великі збірки та проводити інженерні аналізи.



**PTC Creo** (раніше Pro/ENGINEER) є сучасною CAD-системою, яка підтримує параметричне та пряме моделювання, що дозволяє гнучко змінювати конструкцію моделі. Система має розвинені засоби для роботи зі збірками, генерації креслень та проведення аналізу міцності.

**Fusion 360** - це сучасна хмарна CAD/CAM/CAE платформа від компанії Autodesk, яка поєднує інструменти 3D моделювання, симуляції, виробництва та спільної роботи в одному середовищі. Завдяки інтеграції хмарних сервісів, Fusion 360 дозволяє користувачам працювати над проектами з будь-якого пристрою, забезпечуючи доступ до актуальної версії моделі та можливість спільної роботи в режимі реального часу. Платформа підтримує параметричне, вільне та поверхневе моделювання, а також пропонує потужні інструменти для аналізу міцності та оптимізації конструкцій, що робить її ефективним рішенням як для навчання, так і для професійної інженерної діяльності.

**FreeCAD** є безкоштовною CAD-системою з відкритим кодом, яка дозволяє виконувати параметричне 3D моделювання та створення креслень. Вона є хорошим вибором для навчання основам 3D моделювання та для виконання базових завдань у навчальному процесі.

Усі зазначені CAD-системи дозволяють створювати 3D моделі окремих деталей, збірок та генерувати креслення, що відповідають стандартам. Вони також дають можливість швидко вносити зміни у моделі відповідно до змін технічного завдання та проводити підготовку виробничої документації.

Використання CAD-систем у навчальному процесі дозволяє студентам опанувати сучасні інструменти проектування, формувати просторове мислення та здобувати навички, необхідні для роботи у промисловості. Це забезпечує підготовку конкурентоздатних фахівців для сфер машинобудування, приладобудування та інших галузей.

## 1.2 Приклад виконання індивідуального завдання

Розглянемо приклад побудови деталі в SolidWorks показаної на рисунку 1.5.

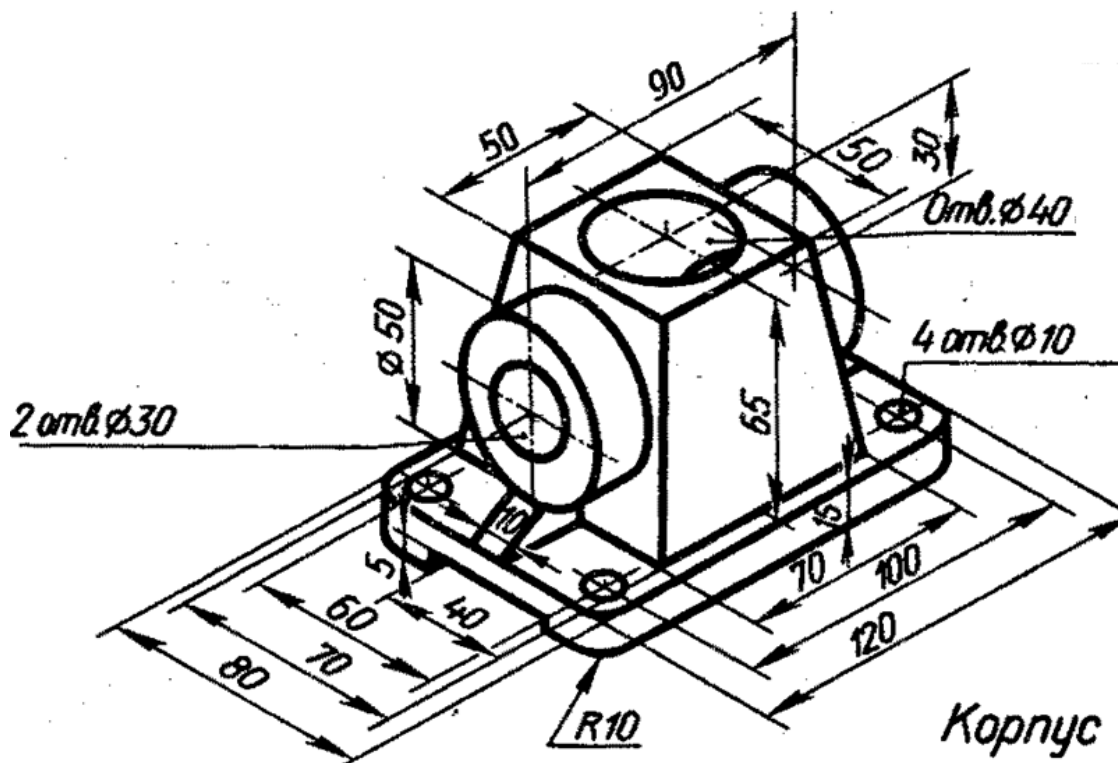


Рисунок 1.5 – Приклад деталі

Відкриємо SolidWorks та створимо нову деталь (Part), щоб розпочати моделювання, налаштувати середовище роботи та підготувати простір для побудови корпусу відповідно до креслення. Нам знадобляться інструменти зі стрічок меню Sketch для створення ескізів та Features для витягування, вирізання й побудови об'ємної моделі корпусу. Для побудови цієї деталі в SolidWorks спочатку створюють базову пластину, вибираючи Top Plane (Верхня площина) (рис. 1.6) та натиснути Create Sketch, створюючи на ній ескіз прямокутника розмірами 120×80 мм, використовуючи Center Rectangle для легкого центрування та проставивши розміри 120 мм по довжині та 80 мм по ширині (рис. 1.7).

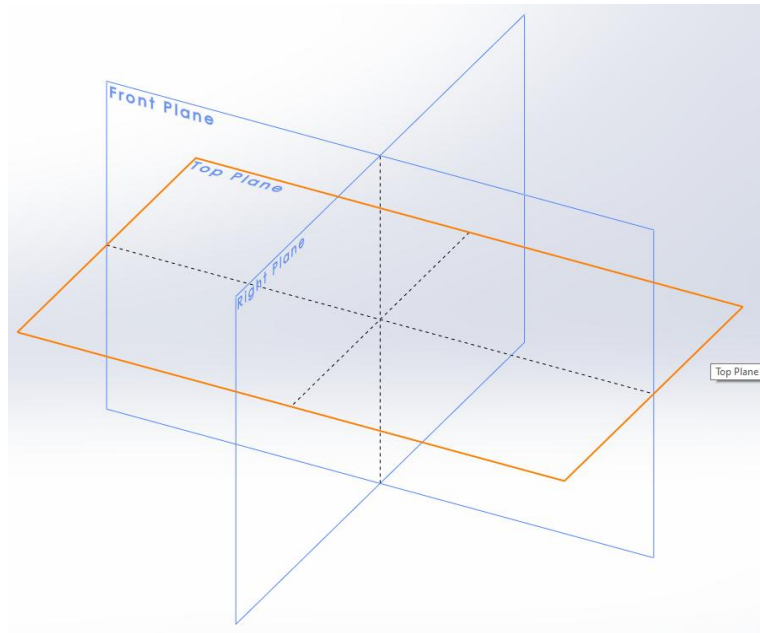


Рисунок 1.6 – Top Plane (Верхня площина)

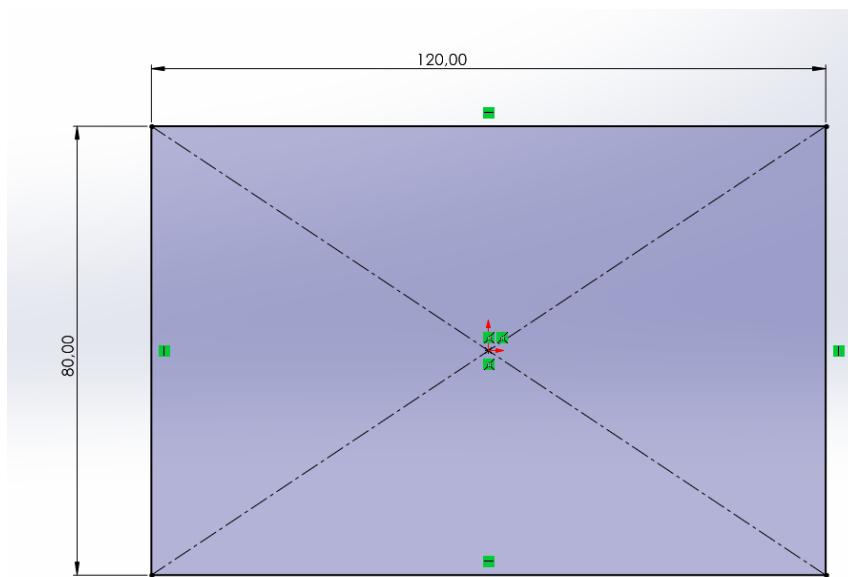


Рисунок 1.7 – Ескіз прямокутника розмірами 120×80 мм

Після чого виконують витягування Extruded Boss/Base на 15 мм, утворюючи основу для подальшої побудови корпусу та створення наступних елементів деталі згідно з кресленням (рис. 1.8).

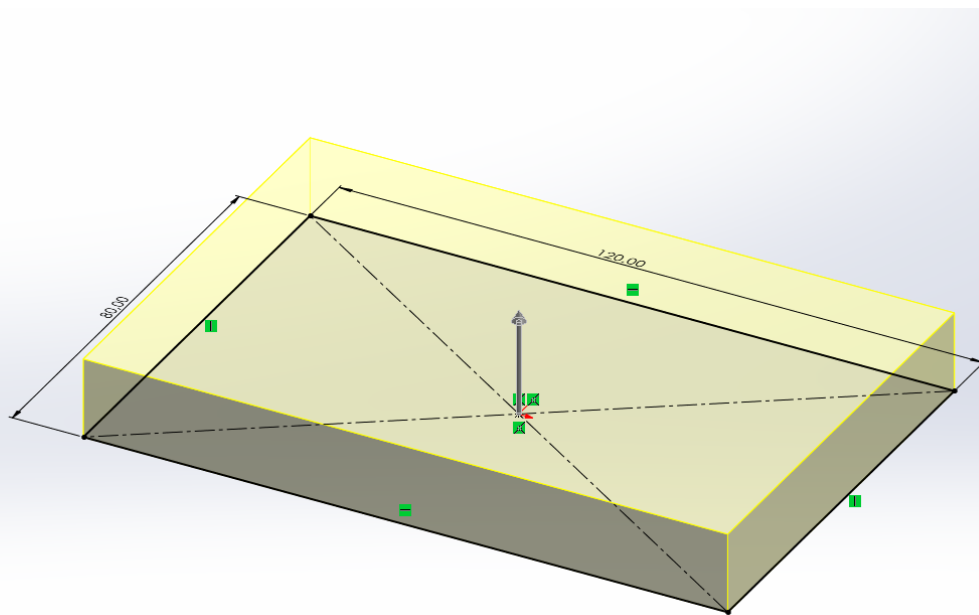
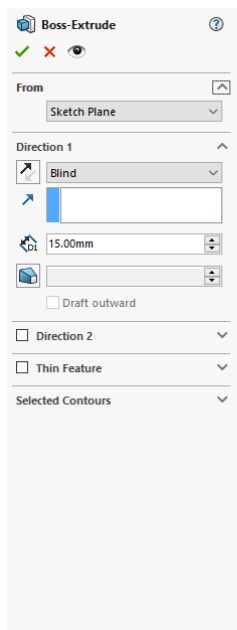


Рисунок 1.8 – Витягування(Extruded Boss/Base) на 15 мм

Для створення похилої піраміди спочатку створюємо перший ескіз на верхній грані пластини у вигляді квадрату 70x70 мм (рис. 1.9), потім створюємо другий ескіз на паралельній площині на висоті 80 мм з меншим квадратом 50x50 мм (рис. 1.10), після чого використовуємо команду Lofted Boss/Base для плавного з'єднання цих двох ескізів, утворюючи похилу піраміду для корпусу (рис. 1.11).

Для створення циліндра спереду потрібно вибрати Right Plane (Права площина) та створити ескіз кола  $\varnothing 50$  мм по центру, після чого використати команду Extruded Boss/Base, встановивши параметр витягування Mid Plane та витягнути циліндр на 45 мм в обидві сторони, формуючи об'ємний виступ згідно з кресленням (рис. 1.12).

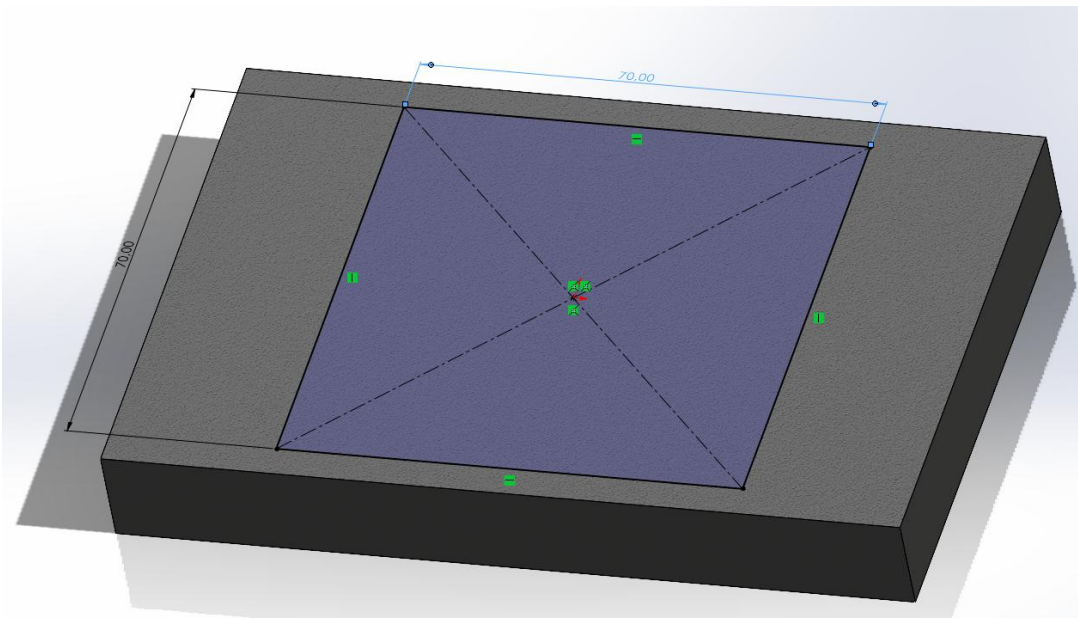


Рисунок 1.9 – Ескіз на верхній грані пластини у вигляді квадрату 70x70 мм

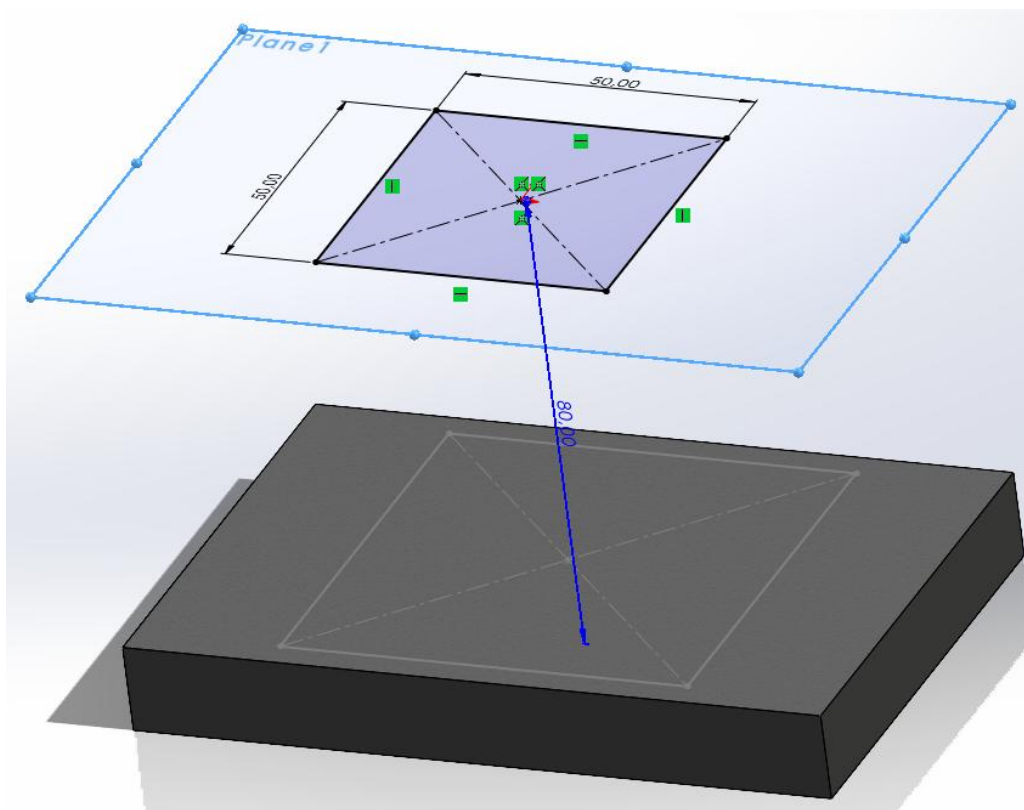


Рисунок 1.10 – Другий ескіз на паралельній площині на висоті 80 мм з меншим квадратом 50x50 мм

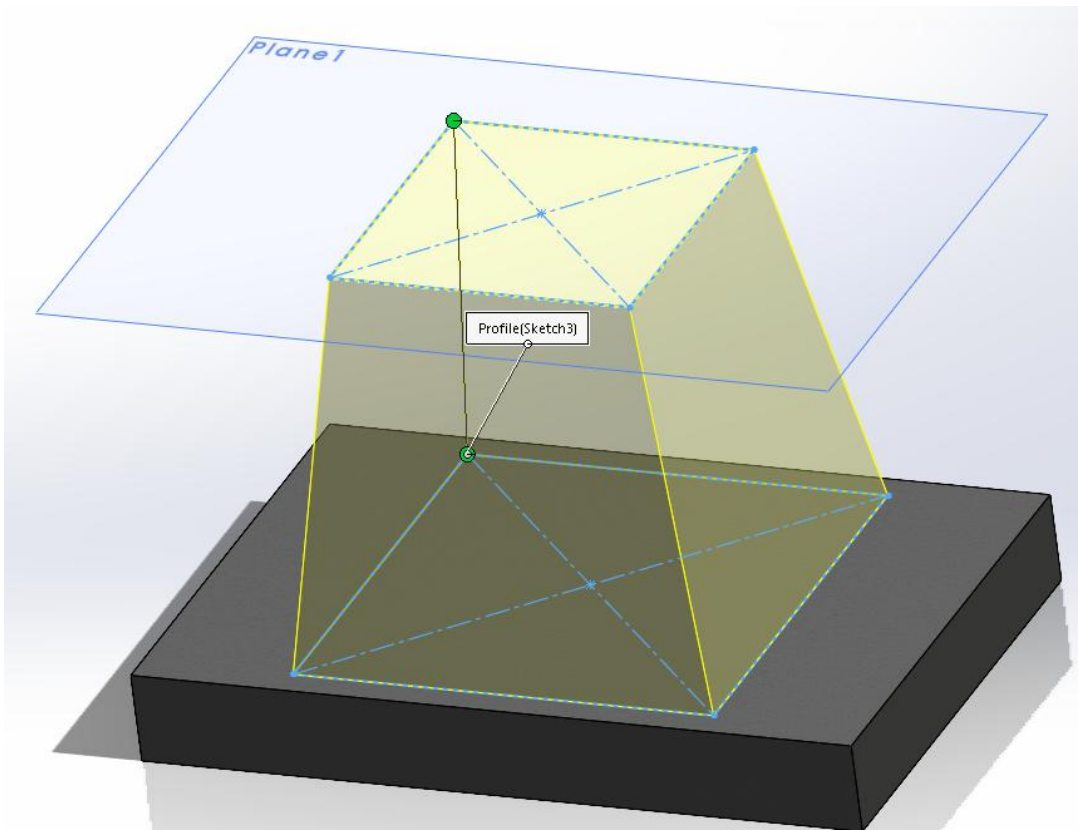


Рисунок 1.11 – Команда Lofted Boss/Base

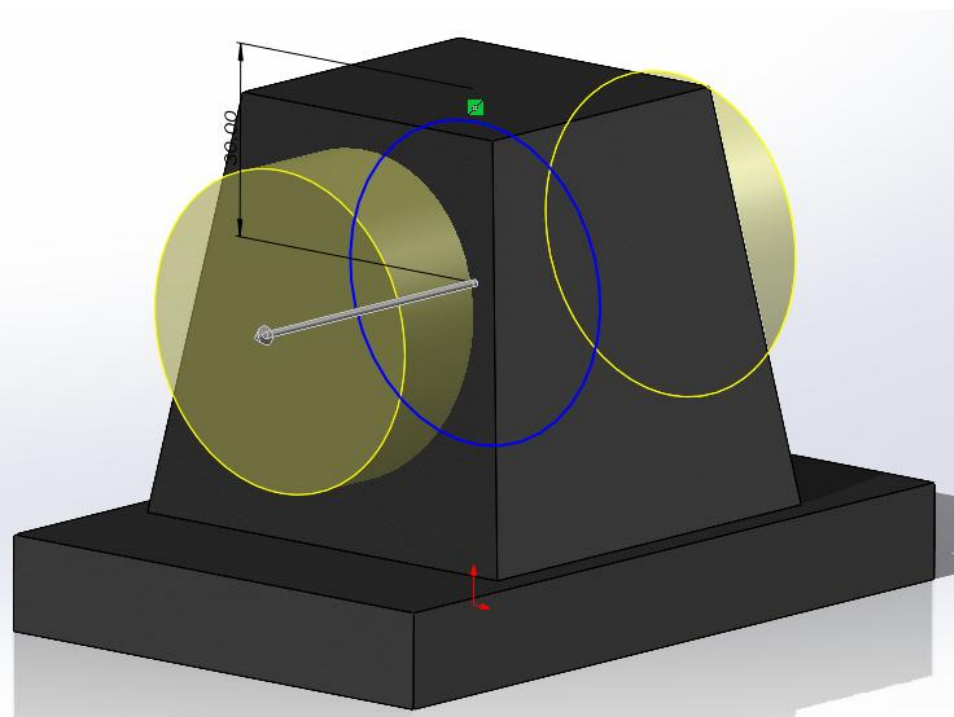


Рисунок 1.12 – Створення циліндра спереду



Зробимо ребро за допомогою Rib: створюємо на Top Plane ескіз відрізка у місці встановлення ребра, задаємо його висоту та товщину, після чого використовуємо команду Rib для автоматичного створення ребра (рис. 1.13).

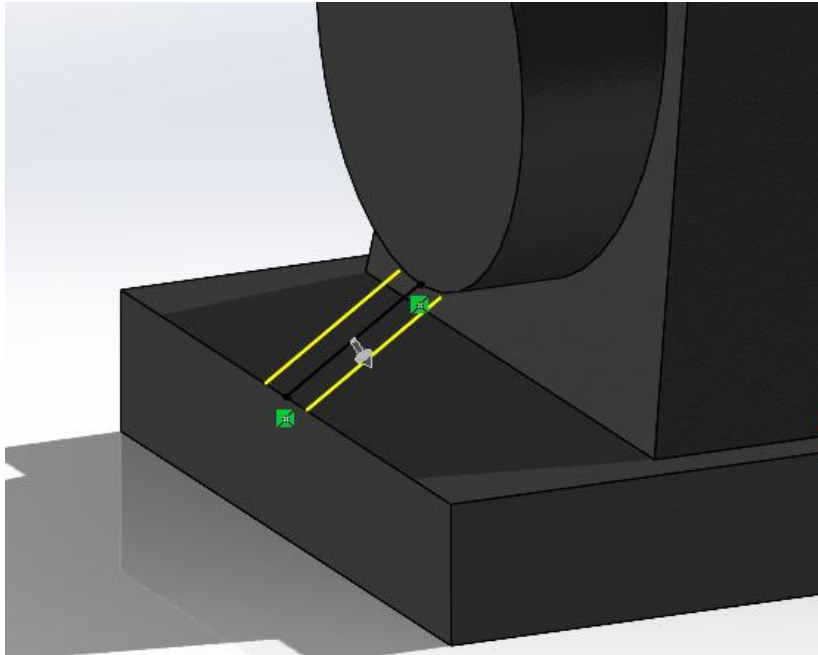


Рисунок 1.13 – Створення ребра за допомогою Rib

Виконуємо відзеркалення ребра за допомогою команди Mirror: вибираємо ребро, створене командою Rib, вказуємо площину симетрії (Right Plane або іншу центральну площину деталі), після чого застосовуємо Mirror, щоб створити симетричне ребро з протилежного боку корпусу (рис. 1.14).

Робимо отвори за допомогою Extruded Cut: вибираємо поверхню, на якій потрібно виконати отвори, створюємо ескіз із колами потрібного діаметра відповідно до креслення, точно розміщуємо їх за допомогою Smart Dimension, після чого використовуємо команду Extruded Cut з параметром наскрізного вирізання (Through All), щоб отримати отвори потрібної форми та розміру у корпусі (рис. 1.15).

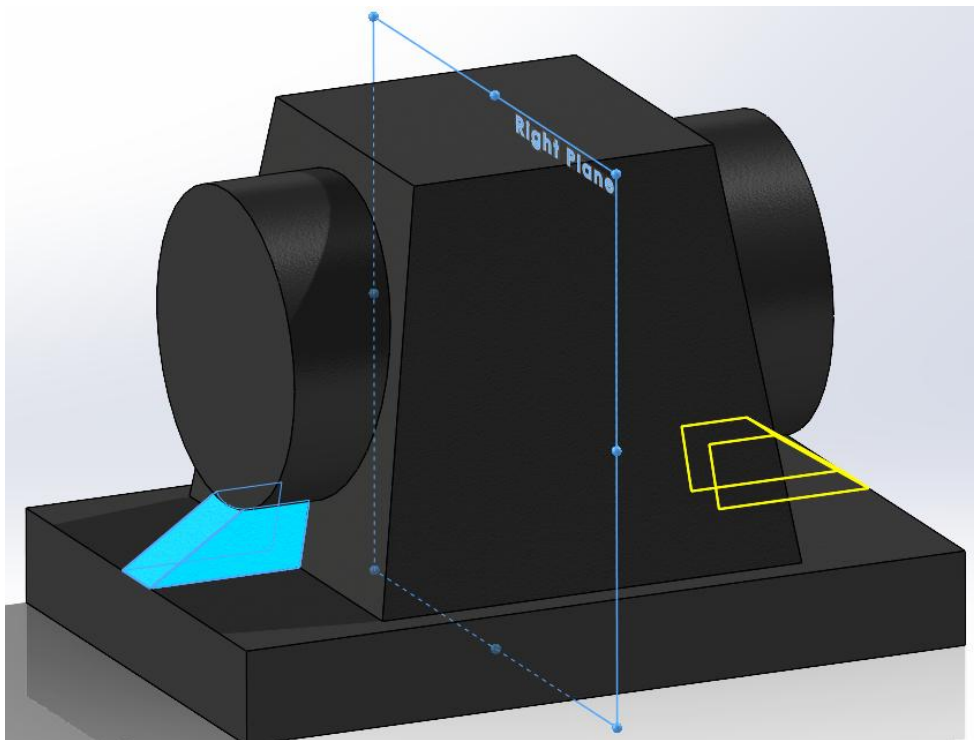


Рисунок 1.14 – Відзеркалення ребра за допомогою команди Mirror

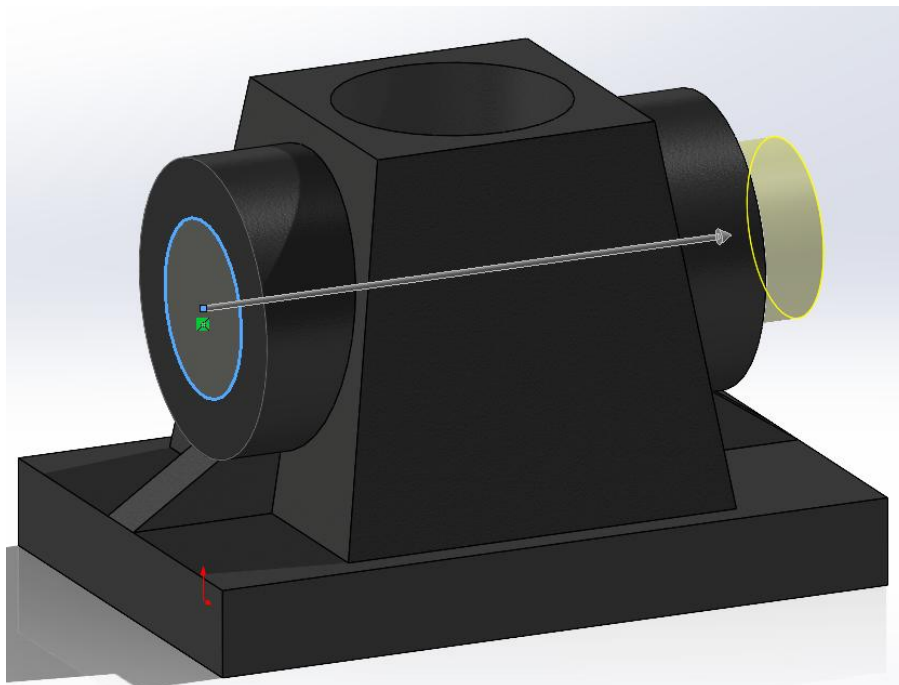


Рисунок 1.15 – Створення отворів за допомогою Extruded Cut



Створюємо масив отворів безпосередньо на ескізі, для цього креслимо одне коло потрібного діаметра, після чого використовуємо інструмент Linear Sketch Pattern (Лінійний масив ескізу), задаємо напрямки, кількість копій (2×2) та крок між ними згідно з кресленням, щоб одразу отримати 4 рівномірно розташовані кола (рис. 1.16) перед виконанням Extruded Cut для утворення отворів в основі.

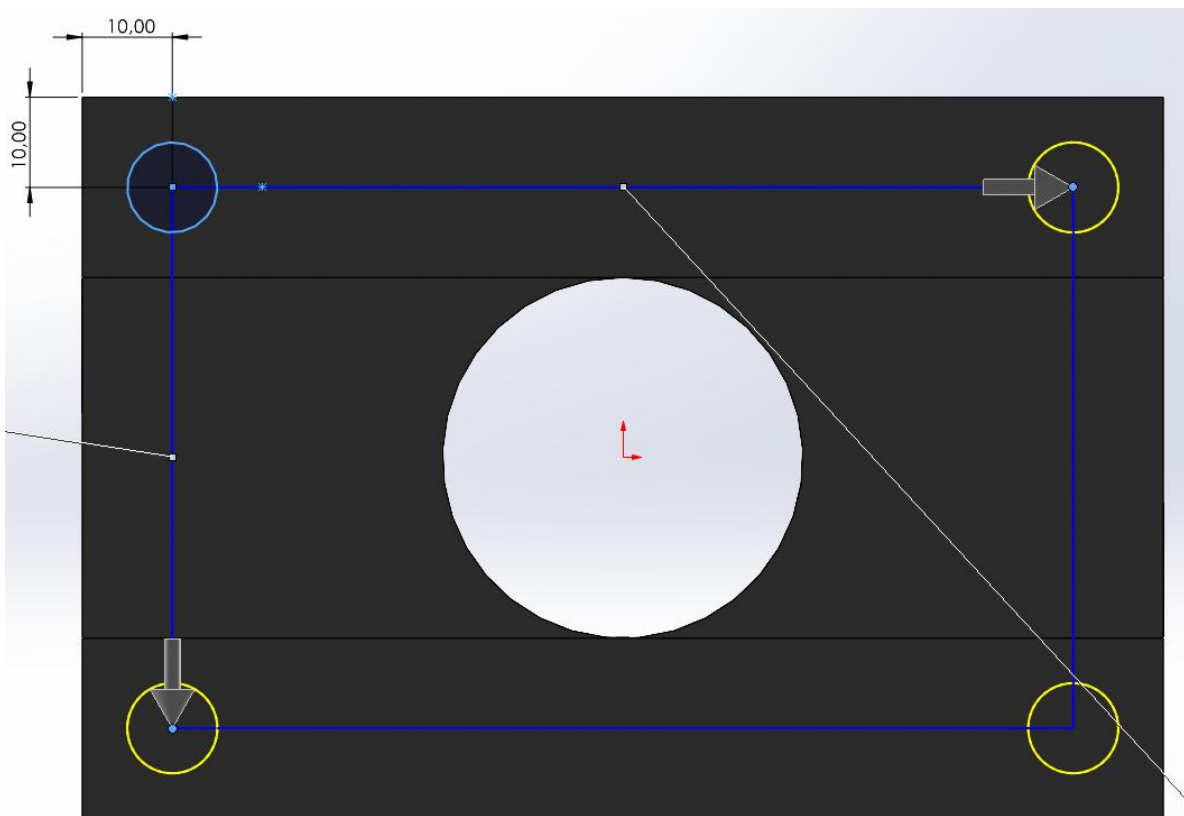


Рисунок 1.16 – Лінійний масив ескізу 4 отворів

Закругляємо кути на основі за допомогою інструмента Fillet (Згладжування/Фаска), вибираючи чотири зовнішні ребра пластини, встановлюємо радіус згідно з кресленням (R10 мм), після чого застосовуємо Fillet для отримання плавних заокруглень по кутах основи деталі (рис. 1.17).

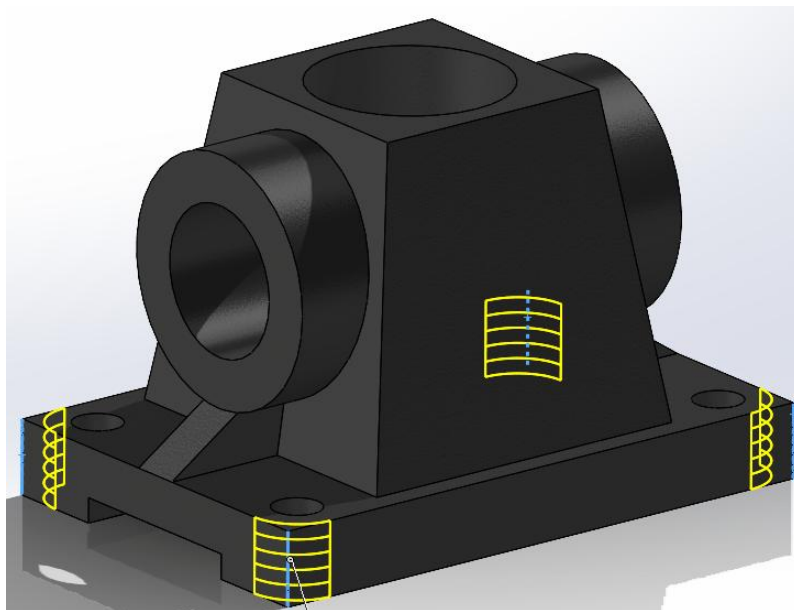


Рисунок 1.17 – Закруглення кутів за допомогою інструмента Fillet

Готова тривимірна модель показана на рисунку 1.18.

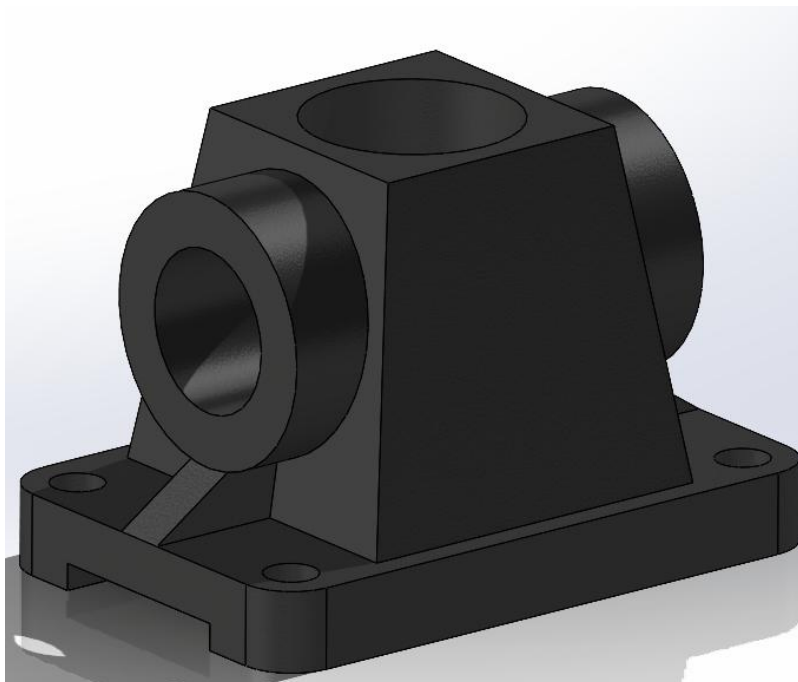



Рисунок 1.18 – Готова тривимірна модель



## 2 ПРОВЕДЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ КОНСТРУКЦІЙ В CAE-СЕРЕДОВИЩІ

### 2.1 Короткі теоретичні відомості

**CAE-системи (Computer-Aided Engineering)** - це програмне забезпечення, яке використовується для комп'ютерного інженерного аналізу, моделювання та оптимізації конструкцій і технічних виробів. Вони дозволяють інженерам досліджувати поведінку виробів у різних умовах експлуатації без необхідності виготовлення фізичних прототипів. Це значно скорочує час і витрати на розробку.

Основною функцією CAE-систем є виконання віртуальних випробувань, зокрема аналізу міцності, деформації, теплових процесів, динамічних навантажень, вібрацій та інших фізичних явищ, які впливають на експлуатаційні характеристики виробу. Завдяки цьому можна виявити слабкі місця конструкції і запобігти їхньому руйнуванню у реальних умовах.

Для моделювання в CAE зазвичай застосовується метод кінцевих елементів (МКЕ), який розбиває складну геометрію виробу на багато дрібних елементів. Це дозволяє точно проаналізувати розподіл напружень, температур, деформацій тощо в кожній частині конструкції.

CAE-системи широко використовуються у машинобудуванні, авіації, автомобілебудуванні, будівництві та інших галузях, де необхідно забезпечити надійність і безпеку виробів. Вони є невід'ємною частиною сучасного циклу розробки продукції, поєднуючись із CAD і CAM-технологіями.

Впровадження CAE дозволяє зменшити кількість фізичних випробувань, що знижує матеріальні витрати та час розробки, а також підвищує якість і довговічність виробів. Завдяки цьому інженери можуть швидко тестувати різні варіанти конструкції і вибирати оптимальні



рішення.

Сучасні CAE-системи часто інтегруються з CAD-системами, що дозволяє безпосередньо переносити 3D-моделі для аналізу. Це забезпечує швидку і ефективну взаємодію між етапами проєктування і тестування, роблячи процес розробки більш гнучким і адаптивним до вимог ринку.

Віртуальне моделювання в CAE-системах дозволяє зменшити кількість фізичних прототипів, що потребують виготовлення та випробувань. Це значно скорочує матеріальні витрати, трудовитрати та час на проведення досліджень, що особливо важливо для складних і дорогих виробів. Замість того, щоб витрачати ресурси на багаторазові фізичні тести, інженери можуть провести аналіз у цифровому середовищі, швидко виявляючи недоліки конструкції.

CAE-системи забезпечують швидке отримання результатів чисельного аналізу, що дозволяє інженерам оперативно перевіряти різні варіанти конструкцій, модифікувати їх і відразу бачити вплив змін. Це сприяє зменшенню циклу розробки продукту та швидшому виведенню його на ринок, що є конкурентною перевагою.

За допомогою CAE можна детально проаналізувати розподіл напружень, деформації, теплові впливи та інші фактори, які впливають на експлуатацію виробу. Це дозволяє ідентифікувати потенційні проблеми на ранніх етапах і уникнути поломок чи передчасного зношування в процесі експлуатації.

CAE-технології дають змогу не лише аналізувати поточний стан виробу, але й проводити оптимізацію його параметрів. Інженери можуть підбирати матеріали, змінювати товщини, форму елементів, щоб досягти найкращого балансу між міцністю, вагою, вартістю та іншими характеристиками.

CAE-системи дозволяють враховувати широкий спектр навантажень та фізичних процесів - від статичних і динамічних навантажень до



теплових, вібраційних, гідродинамічних і електромагнітних впливів. Це дає змогу створювати більш реалістичні моделі і прогнозувати поведінку виробів у реальних умовах.

Віртуальні випробування забезпечують легкість внесення змін і тестування нових ідей. Це особливо актуально в умовах швидких змін вимог ринку або технічних завдань, коли необхідно оперативно реагувати на нові виклики.

CAE-системи часто безшовно інтегруються із CAD-системами, що дозволяє напяму використовувати 3D-моделі для аналізу. Також можливий експорт результатів для автоматизованого виробництва в САМ-середовищах. Це сприяє підвищенню ефективності робочих процесів і зменшенню помилок при передачі даних між етапами розробки.

Візуалізація результатів симуляцій у вигляді графіків, кольорових карт напружень, деформацій та інших показників допомагає інженерам, менеджерам і замовникам краще розуміти технічний стан виробу. Це полегшує обговорення і вибір оптимальних технічних рішень.

Проведення віртуальних випробувань дає змогу своєчасно виявити та усунути конструктивні недоліки, які можуть призвести до поломок, збоїв у роботі чи навіть аварій. Це підвищує безпеку використання виробів і знижує витрати на гарантійне обслуговування.

Завдяки більш швидкому, точному та економічному процесу розробки, який забезпечують CAE-технології, компанії можуть створювати більш якісні та інноваційні вироби. Це дозволяє їм займати лідируючі позиції на ринку і задовольняти зростаючі вимоги споживачів.

**Аналіз методом кінцевих елементів (MKE, Finite Element Analysis, FEA)** - найпоширеніший тип CAE-систем, який дозволяє моделювати механічні напруження, деформації, теплові процеси та інші фізичні явища в деталях і конструкціях. Цей метод розбиває складну модель на багато дрібних елементів, що дає змогу точно оцінити поведінку виробу під навантаженнями.



**Аналіз методом граничних елементів (Boundary Element Method, BEM)** - використовується для розв'язання задач, де потрібно проаналізувати вплив меж чи поверхонь, наприклад, у теплопередачі, акустиці або електромагнетизмі. На відміну від МКЕ, BEM моделює лише межі об'єкта, що знижує обчислювальну складність для певних задач.

**Аналіз методом об'ємних елементів (Finite Volume Method, FVM)** - широко застосовується для чисельного моделювання потоків рідин і газів, теплопередачі та інших процесів, пов'язаних із зміною параметрів у об'ємах. FVM поділяє простір на об'ємні елементи і дозволяє ефективно обчислювати динамічні процеси.

**Динамічний аналіз (Dynamic Analysis)** - включає моделювання руху, вібрацій, ударних навантажень, а також часових змін напружень і деформацій. Цей тип аналізу дозволяє передбачити поведінку виробу в умовах динамічних впливів, наприклад, при аварійних ситуаціях або експлуатації в умовах коливань.

**Тепловий аналіз (Thermal Analysis)** - дозволяє досліджувати розподіл температури та теплові потоки в деталях і системах. Це важливо для конструювання виробів, які працюють в умовах високих температур або потребують ефективного охолодження.

**Аналіз течії рідин і газів (Computational Fluid Dynamics, CFD)** - спеціалізований тип САЕ, що моделює рух і взаємодію потоків у системах охолодження, аеродинаміці, гідравліці. CFD дає можливість прогнозувати поведінку складних течій і оптимізувати конструкції для покращення аеродинамічних чи гідродинамічних характеристик.

**Аналіз стійкості та коливань (Stability and Modal Analysis)** - призначений для оцінки коливальних характеристик конструкцій, виявлення власних частот і форм коливань. Цей тип аналізу особливо важливий для механізмів і споруд, які повинні витримувати динамічні навантаження без руйнування.

**Оптимізаційний аналіз (Optimization Analysis)** - дозволяє



знаходити найкращі параметри конструкції, враховуючи різні обмеження та критерії ефективності, наприклад, мінімізацію ваги при збереженні міцності або зменшення вартості виробництва.

**Мультифізичне моделювання (Multiphysics Simulation)** - об'єднує декілька типів фізичних процесів (теплових, механічних, електричних, гідродинамічних) у єдиному середовищі для комплексного аналізу виробів і систем із взаємодією різних факторів.

Можна виділити наступні основні етапи проведення віртуальних випробувань конструкцій у CAE-середовищі.

Постановка задачі аналізу. На цьому етапі визначаються цілі моделювання: які характеристики конструкції потрібно дослідити (напруження, деформації, теплові поля тощо), умови навантаження, матеріали та обмеження. Важливо чітко сформулювати технічне завдання, щоб коректно налаштувати подальші етапи.

Імпорт або створення 3D-моделі. Для аналізу використовується 3D-модель виробу, створена в CAD-системі. Модель може бути імпортована або розроблена безпосередньо в CAE-середовищі. Вона повинна бути коректною, без помилок геометрії (перекриття, розриви), що можуть вплинути на якість аналізу.

Привласнення матеріальних властивостей. Кожному елементу моделі призначаються характеристики матеріалів: модуль пружності, коефіцієнт теплового розширення, щільність, межа міцності тощо. Ці дані визначають фізичну поведінку виробу при навантаженні.

Задання граничних умов. Встановлюються умови закріплення (фіксації), прикладені сили, тиски, температури або інші навантаження, що імітують реальні умови експлуатації виробу.

Мешування (розбиття моделі на елементи). Модель розбивають на численні дрібні елементи (кінцеві елементи), що забезпечує дискретизацію простору для чисельного розрахунку. Якість та щільність сітки безпосередньо впливає на точність і швидкість аналізу.



Вибір типу аналізу. Залежно від поставленої задачі обирають відповідний вид симуляції: статичний, динамічний, тепловий, вібраційний, CFD тощо.

Запуск розрахунку. Програмне забезпечення виконує чисельні обчислення, розв'язуючи складні системи рівнянь, що моделюють фізичні процеси в виробі.

Перевірка та валідація результатів. Отримані дані аналізуються на предмет коректності - перевіряють адекватність результатів, шукають можливі помилки, неточності, порівнюють із експериментальними даними, якщо вони є.

Візуалізація результатів. Результати подаються у вигляді кольорових карт розподілу напружень, деформацій, температурних полів тощо, що допомагає краще зрозуміти поведінку конструкції.

Інтерпретація та висновки. На основі аналізу роблять висновки про міцність, надійність, ефективність конструкції, визначають проблемні зони або можливості для оптимізації.

Оптимізація конструкції. Якщо потрібно, вносяться зміни у модель, повторюється аналіз для покращення характеристик виробу - зменшення ваги, підвищення міцності, поліпшення тепловідводу тощо.

Підготовка звіту. Оформляється технічний звіт з описом постановки задачі, методів аналізу, отриманих результатів та рекомендацій, який використовується для прийняття інженерних рішень або подальшого виготовлення виробу.

**ANSYS** - одна з найпотужніших і найпоширеніших CAE-платформ, що підтримує широкий спектр аналізів: механічний (FEA), тепловий, динамічний, CFD (гідродинаміка і аеродинаміка), мультифізичний аналіз. Використовується у авіації, автомобільній промисловості, енергетиці та багатьох інших галузях (рис. 2.1).

**ABAQUS** - комплексна CAE-система, відома високою точністю моделювання складних механічних процесів, включаючи нелінійну



деформацію, контактні задачі та динамічні удари. Широко застосовується у машинобудуванні та наукових дослідженнях (рис. 2.2).

**COMSOL Multiphysics** - платформа для мультифізичного моделювання, що дозволяє одночасно аналізувати теплові, механічні, електричні, хімічні процеси та їх взаємодію. Відома гнучкістю і можливістю користувацького налаштування.

**SolidWorks Simulation** - інтегрована з CAD-системою SolidWorks, надає засоби для FEA та динамічного аналізу, оптимізації конструкцій та валідації проектів безпосередньо на основі CAD-моделей (рис. 2.3).

**Autodesk Inventor Nastran** - модуль для інженерного аналізу, що поєднує можливості FEA з інтерфейсом CAD-системи Autodesk Inventor. Забезпечує аналіз міцності, вібрацій та теплових процесів.

**Siemens Simcenter** - потужний інструмент для інженерного аналізу, що включає рішення для механічного, теплового, аеродинамічного аналізу, а також системного моделювання та оптимізації.

**MSC Marc** - спеціалізований пакет для нелінійного аналізу та моделювання складних матеріалів і конструкцій, часто використовується у автомобільній та аерокосмічній промисловості.

**OpenFOAM** - відкрите програмне забезпечення для чисельного моделювання течії рідин і газів (CFD), що широко застосовується в академічних та промислових дослідженнях завдяки гнучкості та масштабованості.

CAE-системи є потужним інструментом сучасного інженера, що дозволяє проводити віртуальні випробування конструкцій ще на етапі проектування. Використання CAE дає змогу значно зменшити кількість фізичних прототипів, скоротити час і вартість розробки виробів, а також виявити потенційні недоліки конструкцій до їх виготовлення.

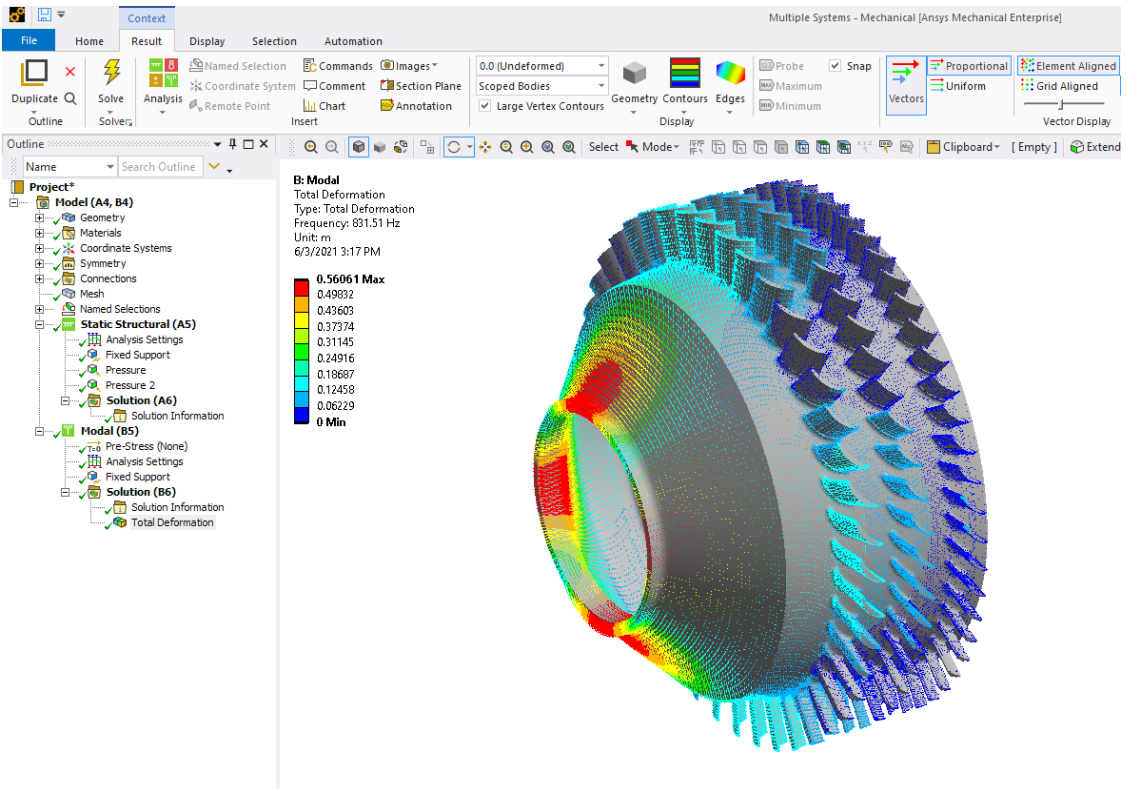


Рисунок 2.1 – ANSYS

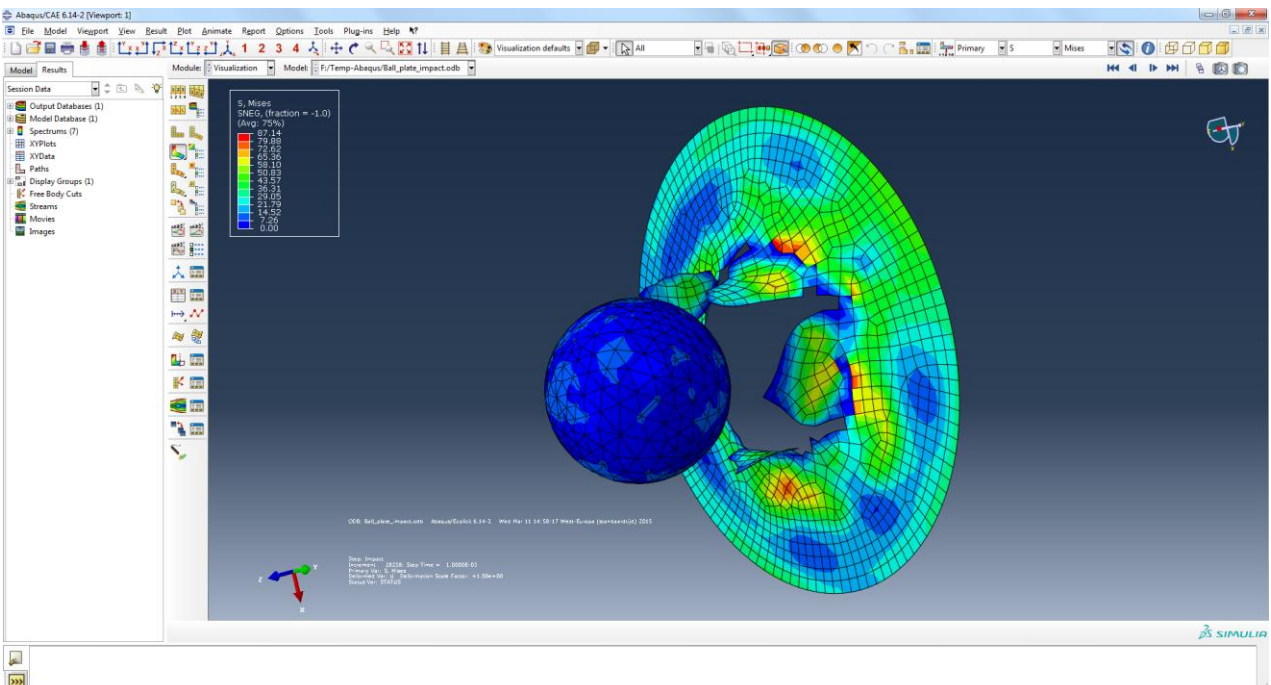


Рисунок 2.2 – ABAQUS

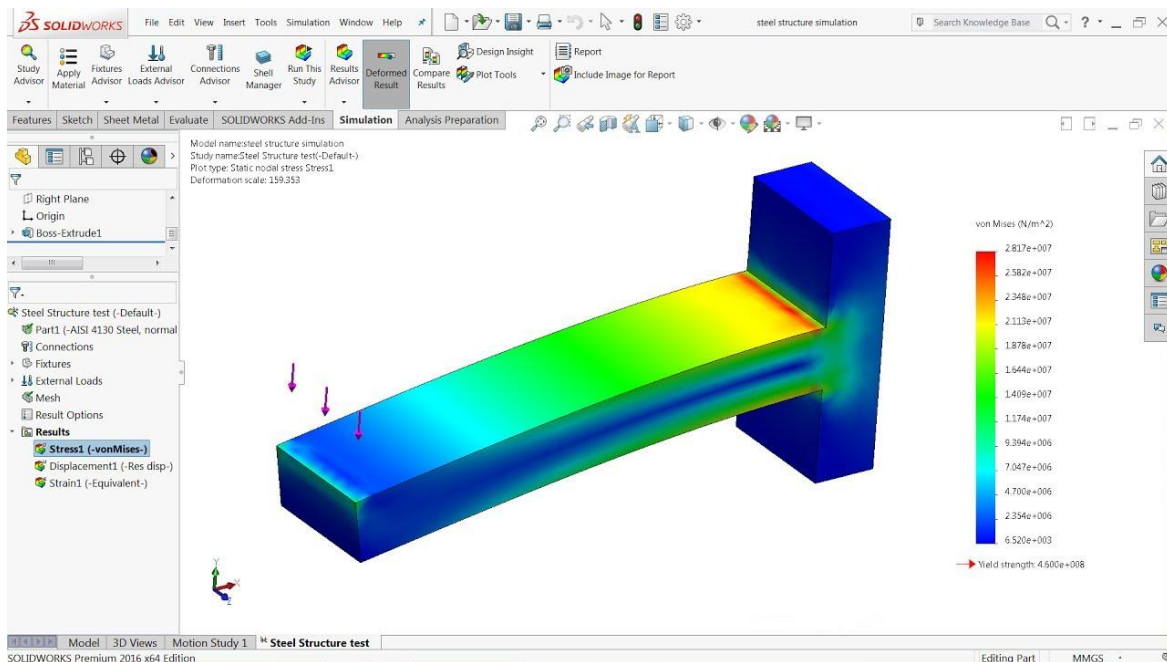


Рисунок 2.3 – SolidWorks Simulation

У середовищі **SolidWorks Simulation** доступні різноманітні типи аналізів, що дозволяють досліджувати конструкції на етапі проектування без створення фізичних прототипів. Це значно скорочує час і витрати, забезпечує виявлення слабких місць конструкцій, покращує якість і надійність виробів. Усі розрахунки ґрунтуються на методі кінцевих елементів, що дозволяє розбивати об'єкти на дрібні елементи для точного обчислення напружень, переміщень і деформацій.

**Статичний аналіз** є одним із найбільш поширених типів аналізів, що дозволяє визначити напружено-деформований стан конструкції під дією постійних або квазісталих навантажень. Статичний аналіз допомагає оцінити, чи витримує конструкція прикладені сили без переходу у пластичний стан, а також виявити зони концентрації напружень для подальшої оптимізації конструкції.

**Частотний аналіз (Modal)** використовується для визначення власних частот та форм коливань конструкцій. Цей тип аналізу необхідний для перевірки, чи не співпадають робочі частоти обладнання з власними,



щоб уникнути явища резонансу, що може спричинити руйнування конструкції або швидке зношення компонентів.

**Тепловий аналіз (Thermal)** дозволяє визначати розподіл температур у деталях і конструкціях при різних теплових навантаженнях. У SolidWorks Simulation можна виконувати як стаціонарний тепловий аналіз, де температура не змінюється з часом, так і нестаціонарний, коли потрібно оцінити вплив температурних коливань на деталі.

**Аналіз втрати стійкості (Buckling)** застосовується для визначення критичних навантажень, при яких конструкція може втратити стійкість. Це особливо важливо для довгих тонких елементів, таких як колони чи балки, де можливе поздовжнє або локальне обвалення при стисненні.

**Нелінійний аналіз** використовується у випадках, коли конструкція зазнає великих переміщень, контактних взаємодій або працює з матеріалами, що мають нелінійну поведінку (наприклад, гуми, пластики). Цей тип аналізу дозволяє врахувати складні ефекти, що виникають у реальних умовах експлуатації виробів.

**Теплово-структурна зв'язка (Thermal-Structural Coupling)** комбінує тепловий та статичний аналіз, дозволяючи визначати вплив температурного навантаження на напружено-деформований стан конструкції. Це корисно при проектуванні деталей, що працюють в умовах високих температур або нерівномірного нагрівання.

**Аналіз втоми (Fatigue)** використовується для визначення довговічності конструкції за умов циклічних навантажень, що дозволяє оцінювати, скільки циклів навантаження конструкція витримає до появи тріщин. Це важливо для деталей, що працюють у середовищах із вібраціями чи змінними навантаженнями.

**Аналіз переходових процесів (Transient)** дозволяє моделювати поведінку конструкцій у часі під дією змінних навантажень або імпульсів. Такий аналіз допомагає оцінити вплив короткочасних чи динамічних навантажень на конструкцію та виявити можливі слабкі місця.



**Аналіз контактних взаємодій** у SolidWorks Simulation дозволяє моделювати поведінку деталей у складі збірки, враховуючи сили тертя, тиск у місцях контакту та зусилля, що передаються через контактні поверхні. Це дозволяє отримати більш точну картину розподілу напружень у складних збірках.

Крім того, **оптимізаційний аналіз (Design Optimization)** дозволяє проводити підбір параметрів конструкції для досягнення найкращих показників міцності або зменшення маси конструкції за заданих обмежень. SolidWorks Simulation автоматично підбирає варіанти та дозволяє порівнювати їх між собою, що сприяє прийняттю обґрунтованих інженерних рішень на етапі проектування.

Інтеграція CAE із CAD-системами дозволяє швидко передавати 3D-моделі для аналізу, автоматично оновлювати їх при зміні геометрії та здійснювати цикли моделювання-аналізу-оптимізації для вдосконалення конструкцій. Це сприяє підвищенню точності та ефективності проектування.

Віртуальні випробування у CAE-середовищі дають можливість моделювати різні режими навантаження, перевіряти конструкції на міцність, жорсткість, стійкість, теплову стійкість, вібраційну надійність та інші характеристики, що суттєво підвищує якість і безпеку виробів.

Знання принципів роботи з CAE-системами та навички проведення аналізів є важливим компонентом професійної підготовки студентів технічних спеціальностей. Це дозволяє формувати системне інженерне мислення та вміння приймати обґрунтовані рішення під час проектування.

Таким чином, освоєння методів віртуального тестування конструкцій у CAE є необхідним етапом для сучасного інженера, який прагне створювати конкурентоспроможні та надійні технічні вироби відповідно до вимог сучасного виробництва.

## 2.2 Приклад виконання індивідуального завдання

Розглянемо розв'язання задачі статичного аналізу та її вирішення у середовищі кінцево-елементного аналізу SolidWorks Simulation, яке дозволяє визначати напружено-деформований стан конструкцій під дією зовнішніх навантажень та власної ваги. Використання SolidWorks Simulation дає змогу наочно оцінювати розподіл напружень, визначати зони максимальної концентрації та перевіряти працездатність деталі порівняно з межею плинності матеріалу, що сприяє підвищенню надійності конструкцій ще на етапі проєктування.

Розглянемо приклад завдання показаного на рисунку 2.4.

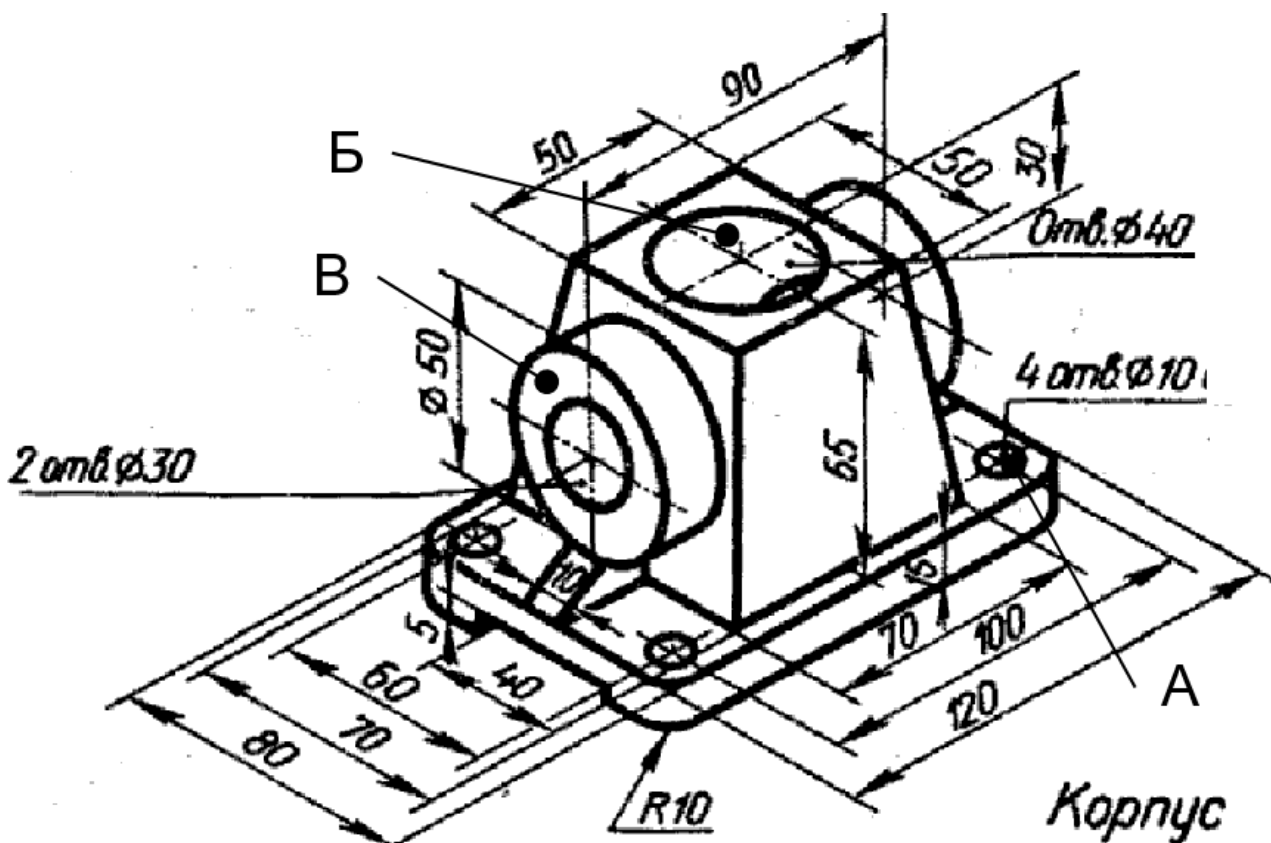


Рисунок 2.4 – Приклад завдання

Деталь жорстко зафіксована по 2 циліндричні поверхні А. На циліндричну поверхню Б діє тиск 9 МПа. На майданчик В діє зусилля 5,5



кН. Розрахунок виконати з урахуванням власної ваги. Матеріал деталі із параметрами: модуль пружності  $E=2,0 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,28$ , густина  $7850 \text{ кг/м}^3$  та межа плинності  $\sigma_T = 200$  МПа .

Створення дослідження починається з переходу на вкладку Simulation → New Study → Static (рис. 2.5), де обирається тип аналізу для виконання статичного розрахунку деталі чи збірки під дією прикладених навантажень і граничних умов, що дозволяє провести подальше налаштування сітки, матеріалів та умов закріплення для проведення кінцево-елементного аналізу.

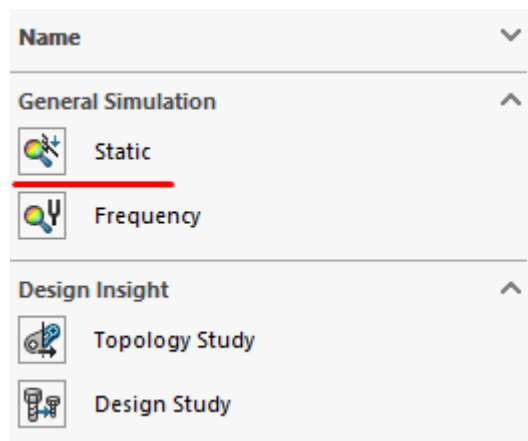


Рисунок 2.5 – Створення дослідження

Далі вибираємо матеріал із бібліотеки матеріалів SolidWorks (наприклад, сталь AISI 304) з параметрами, близькими до  $E=2,0 \times 10^5$  МПа,  $\mu=0,28$ ,  $\sigma_T=200$  МПа та відповідною густиною, що дозволяє швидко присвоїти деталі необхідні фізико-механічні властивості для подальшого проведення аналізу міцності та деформацій (рис. 2.5).

Задаємо граничні умови, жорстко фіксуючи площини кріплення деталі для імітації реальних умов закріплення у вузлі конструкції, обираючи потрібні грані чи ребра моделі, щоб обмежити переміщення у необхідних напрямках та забезпечити коректність проведення статичного аналізу (рис. 2.6).

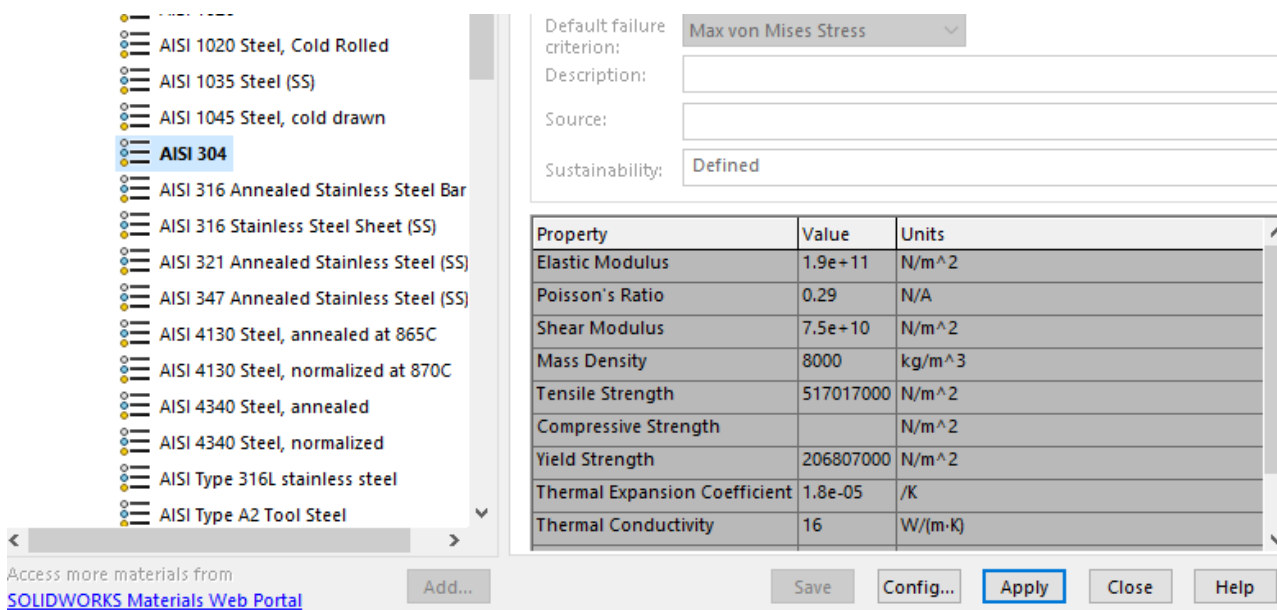


Рисунок 2.6 – Вибір матеріалу із бібліотеки

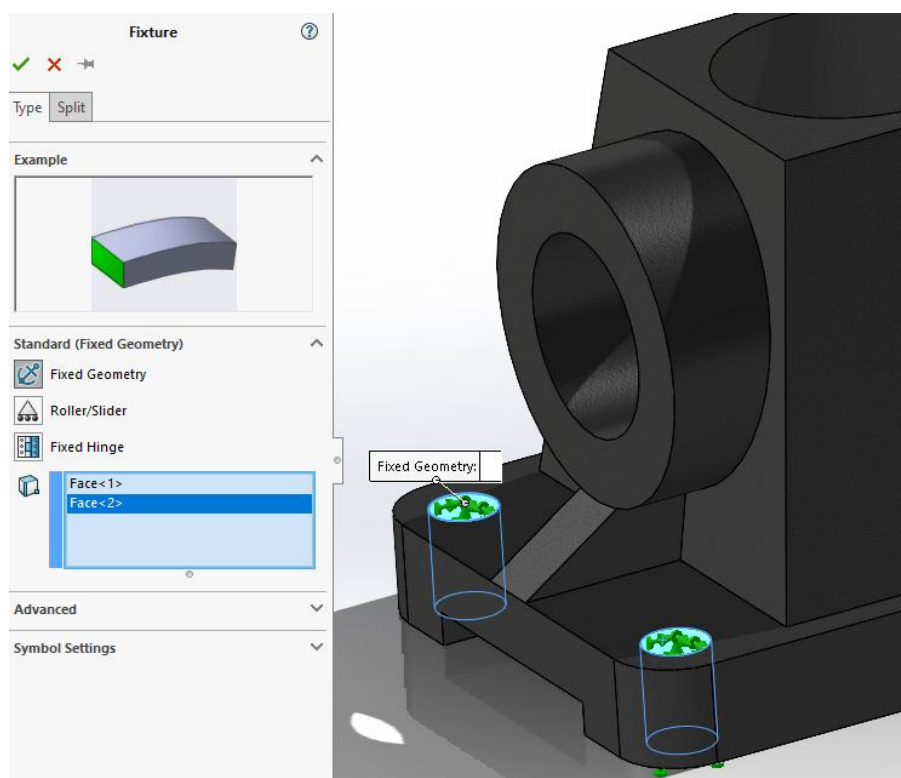


Рисунок 2.7 – Фіксація моделі

Задаємо навантаження: на циліндричну поверхню Б прикладаємо тиск величиною 9 МПа (рис. 2.8), а на майданчик В - зусилля 5,5 кН (рис.

2.9), що імітує робочі умови експлуатації деталі та дозволяє оцінити розподіл напружень і деформацій під дією заданих зовнішніх сил. Тиск у SolidWorks Simulation задається в МПа (мегапаскалях), а сила - в ньютоних (Н). Тож, якщо у вас є сила 5,5 кН, її потрібно ввести як 5500 Н.

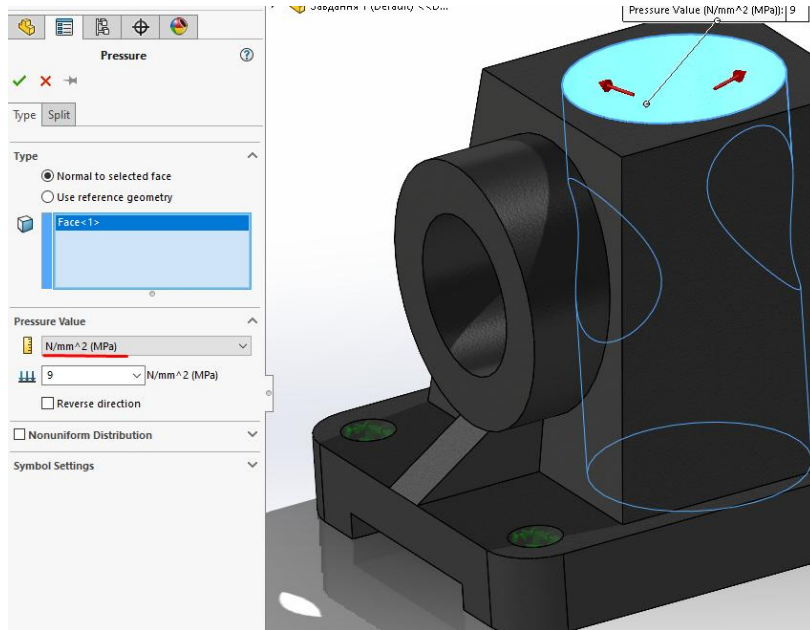


Рисунок 2.8 – Прикладання тиску величиною 9 МПа

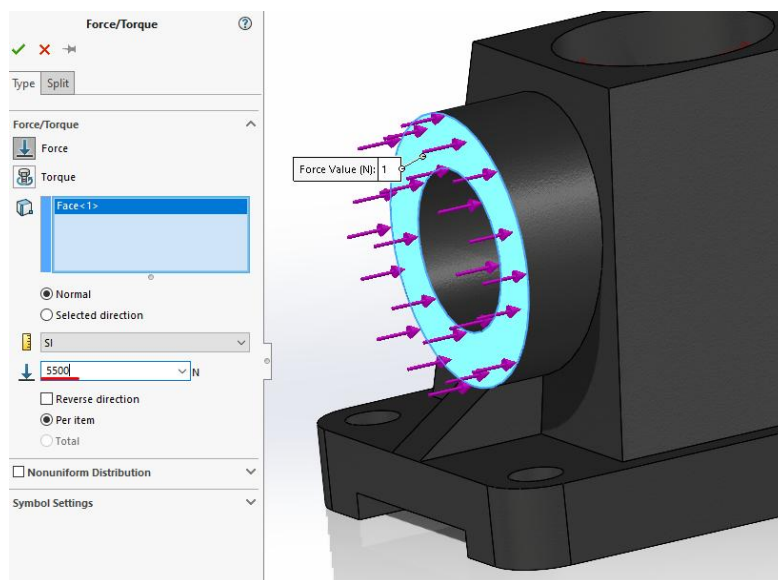


Рисунок 2.9 – Прикладання зусилля 5,5 кН

Додаємо навантаження у вигляді власної ваги деталі,

використовуючи інструмент Gravity, задаючи напрямок сили вниз (уздовж осі гравітації), щоб врахувати вплив маси конструкції на напружено-деформований стан при статичному аналізі (рис. 2.10).

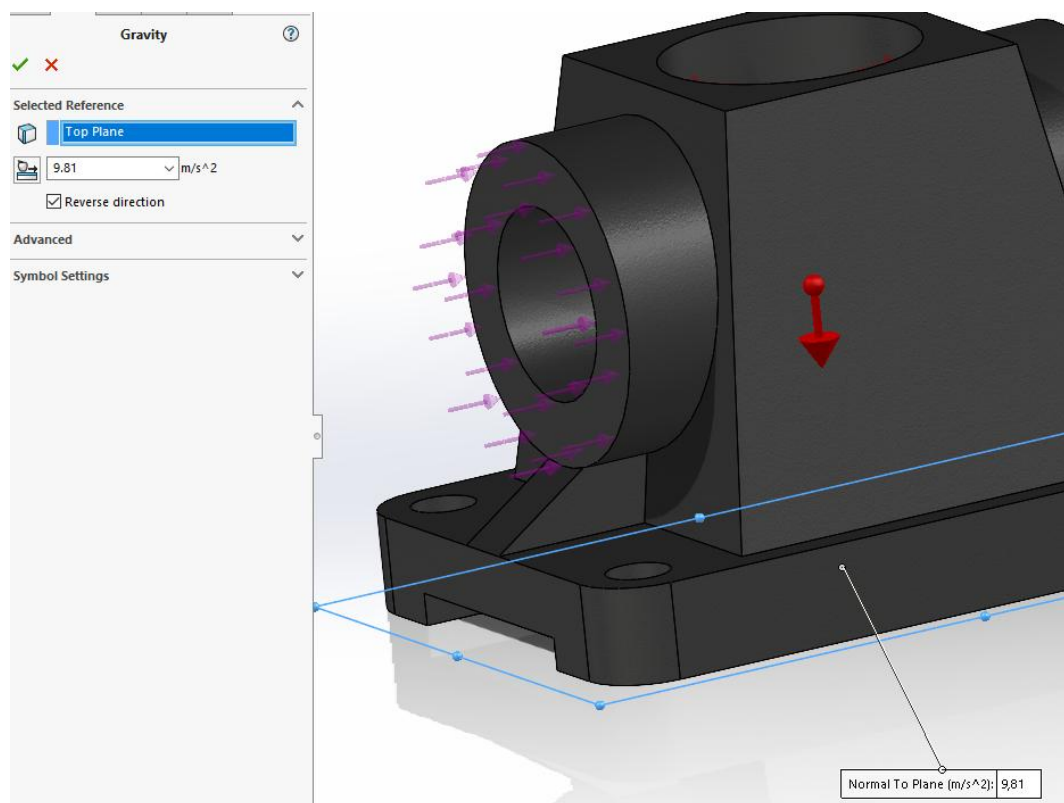


Рисунок 2.10 – Додавання навантаження у вигляді власної ваги деталі

Далі виконуємо створення сітки для кінцево-елементного аналізу, встановлюючи середній або дрібний розмір елементів (рис. 2.11).

Після побудови сітки запускаємо розрахунок, очікуємо завершення процесу аналізу, після чого переходимо до перегляду та інтерпретації отриманих результатів, включаючи розподіл напруг, деформацій і зони максимальних навантажень на деталь.

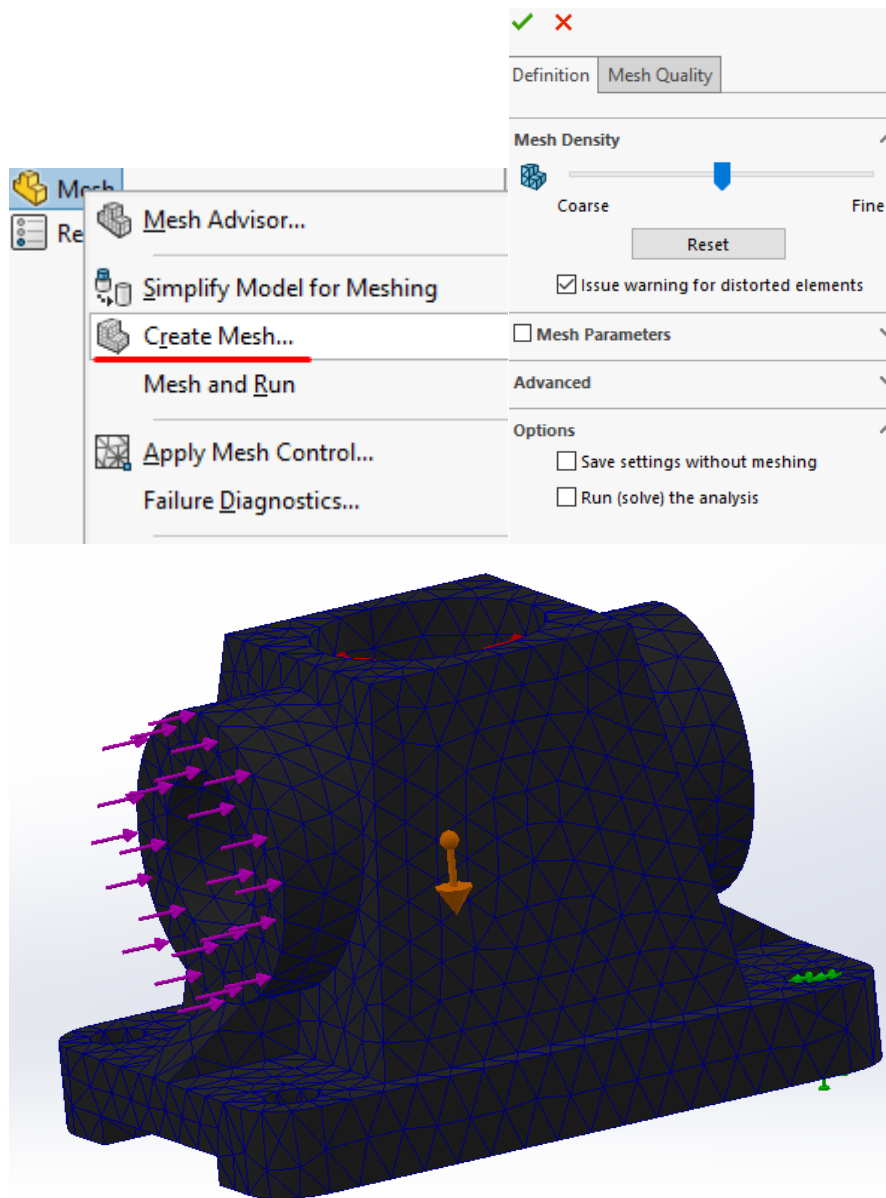


Рисунок 2.11 – Створення сітки для кінцево-елементного аналізу

Після завершення статичного аналізу у SolidWorks Simulation отримуємо три основні результати: розподіл напруги за критерієм фон Мізеса (рис. 2.12), розподіл переміщень (рис. 2.13) та розподіл деформацій (рис. 2.14). Розподіл напруги за фон Мізесом дозволяє визначити, які ділянки конструкції піддаються найбільшому навантаженню та чи не перевищують напруги межу плинності матеріалу. Аналіз розподілу переміщень показує, наскільки деталь змінює свою форму під впливом зовнішніх сил, що важливо для оцінки працездатності виробу.

Розподіл деформацій допомагає зрозуміти, які ділянки конструкції піддаються найбільшому подовженню або стисненню, що впливає на довговічність і надійність виробу.

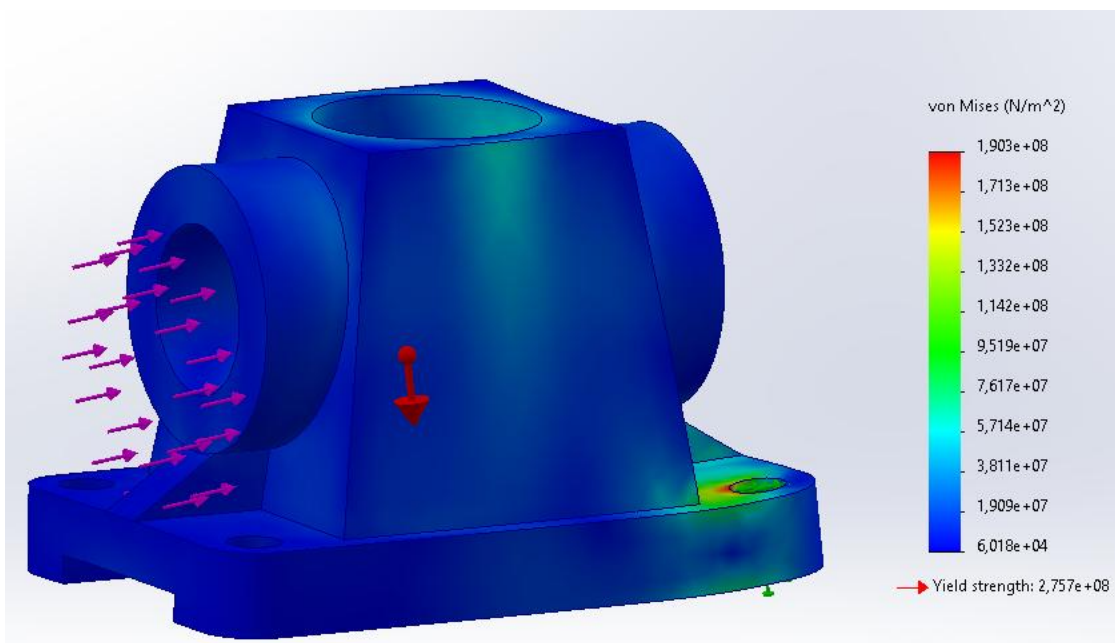


Рисунок 2.12 – Розподіл напруги за критерієм фон Мізеса

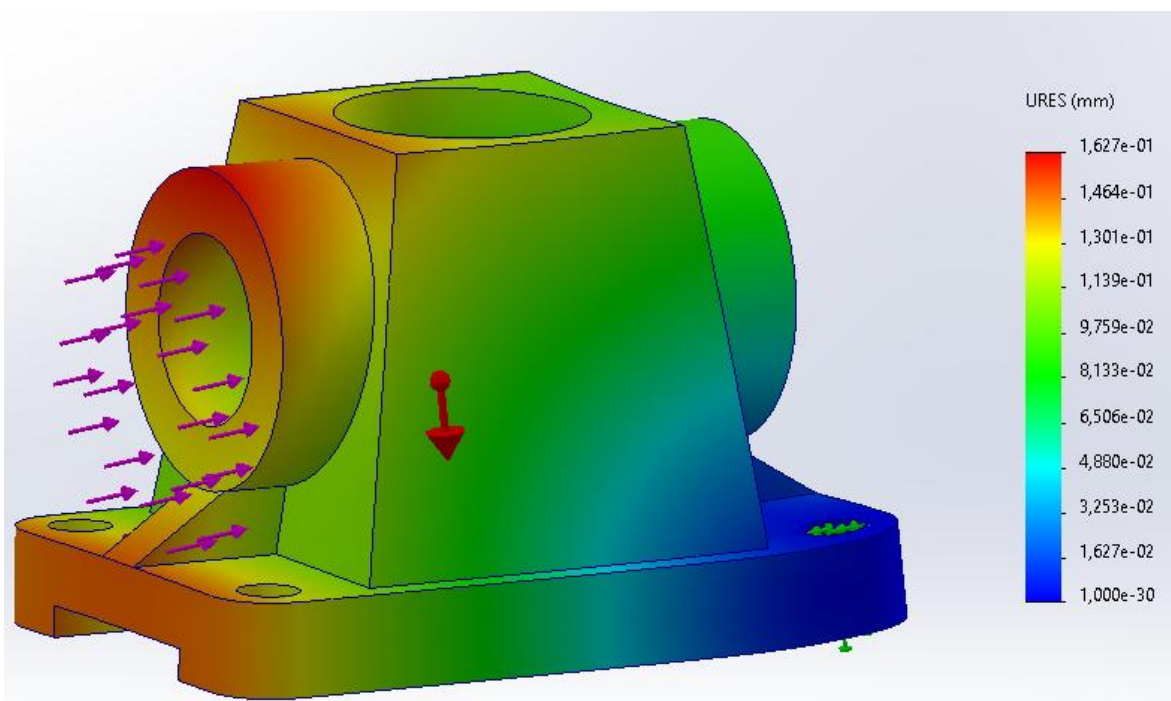


Рисунок 2.13 – Розподіл переміщень

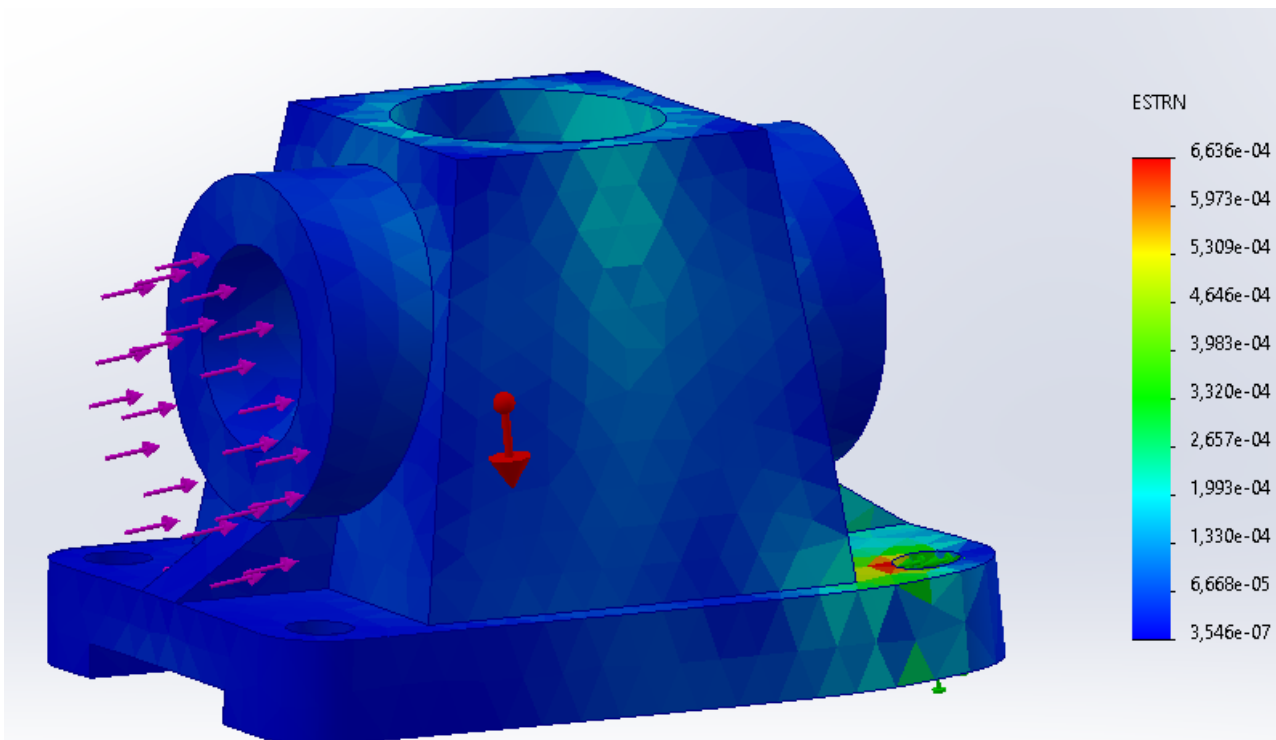


Рисунок 2.14 – Розподіл деформацій

Після завершення статичного аналізу у SolidWorks Simulation важливо ретельно проаналізувати отримані результати. Перш за все звертають увагу на розподіл напружень по моделі. Особливо важливо визначити зони найбільшої напруги, оскільки саме там існує підвищений ризик виникнення пластичних деформацій або руйнування матеріалу. Якщо максимальні напруги перевищують межу плинності сталі, це свідчить про необхідність внесення конструктивних змін або вибору іншого матеріалу.

Другим важливим аспектом є аналіз деформацій і переміщень деталі під навантаженням. Вони показують, наскільки конструкція пружна та чи не виникне критичних змін форми, які можуть вплинути на функціональність виробу. Максимальні переміщення мають бути в межах допустимих норм, визначених технічним завданням. Також варто врахувати вплив власної ваги, оскільки вона може посилити загальне навантаження і змінити розподіл напружень.

Критично важливим є визначення запасу міцності конструкції, який



показує, наскільки вона безпечна при заданих умовах експлуатації. Якщо фактор запасу міцності занижений, це означає, що деталь може не витримати робочих навантажень, і потрібно провести оптимізацію конструкції. Аналіз реакцій опор допомагає зрозуміти, які сили виникають у місцях кріплення, що є важливим для правильного закріплення деталі у вузлі.

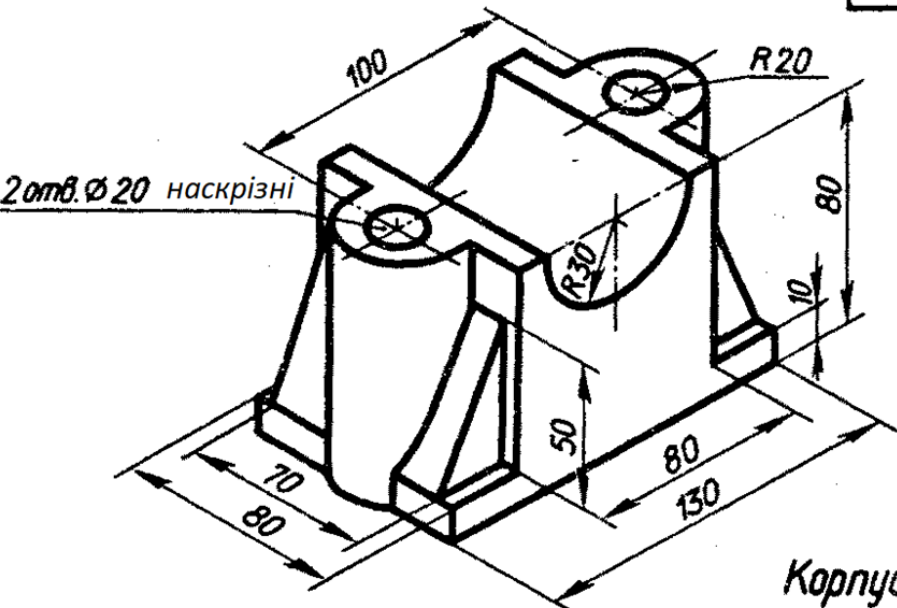
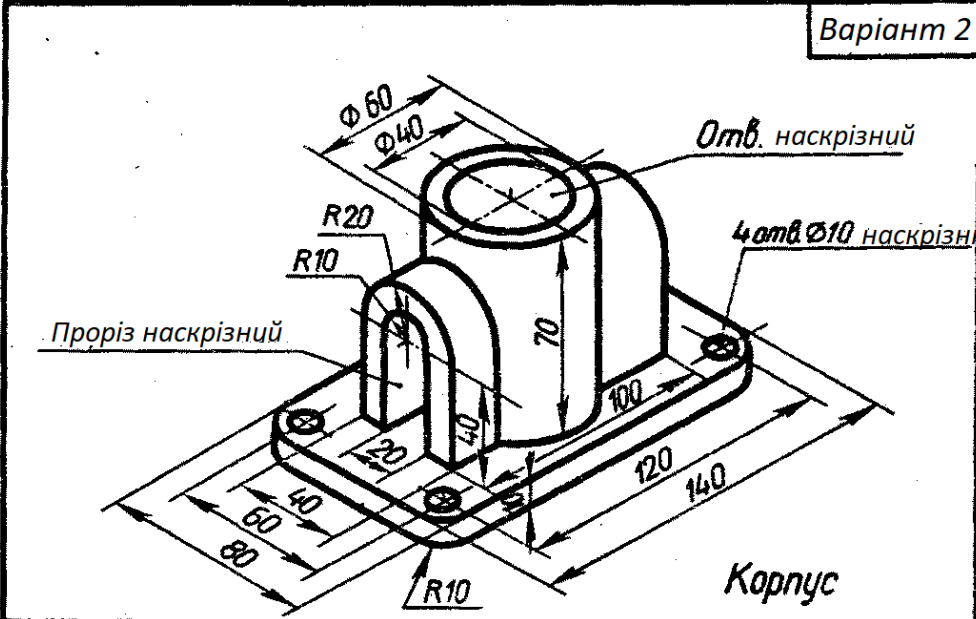
Врахування результатів аналізу вигину, скручування і розподілу напружень у критичних зонах дозволяє оцінити загальну надійність виробу та передбачити можливі проблеми у роботі конструкції. Розуміння цих аспектів є ключем до створення ефективних і довговічних технічних виробів, що відповідають заданим експлуатаційним вимогам.

Таким чином, отримані в ході моделювання дані дають змогу зробити обґрунтовані висновки щодо міцності, жорсткості та надійності виробу. За їх допомогою можна провести необхідні удосконалення конструкції, забезпечити її безпеку і оптимізувати матеріал для економії ресурсів. Це підвищує якість проектування та сприяє успішній реалізації технічних рішень.

### 3 ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ

Виконати тривимірну модель деталі відповідно до одного з варіантів наведених у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Тривимірні моделі деталей

варіант	Завдання
1	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;"><b>Варіант 1</b></div>  <p><i>2 отв. <math>\varnothing 20</math> наскрізні</i></p> <p><i>Корпус</i></p>
2	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;"><b>Варіант 2</b></div>  <p><i>Отв. наскрізний</i></p> <p><i>4 отв. <math>\varnothing 10</math> наскрізні</i></p> <p><i>Проріз наскрізний</i></p> <p><i>Корпус</i></p>

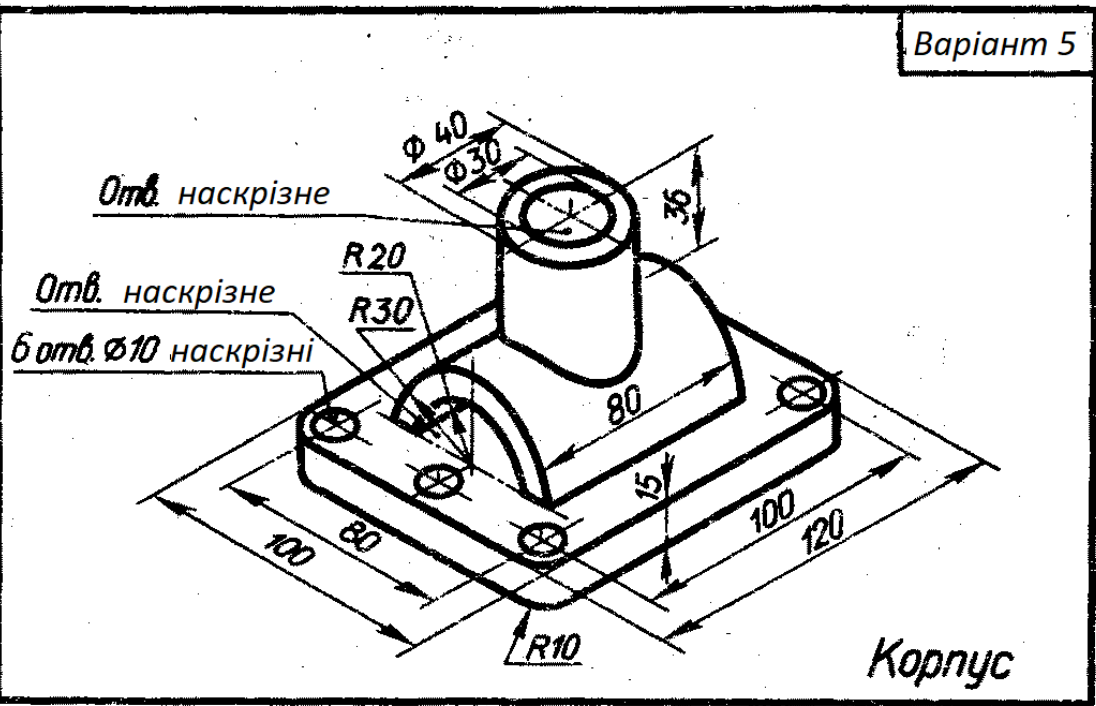
варіант	Завдання
3	<p>Основа</p> <p>Варіант 3</p> <p>0тв. <math>\varnothing 40</math> наскрізне</p> <p>2 отв. <math>\varnothing 20</math> наскрізні</p> <p>60</p> <p>18</p> <p>60</p> <p>100</p> <p>140</p> <p>15</p> <p>45</p> <p>81</p> <p>R15</p>
4	<p>Корпус</p> <p>Варіант 4</p> <p>0тв. <math>\varnothing 48</math> наскрізне</p> <p>2 отв. <math>\varnothing 32</math> наскрізні</p> <p>4 отв. <math>\varnothing 10</math> наскрізні</p> <p>100</p> <p>30</p> <p><math>\varnothing 60</math></p> <p>70</p> <p>10</p> <p>120</p> <p>140</p> <p>80</p> <p>60</p> <p>70</p> <p>R10</p> <p><math>\varnothing 40</math></p>

варіант

Завдання

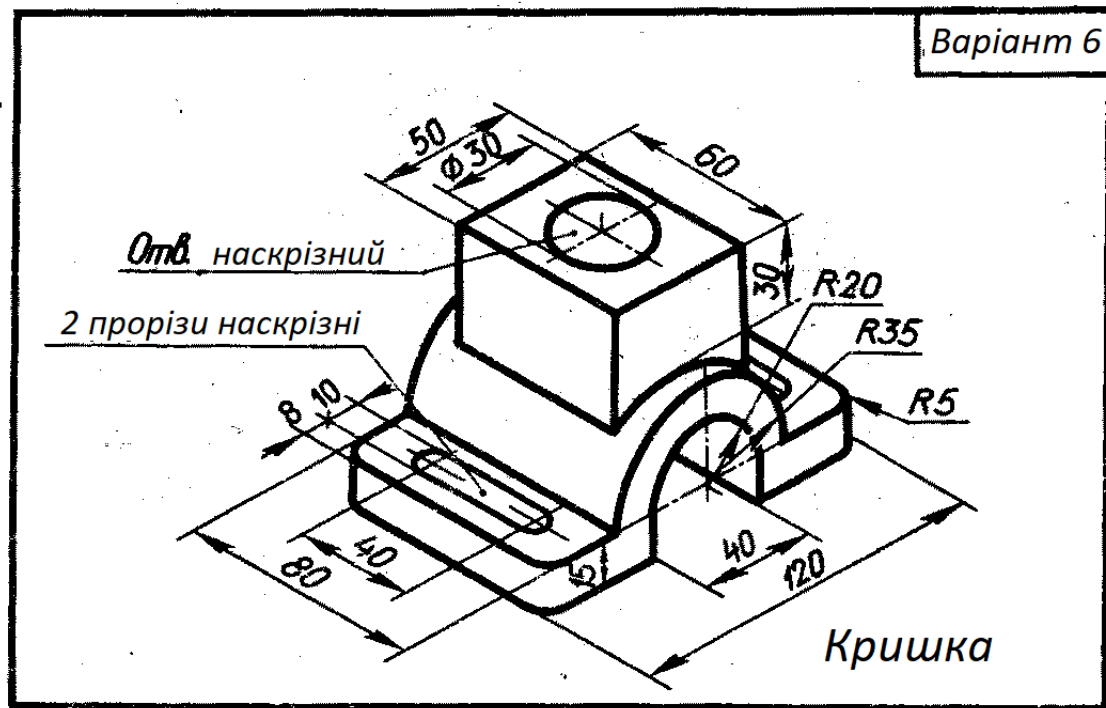
5

Варіант 5



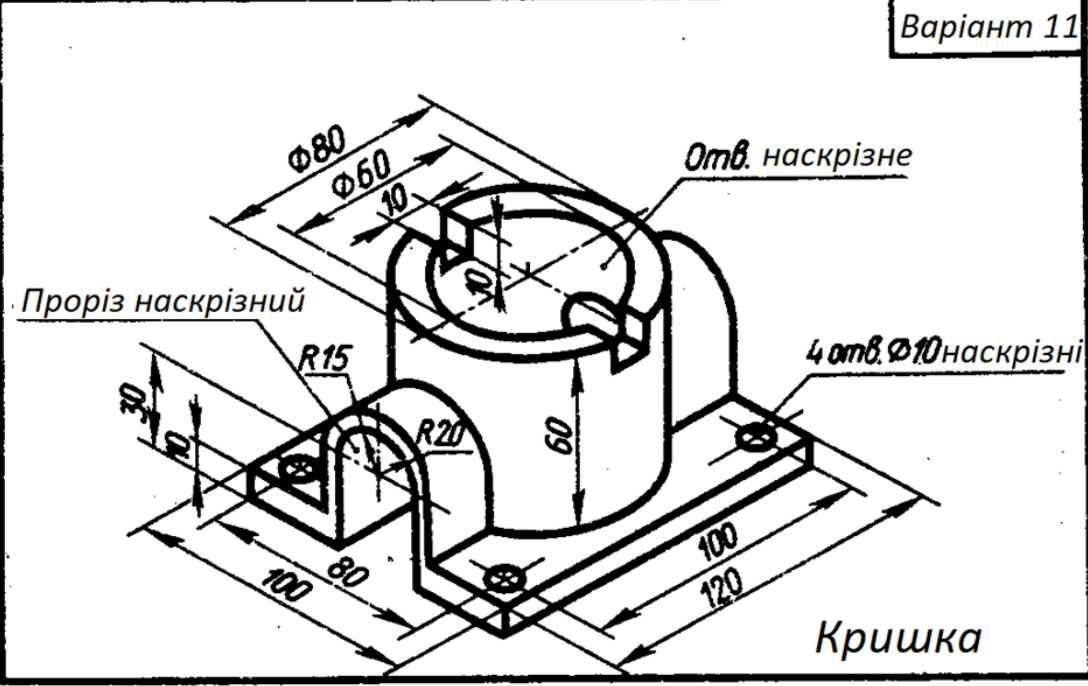
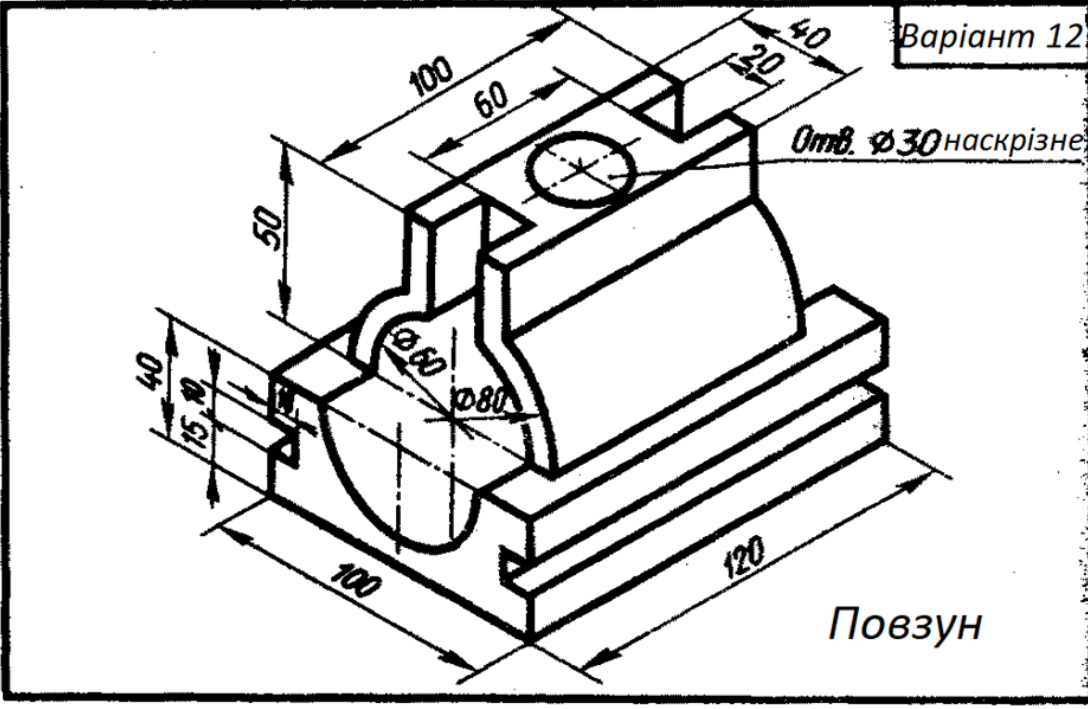
6

Варіант 6



варіант	Завдання
7	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Варіант 7</div> <p style="text-align: right;">Кришка</p>
8	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Варіант 8</div> <p style="text-align: right;">Кришка</p>

варіант	Завдання
9	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Варіант 9</div> <p>Отв. наскрізний</p> <p>4 отв. <math>\varnothing 10</math> наскрізні</p> <p>2 отв. <math>\varnothing 22</math> наскрізні</p> <p>Основа</p>
10	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Варіант 10</div> <p>2 отв. <math>\varnothing 40</math> наскрізні</p> <p>4 отв. <math>\varnothing 10</math> наскрізні</p> <p>Корпус</p>

варіант	Завдання
11	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Варіант 11</div>  <p>Проріз наскрізний</p> <p>Отв. наскрізне</p> <p>4 отв. <math>\varnothing 10</math> наскрізні</p> <p>Кришка</p>
12	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Варіант 12</div>  <p>Отв. <math>\varnothing 30</math> наскрізне</p> <p>Повзун</p>

Продовження таблиці 3.1

варіант	Завдання
13	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Варіант 13</div> <p>Отв. <math>\phi 20</math> наскрізний</p> <p>Отв. <math>\phi 80</math></p> <p>Отв. <math>\phi 60</math></p> <p>Отв. сквозное</p> <p>4 отв. <math>\phi 10</math> наскрізні</p> <p>55</p> <p>30</p> <p>15</p> <p>40</p> <p>65</p> <p>80</p> <p>60</p> <p>100</p> <p>120</p> <p>R10</p> <p>Корпус</p>
14	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Варіант 14</div> <p>Отв. <math>\phi 40</math> наскрізне</p> <p>2 отв. <math>\phi 20</math> наскрізні</p> <p>2 отв. <math>\phi 20</math> наскрізні</p> <p>60</p> <p>40</p> <p>30</p> <p>80</p> <p>20</p> <p>20</p> <p>20</p> <p>R30</p> <p>60</p> <p>Опора</p>



Виконати, відповідно до одного з варіантів наведених у таблиці 3.2, постановку задачі статичного аналізу та вирішити її засобами середовища кінцево-елементного аналізу SolidWorks Simulation. При розрахунках прийняти такі механічні характеристики матеріалу:

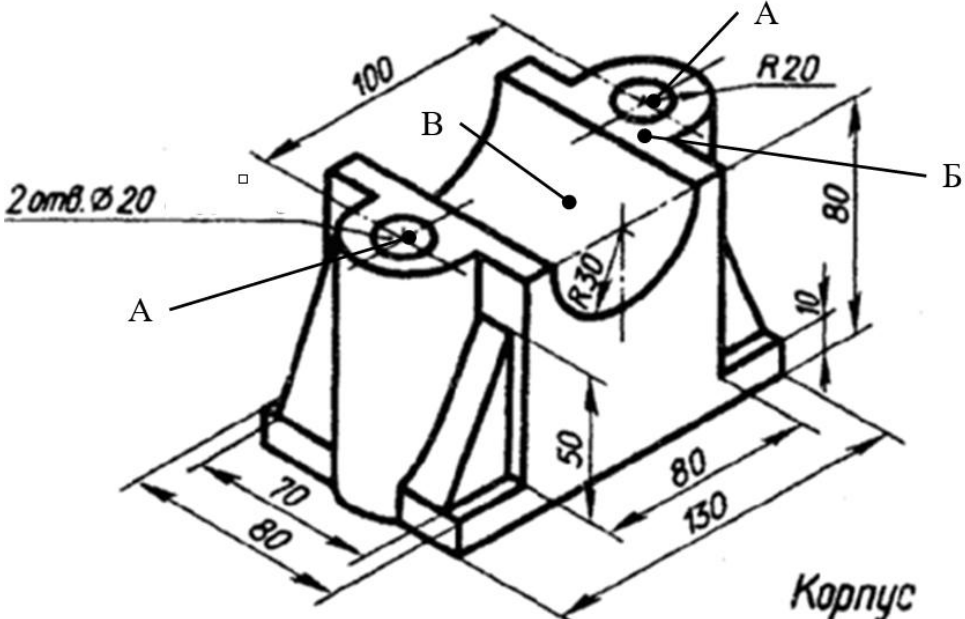
- модуль пружності  $E=1,9 \cdot 10^5 \dots 2,1 \cdot 10^5$  МПа;
- коефіцієнт Пуассона  $\mu=0,26 \dots 0,3$ ;
- межа плинності  $\sigma_T = 190 \dots 210$  МПа.

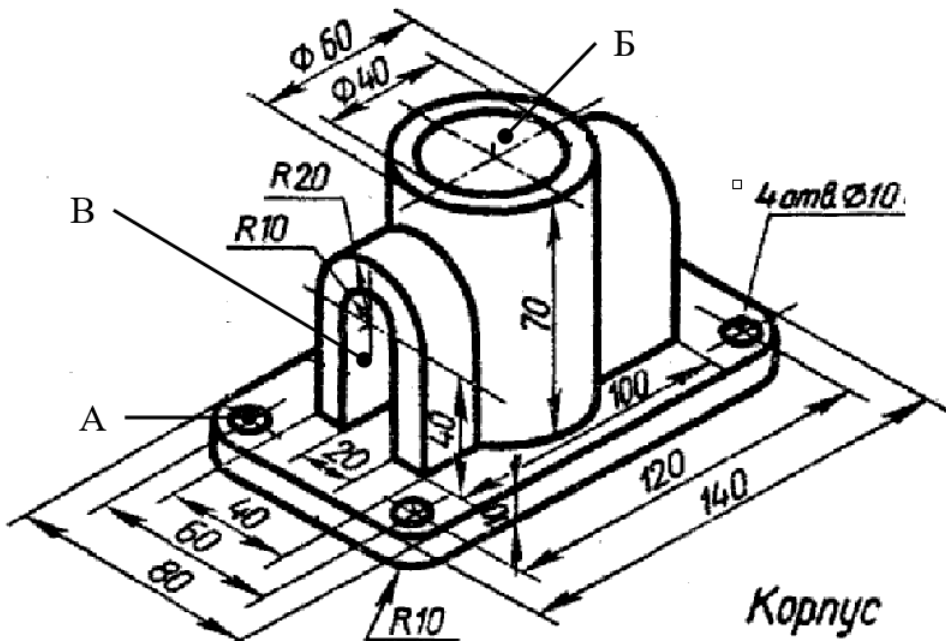
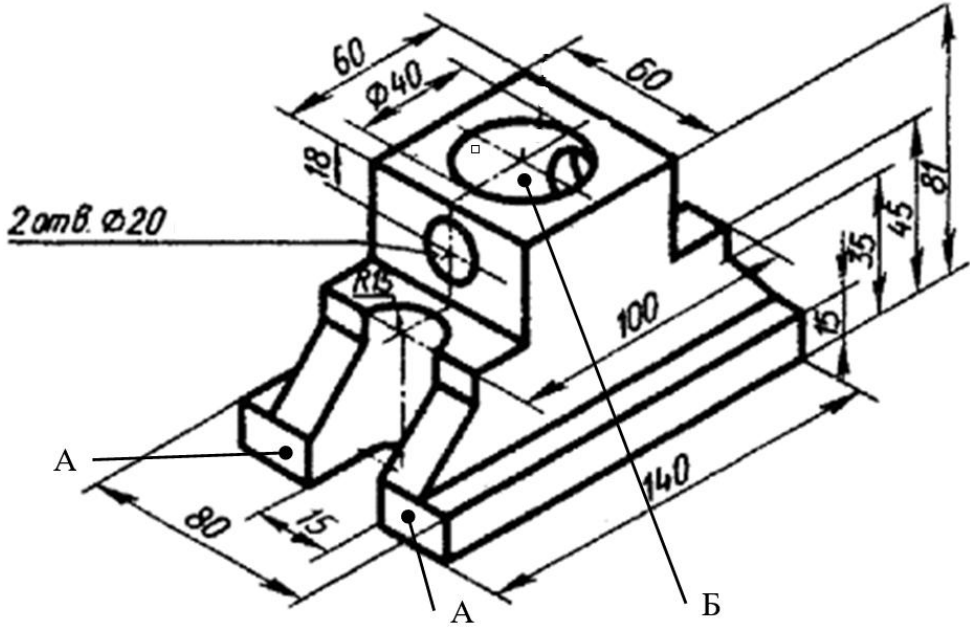
Розрахунок виконати з урахуванням власної ваги деталі.

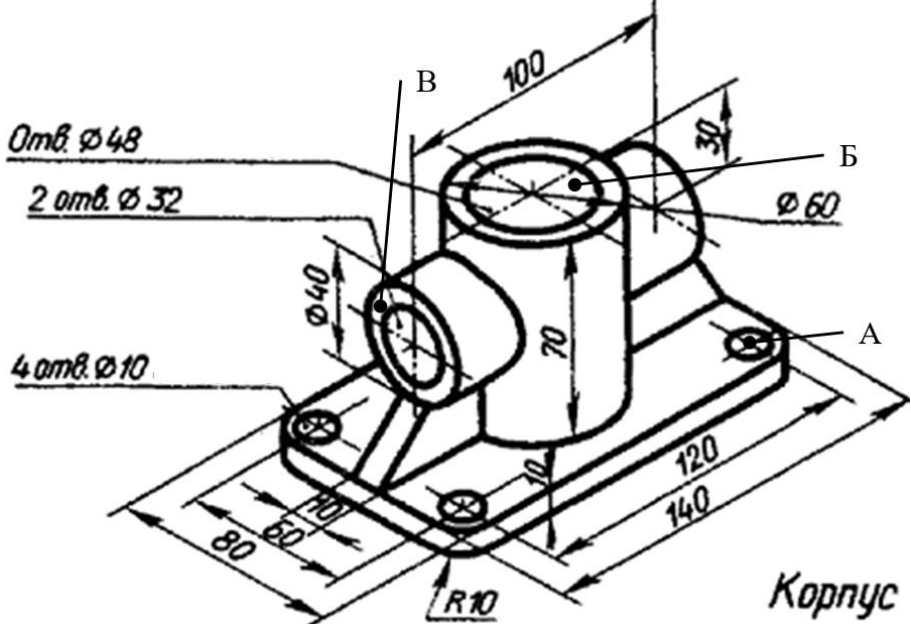
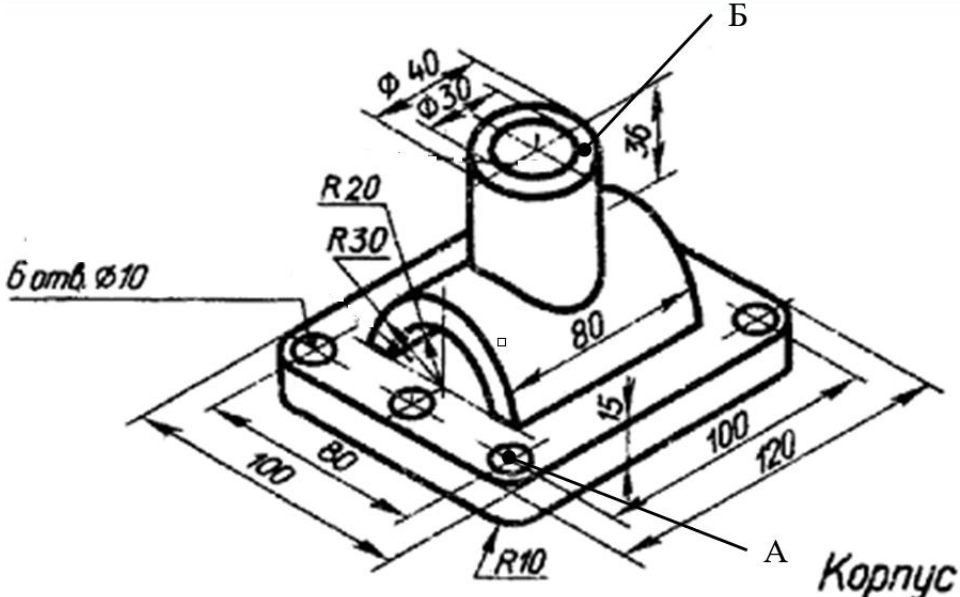
Проаналізувати отримані результати:

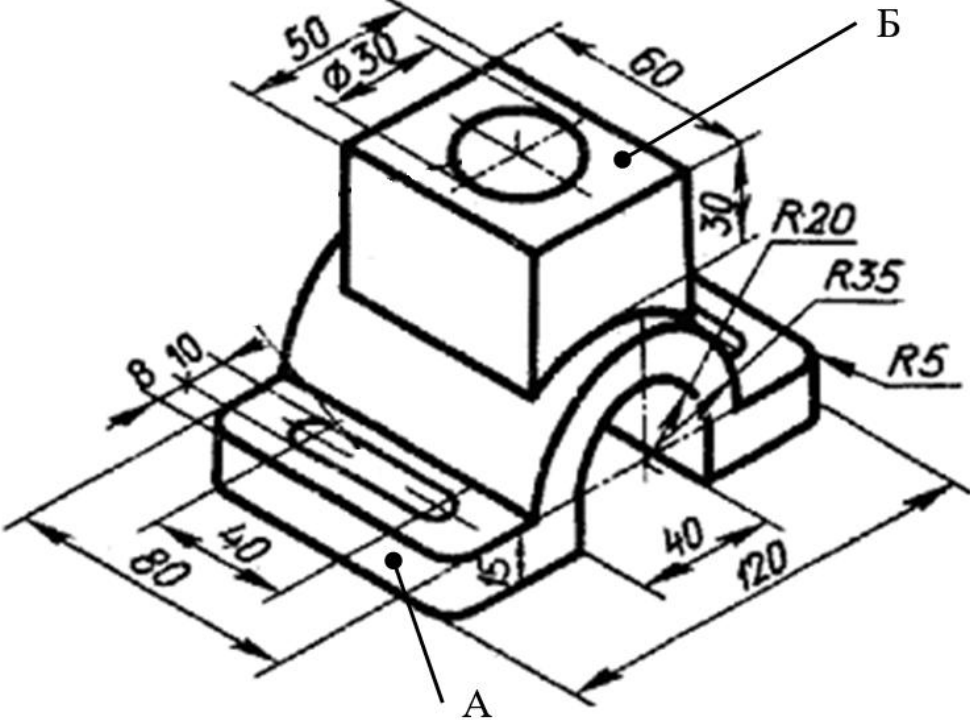
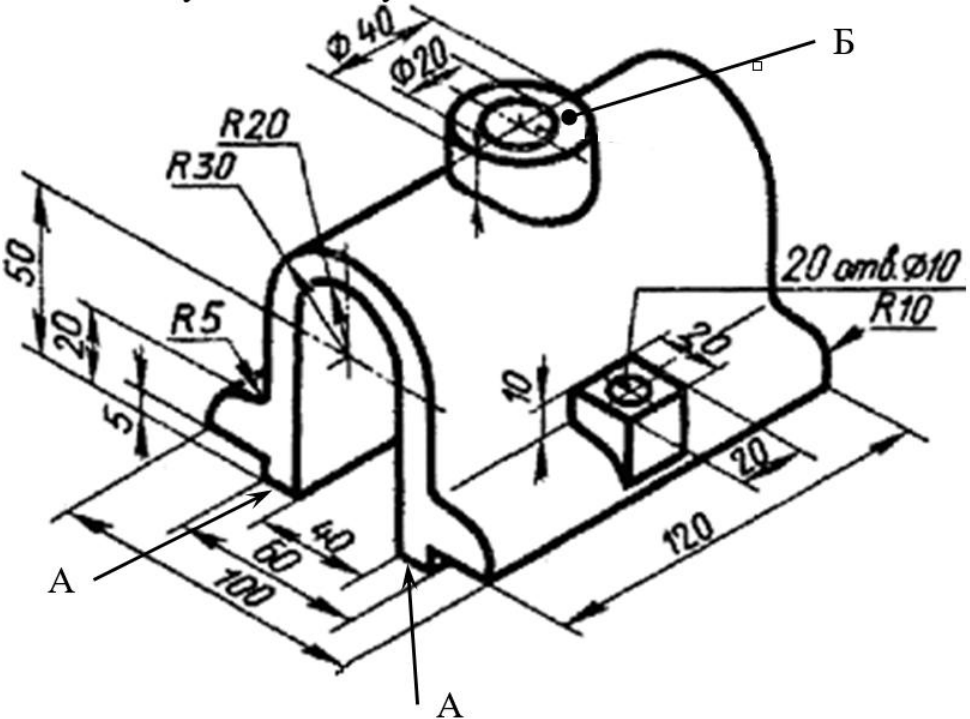
- виділити зони найбільшої напруги деталі;
- визначити розрахунковий запас міцності конструкції на підставі одного із критеріїв міцності.

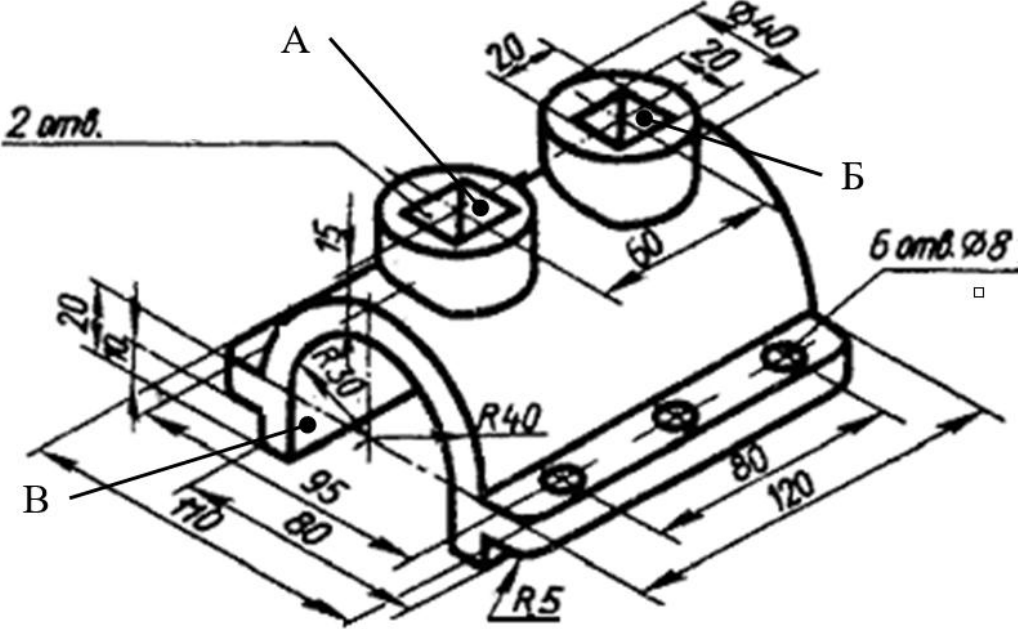
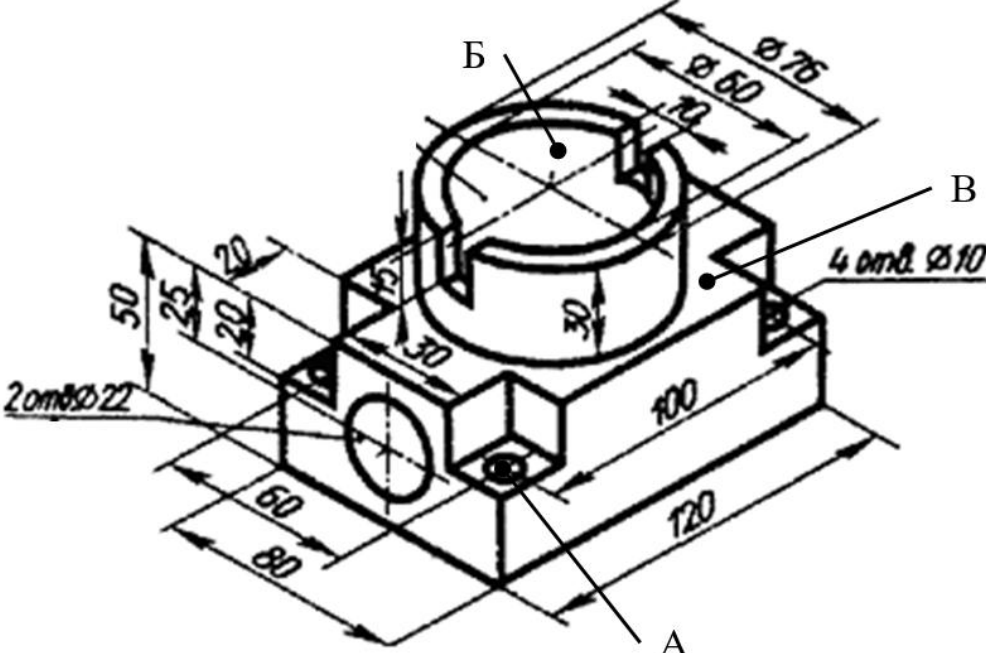
Таблиця 3.2 – Завдання для статичного аналізу

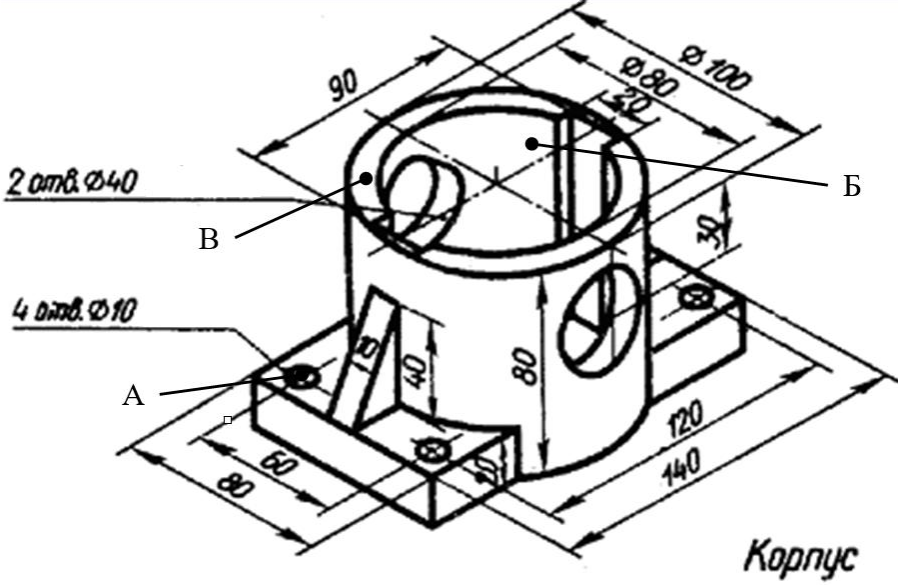
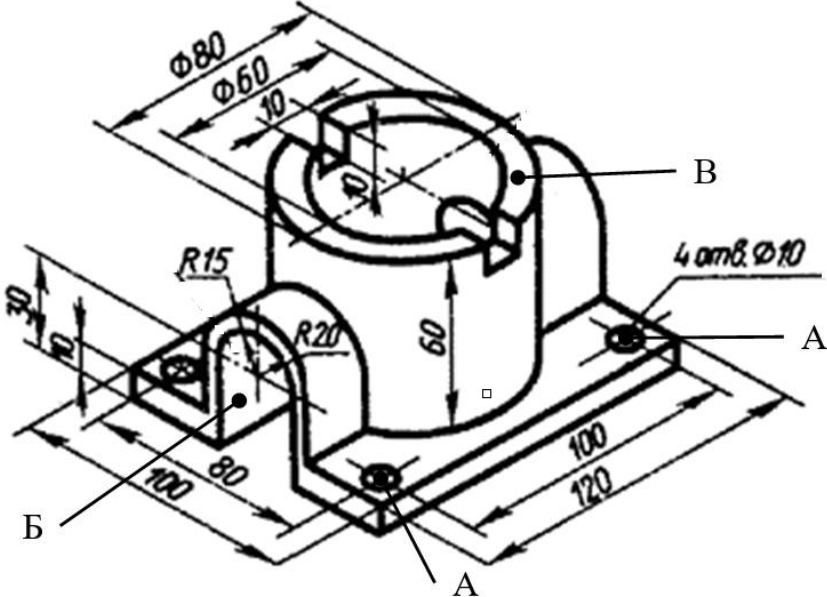
Варіант	Ескіз та параметри навантаження деталі
1	<p data-bbox="379 1167 1490 1263">Деталь жорстко зафіксована по двох циліндричних поверхнях А.</p> <p data-bbox="475 1290 1177 1330">На поверхню Б діє навантаження 80 кН.</p> <p data-bbox="475 1352 1002 1393">На поверхню діє тиск 20 МПа.</p> 

Варіант	Ескіз та параметри навантаження деталі
2	<p>Деталь жорстко зафіксована по 4 циліндричних отворах на підставі А.</p> <p>На поверхню Б діє тиск 6 МПа.</p> <p>На поверхню діє тиск 4 МПа.</p> 
3	<p>Деталь жорстко зафіксована поверхнями А.</p> <p>На циліндричну поверхню Б діє тиск 25 МПа.</p> 

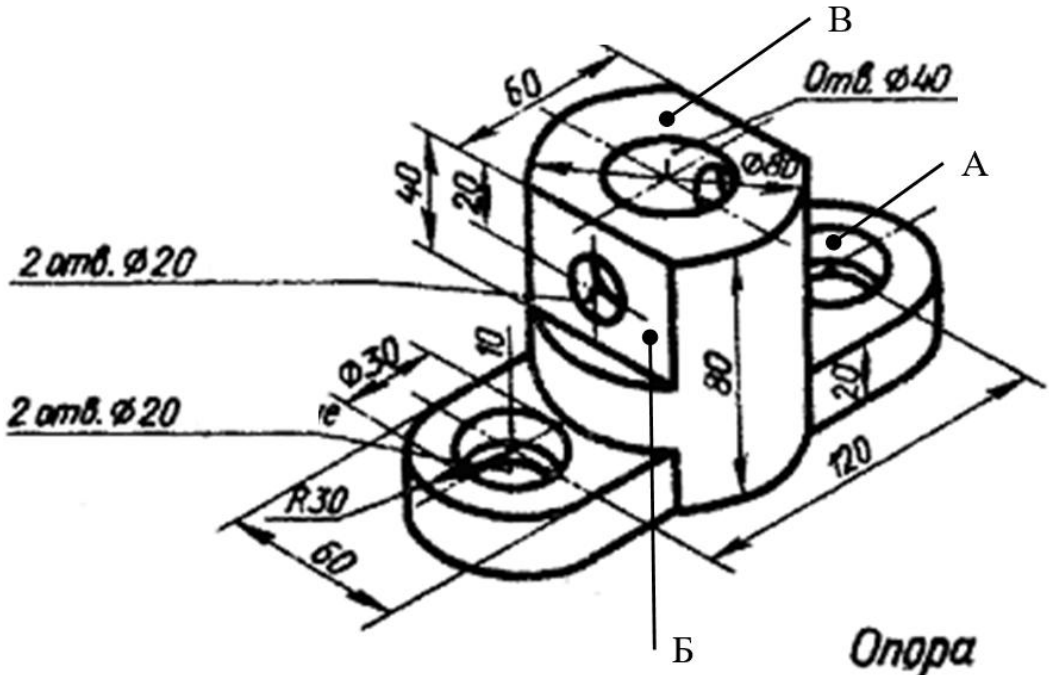
Варіант	Ескіз та параметри навантаження деталі
4	<p>Деталь жорстко зафіксована за 4 циліндричними поверхнями А.</p> <p>На циліндричну поверхню діє тиск 5 МПа.</p> <p>На кільцевий майданчик діє зусилля 15 кН</p> 
5	<p>Деталь жорстко зафіксована за 3 циліндричними поверхнями А.</p> <p>На кільцевий майданчик Б діє зусилля 7 кН</p> 

Варіант	Ескіз та параметри навантаження деталі
6	<p>Деталь жорстко зафіксована за 2 пазами А.</p> <p>На майданчик Б діє зусилля 2,2 кН</p> 
7	<p>Деталь жорстко зафіксовано по 2 поверхонь А.</p> <p>На кільцевий майданчик Б діє зусилля 70 кН</p> 

Варіант	Ескіз та параметри навантаження деталі
8	<p>Деталь жорстко зафіксована по отворах А та Б. На поверхню діє тиск 1,8 МПа</p> 
9	<p>Деталь жорстко зафіксована по двох циліндричних поверхнях А. На циліндричну поверхню діє тиск 5 МПа. На майданчик В діє навантаження 15 кН</p> 

Варіант	Ескіз та параметри навантаження деталі
10	<p>Деталь жорстко зафіксована за 4 циліндричними поверхнями А.</p> <p>На циліндричну поверхню діє тиск 8 МПа.</p> <p>На кільцевий майданчик діє навантаження 20 кН</p> 
11	<p>Деталь жорстко зафіксована по двох циліндричних поверхнях А.</p> <p>На поверхню Б діє тиск 1 МПа.</p> <p>На 2 кільцеві майданчики діє навантаження 2,5 кН</p> 



Варіант	Ескіз та параметри навантаження деталі
14	<p>Деталь жорстко зафіксована по двох циліндричних поверхнях А.</p> <p>На майданчик Б діє зусилля 40 кН.</p> <p>На майданчик В діє навантаження 20 кН</p> 



## ЛІТЕРАТУРА

1. Стефанович Т., Щербовських С. AutoCAD в комп'ютерному інжинірингу : навч. посіб. Львів : Сполом, 2021. 191 с.
2. Донченко М. В. Технології комп'ютерного проектування : навч. посіб. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2021. 364 с.
3. Ворощук В .Я., Вітенько Т. М. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем : навч. посібник. Тернопіль : ФОРМ Паляниця В.А., 2021. 164 с.
4. Барандич К. С., Подолян О. О., Гладський М. М. Системи автоматизованого проектування: конспект лекцій: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 97 с.
5. Холодняк Ю. В. Комп'ютерне проектування промислових виробів : конспект лекцій для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 131 «Прикладна механіка». Мелітополь, 2020. 140 с.
6. Sirinterlikci Ya., Ertekin A. A Comprehensive Approach to Digital Manufacturing. Springer Nature, 2023. URL: <https://read.kortext.com/library/books/2337996>
7. Computer-Aided Design, Engineering, and Manufacturing. 1st Edition. Taylor and Francis, 2019. 342 p. URL: <https://read.kortext.com/library/books/435000>
8. Etesami F. Geometric Tolerancing Standard to Machine Design. Springer Nature, 2024. URL: <https://read.kortext.com/library/books/2577273>
9. Міхеєнко Д. Ю. Впровадження використання верстата ЧПУ при викладанні дисципліни технологія комп'ютерного проектування. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. Черкаси, 2020. С.



263-254.

10. Міхеєнко Д. Ю. Інтеграція CAD-систем, 3D-друку та верстатів ЧПК у навчальному процесі кафедри комп'ютерних інформаційних технологій. *Сучасна освіта – доступність, якість, визнання* : наукові праці XV Міжнародної науково-методичної конференції, 15–16 листопада 2023 р. Краматорськ : ДДМА, 2023. С. 200-205.



*Навчально-методичне видання*

**Міхеєнко Денис Юрійович**

**CAD, CAM, CAE СИСТЕМИ:  
методичні рекомендації  
до виконання індивідуального завдання**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції