МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

До лабораторних робіт з дисципліни «CAD-CAE системи для ПТДБМ машин» для студентів спеціальності G11 "Машинобудування", освітня програма G11.05 "Транспортні засоби" / "Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання" усіх форм навчання

2026

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу “CAD-CAE системи для ПТДБМ машин” для студентів спеціальності G11 "Машинобудування", освітня програма G11.05 "Транспортні засоби"/ «Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання» усіх форм навчання / Укл.: Д.С. Козак - Запоріжжя: НУЗП, 2026. - 75 с.

Укладачі: Д.С. Козак, старш.викл.,

Рецензент: М.В. Сидоренко, доцент.

Відповідальний
за випуск: Д.С.. Козак, старш. викл.

Затверджено
на засіданні кафедри
„Деталі машин і ПТМ”
Протокол № 9
Від 03. 06. 2026 р.

Рекомендовано
до видання
НМК М-факультета
Протокол № 9
Від «09» 06 2026 р.

ЗМІСТ

1 Вступ……. 4
2 Теоретичні відомості…… 5
3 Лабораторні роботи…….. 9
Лабораторна робота №1 (2 години)
Тема: «Експрес аналіз деталей з використанням SolidWorks SimulationXpress»……..... 9
Лабораторна робота №2 (2 години)
Тема: «Статичний аналіз деталі «Кронштейн»»…… 19
Лабораторна робота № 3 (2 години)
Тема: «Аналіз шківа під навантаженням на опору»…… 35
Лабораторна робота № 4 (2 години)
Тема: «Розрахунок елементарної балки»…… 41
Лабораторна робота № 5 (2 години)
Тема: «Статичний аналіз ферми»…… 50
Лабораторна робота № 6 (2 години)
Тема: «Аналіз втрати стійкості пластини»…… 57
Лабораторна робота № 7 (2 години)
Тема: «Модальний аналіз валу»…….. 62
Лабораторна робота № 8 (2 години)
Тема: «Втомний розрахунок ходової частини»…….. 67
4 Література……... 75

1 ВСТУП

Для прискорення процесу проектування широке поширення отримали загально-конструкторські та вузькоспеціалізовані комп'ютерні системи автоматизованого проектування (САПР). На сучасному етапі розвитку засобів комп'ютерного моделювання процес проектування виробу важко уявити без використання програмних продуктів інженерного аналізу.

Характерною особливістю новітніх систем інженерних розрахунків є використання тривимірного представлення виробу, що проектується (віртуального прототипу). Поряд з цим, в останні десятиліття набуло значного поширення конструкторське 3D моделювання (підхід до проектування: модель – креслення). В результаті виникли та отримали широке поширення інтегровані тривимірні CAD/CAE (побудова/розрахунок) системи в загальній оболонці єдиної САПР, яскравим прикладом яких є *SolidWorks 2013*.

CAE-системи (*Computer-Aided Engineering*) – системи автоматизації інженерних розрахунків. За допомогою CAE-систем розробляють і застосовують раціональні математичні моделі, що мають високий рівень адекватності реальним об'єктам і реальним фізико-механічним процесам, виконують ефективне рішення багатовимірних дослідних і промислових завдань, описуваних нестаціонарними нелінійними диференціальними рівняннями в частинних похідних в просторових областях складної форми. Для ефективного вирішення цих завдань застосовуються, як правило, різноманітні варіанти сучасного, найбільш потужного і універсального чисельного методу – методу кінцевих елементів (МКЕ).

SolidWorks 2013 це тривимірна CAD/CAE САПР, що охоплює всі етапи конструювання, від побудови початкового ескізу до випуску конструкторської документації. Для *SolidWorks* розроблено потужний додаток «Simulation», що розширює його в напрямку інженерних розрахунків МКЕ.

Наявний лабораторний курс призначений для навчання студентів проведенню інженерних розрахунків в системі *SolidWorks 2013* з використанням МКЕ. Курс знайомить з основними можливостями додатку *SolidWorks Simulation*, необхідними при проектуванні ПТДБМ машин.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

В лабораторних роботах розглядається проведення розрахунків на міцність з використанням МКЕ. В теоретичній частині вказівок коротко розглядається теорія розрахунків на міцність, а також сутність МКЕ.

2.1 Зміст лінійного розрахунку на статичну міцність

Здатність матеріалу чинити опір руйнуванню є його ***міцністю***. Міцність поділяють на статичну, динамічну і втомну. Коли до тіла прикладають навантаження, воно намагається компенсувати їх вплив, створюючи внутрішні сили, які в цілому змінюються від однієї точки до іншої. ***Напруження*** – це інтенсивність цих внутрішніх сил матеріалу. Одиниці виміру напружень – сила, поділена на площу сегмента.

Еквівалентні напруження мають за мету чисельно привести об'ємний напружений стан до еквівалентного йому плаского. У *SolidWorks Simulation* використовуються еквівалентні напруження за теорією максимальної енергії формозміни (4 теорія міцності або теорія Губера-Мізеса). Незважаючи на те, що еквівалентне напруження в якійсь точці не однозначно визначає напружений стан в цій точці, воно надає достатню інформацію, щоб оцінити надійність конструкції для багатьох пластичних матеріалів. На відміну від компонентів напружень, еквівалентне напруження не має спрямування. Воно повністю визначається величиною, вираженою в одиницях напруження.

Коефіцієнт запасу міцності вказує в скільки разів наявне напруження є меншим за максимальне (початок руйнування). Для виробів машинобудування коефіцієнт запасу зазвичай береться як відношення межі текучості металу до розрахованого еквівалентного напруження. В *SolidWorks Simulation* використовується критерій текучості за теорією Мізесу, який (для конструкційних сталей) достатньо точно визначає що матеріал в точці починає переходити в стан текучості, коли еквівалентне напруження в ній досягає межі текучості матеріалу.

В розрахунках, що проводяться в рамках лабораторного курсу використовується ***припущення лінійного статичного аналізу.***

Лінійний статичний аналіз ґрунтується на допущенні лінійності, пружності і статичності:

Допущення лінійності: виникаюча реакція прямо пропорційна докладеним навантаженням. Наприклад, якщо вдвічі збільшити величину навантажень, реакція моделі (переміщення, навантаження та напруження) також збільшиться вдвічі. Допущення лінійності можна використовувати, якщо виконуються наступні умови:

- Обчислене найвище напруження має місце на лінійній ділянці діаграми напружень-деформацій, яка починається прямою лінією, що виходить з початку координат.
- Максимальне розрахункове переміщення значно менше характеристичного розміру деталі. Наприклад, максимальне зміщення плити має бути значно менше її товщини, а максимальне зміщення балки має бути значно менше її поперечного перерізу.

Якщо допущення лінійності не виконується, необхідно використовувати нелінійний аналіз.

Допущення пружності: при знятті навантажень деталь відновлює свою початкову форму (необоротна деформація відсутня).

Якщо допущення пружності не виконується, необхідно використовувати нелінійний аналіз.

Допущення статичності: навантаження додаються повільно і поступово, поки не досягнуть своїх повних значень. Різке ж додавання навантажень (удар) викликає додаткові переміщення, сили і напруження.

Якщо допущення статичності не виконується, необхідно використовувати динамічний аналіз.

Якщо всі три припущення не виконуються, результати статичного лінійного аналізу будуть невірними.

2.2 Кінцево-елементний аналіз

Метод кінцевих елементів (МКЕ) - чисельний метод рішення диференціальних рівнянь з частинними похідними, а також інтегральних рівнянь, що виникають при вирішенні завдань прикладної фізики. Метод широко використовується для вирішення задач механіки деформованого твердого тіла: статики, коливань, стійкості, динаміки і міцності, – а також для задач теплообміну, гідродинаміки, електродинаміки, акустики.

Сутність МКЕ: область, в якій шукається рішення диференціальних рівнянь, розбивається на кінцеву кількість підобластей (елементів). У кожному з елементів довільно вибирається вид апроксимуючої функції (у найпростішому випадку це поліном першого ступеня). Поза свого елемента апроксимуюча функція дорівнює нулю. Значення функцій на границях елементів (у вузлах) є вирішенням завдання і заздалегідь невідомі. Коефіцієнти апроксимуючих функцій зазвичай шукаються з умови рівності значення сусідніх функцій на границях між елементами (у вузлах). Далі ці коефіцієнти виражаються через значення функцій у вузлах елементів. Складається система лінійних алгебраїчних рівнянь. Кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих значень у вузлах, на яких шукається рішення вихідної системи, тобто вона прямо пропорційна кількості елементів і обмежується тільки можливостями ЕОМ. Система вирішується комп'ютером. Так як кожен з елементів пов'язаний з обмеженою кількістю сусідніх, система лінійних алгебраїчних рівнянь має розріджений вигляд (багато нулів), що істотно спрощує її рішення.

Як правило, кінцево-елементні моделі надскладних конструкцій і механічних систем містять 10^5 … 25×10^6 ступенів волі, що відповідає порядку системи диференціальних або алгебраїчних рівнянь, яку необхідно вирішити.

З розвитком обчислювальних засобів можливості методу постійно розширюються, також розширюється і клас вирішуваних завдань.

Більш докладно зупинимось на ***процесі створення сітки кінцевих елементів.*** При підготовці моделі для аналізу, програма ділить модель на кілька простих багатогранних форм (в *SolidWorks Simulation 2013* використовуються тільки 4-грані елементи). Як зазначалось вище, спільні точки елементів називаються вузлами. Типовий кінцевий елемент показано на (рис. 2.1).

Червоні точки позначають вузли елементу. Елементи можуть мати вигнуті або прямі кромки. У кожного вузла є три невідомих переміщення в напрямку трьох осей. Процес поділу деталі на елементи і є процесом створення сітки. Зазвичай, елементи меншого розміру дозволяють виконати більш якісний аналіз, але вимагають більше комп'ютерних ресурсів і часу.

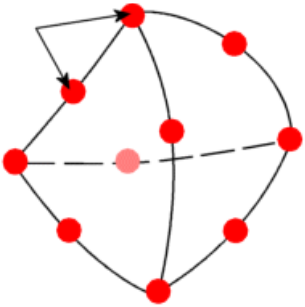


Рисунок 2.1 – Типовий кінцевий елемент

SolidWorks Simulation пропонує задати розмір глобального елементу, допуск для створення сітки та деякі інші налаштування. Розмір є тільки середнім значенням бо розміри реальних елементів у різних місцях можуть відрізнятися залежно від геометрії. Сітку кінцевих елементів можна значно згустити в зонах, де необхідна підвищена точність результатів.

3 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторна робота №1 (2 години)
Тема: **«Експрес аналіз деталей з використанням SolidWorks SimulationXpress»**

У даній ЛР використовуються прості моделі гака та рукояті управління для ознайомлення з наступними підтемами:
- Запуск SolidWorks SimulationXpress;
- Вивчення основних кроків аналізу проектних рішень;
- Оцінка міцності конструкції;
- Оцінка точності результатів;
- Редагування деталі.

1.1 Розрахунок гака

1.1.1 Налаштування аналізу

Гак, виготовлений з легованої сталі, закріплюється в отворі. На нього діє навантаження силою 680 кг (1500 фунтів), як показано на рисунку 1.1.

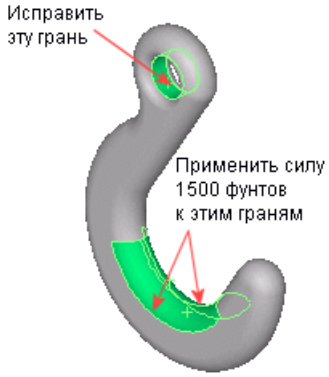


Рисунок 1.1 – Тривимірна модель гаку

- Відкрийте «каталог_установки / samples / tutorial / cosmosxpress / aw_ hook.sldprt».

- Виберіть «Файл / Зберегти як» і збережіть файл деталі з ім'ям «aw_hook - test.SLDPRT» в вашій персональній папці. Це дозволить знову використовувати вихідний файл.
- Натисніть «Майстер аналізу SimulationXpress» або виберіть «Інструменти / SimulationXpress». Запускається помічник *Simulation Xpress*.
- На вкладці «Ласкаво просимо» встановіть одиниці виміру «за замовчуванням для SimulationXpress», вкажіть папку для збереження результатів аналізу і встановіть налаштування епюр результатів.

Для вибору параметрів аналізу:
- Виберіть «Параметри».
- Встановіть в параметрі «Одиниці виміру» систему СІ.
- Натисніть на «…», щоб перейти до папки , в якій необхідно зберегти результати аналізу, і натисніть на кнопку «ОК».
- Виберіть «Показувати примітку для максимума и минимума в епюрах результатів».
- Натисніть «ОК».
- Натисніть на кнопку «Далі».
- У даній таблиці (табл. 1.1) показані величини, які використовуються в *SimulationXpress* і відповідні одиниці вимірювання в різних системах одиниць вимірювання.

Таблиця 1.1 – Величини, які використовуються в SimulationXpress.

		СИ	**Англійська (IPS)**
Навантаження	Сила	Н (Ньютон)	фунт
	Тиск	Н/м²	фунт на квадратний дюйм (фунт/дюйм²)
Властивості матеріалу	EX:Модуль пружності	Н/м²	фунт на кв. дюйм
	NUXY:Коефіцієнт Пуассона	_	_
	SIGYLD:Межа текучості	Н/м²	фунт на кв. дюйм
	DENS:Масова щільність	Кг/м³	фунт/дюйм³
Результати	Еквівалент напруження (по Мізесу)	Н/м²	фунт на кв. дюйм

1.1.2 Застосування кріплень та навантажень

Крок «Кріплення» дозволяє вам вказати, як підтримується деталь.

Щоб зафіксувати грань отвору:

- Виберіть «Добавте кріплення».
- У графічній області натисніть на грань отвору. «Грань <1>» відобразиться в полі вибору в *PropertyManager* – «Кріплення», а позначення кріплення з'являться на обраної грані.
- Натисніть ОК. «Фіксований-1» відобразиться в «дереві дослідження» *SimulationXpress*, і галочка відобразиться поруч з папкою «Кріплення» у верхній панелі помічника SimulationXpress, що означає, що даний крок завершено.

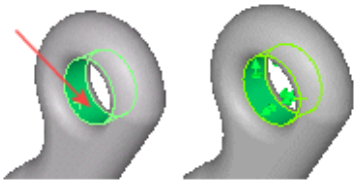


Рисунок 1.2 – Закріплення гака

- Виберіть «Далі». З'явиться крок «Навантаження»
- Тепер докладемо зусилля 1360,8 кг в напрямку вниз.

Щоб прикласти силу:

- Виберіть «Добавте силу».
- У графічній області виберіть дві грані, як показано на рис. 1.3:

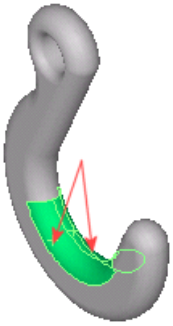


Рисунок 1.3 – Ділянка прикладання навантаження на гак

- Грань <1> і Грань <2> відобразяться в поле вибору в *PropertyManager* «Сила».
- Виберіть «Вибраний напрямок».
- У дереві конструювання *FeatureManager* натисніть *Plane2* (Плоскость2).
- Параметр «Плоскость2» відобразиться в поле «Площина для напряму». Зверніть увагу, що напрямок сили – вгору.
- Виберіть «Реверс напрямку». Напрям сили зміниться (рис. 1.4).

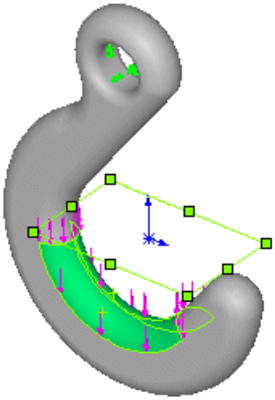


Рисунок 1.4 – Напрям дії сили

- Введіть 680,4 кг як значення сили.
- *SimulationXpress* прикладає навантаження 680,4 кг до кожної обраної грані, що в цілому становить 1360,8 кг.
- Натисніть «ОК». «Сила-1» відобразиться в дереві дослідження *SimulationXpress*, і галочка відобразиться поруч з папкою «Навантаження» у верхній панелі помічника *SimulationXpress*, що означає, що даний крок завершено.
- Виберіть «Далі». З'явиться крок «Матеріал».

1.1.3 Задання матеріалу

У цьому кроці призначається матеріал для деталі з бібліотеки матеріалів *SolidWorks*. Крюк виготовляється з легованої сталі.

Щоб призначити леговану сталь для деталі:

- Виберіть параметр «Виберіть матеріал».

- У діалоговому вікні «Матеріал»:
  а) Розгорніть розділ «Матеріали SolidWorks».
  б) Розгорніть категорію «Сталь».
  в) Виберіть «Легована сталь».
- Натисніть «Застосувати», потім натисніть «Закрити».
- *SimulationXpress* застосовує леговану сталь до деталі. Легована сталь відображається в помічнику *SimulationXpress*, і галочка відображається поруч із параметром «Матеріал» у верхній панелі помічника SimulationXpress, що позначає, що цей крок виконаний.
- Виберіть «Далі». Відображається крок «Запуск».

1.1.4 Проведення розрахунку

Щоб виконати аналіз деталі:

- Натисніть кнопку «Запуск моделювання», щоб прийняти параметри кінцево-елементної сітки «за замовчуванням». Почнеться аналіз і з'явиться індикатор виконання.
- По завершенні аналізу в графічній області відображається анімація деформованої деталі, і галочка відображається поруч з розділами «Запуск» і «Результати» в помічнику *SimulationXpress*.
- Після перегляду анімації виберіть «Зупинка анімації».
- Виберіть «Так, продовжити», щоб переглянути результати.

У вікні «Результати» відображається мінімальний запас міцності моделі, рівний приблизно 7,6, що означає, що модель не повинна бути пошкоджена при зазначених навантаженнях і обмеженнях.

1.1.5 Зміна розміру елемента КЕ сітки

Щоб дослідити ефект зміни розміру елемента за отриманими результатами, можна змінити розмір елемента за замовчуванням і знову проаналізувати деталь.

Щоб змінити розмір елемента і знову проаналізувати деталь:

- Натисніть «Запуск» у верхній частині помічника *SimulationXpress*.
- Виберіть «Змінити налаштування».
- Виберіть «Змінити щільність сітки». Повідомлення попереджає вас про те, що повторне створення сітки призведе до видалення результатів.
- Натисніть «ОК», щоб закрити вікно попередження.

- У *PropertyManager* «Сетка» в розділі «Щільність сітки» перетягніть регулятор в крайнє праве положення.
- Натисніть ОК, щоб повторно створити сітку моделі.
- Натисніть кнопку «Далі».
- Виберіть «Запуск» *Simulation* для повторного запуску аналізу .

Новий запас міцності дорівнює 7,7, що відрізняється від оригіналу 7,6 приблизно на 2%. Ця невелика різниця означає, що попередні результати є достатньо точними.

1.1.6 Перегляд епюри еквівалентних напружень

Щоб переглянути напруження у помічнику «SimulationXpress» виберіть «Відобразити напруження von Mises». Програма відображає епюру еквівалентних напружень.

Епюра напружень створюється на деформованій формі. Для ілюстрації деформованої форми *SimulationXpress* змінює масштаб максимальної деформації на 10% щодо діагоналі граничної рамки.

Відображаються примітки для максимального і мінімального напружень по Мізесу, оскільки вони були обрані в «Параметрах», а маркер межі текучості відображається в нижній частині легенди епюри.

- Оберіть «Відображення анімації», щоб виконати анімацію епюри напружень.
- Оберіть «Зупинка анімації», щоб зупинити анімацію.

1.1.7 Перегляд результатів епюри переміщення

Щоб переглянути результуюче переміщення в помічнику *SimulationXpress* оберіть «Відобразити переміщення».

Відображається епюра результуючого переміщення. Можна анімувати результуючу епюру переміщення, також як і епюри еквівалентних напружень.

- Виберіть «Перегляд результатів завершений».
- Збережіть файл.
- Закрийте модель гаку.

1.2 Рукоять управління

Рукоятка управління фіксується у великому отворі, і їй передається зусилля в малому отворі (рис. 1.5).

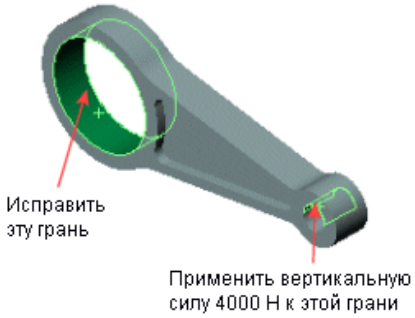


Рисунок 1.5 – Опис задачі

1.2.1 Задання нового матеріалу

- Відкрийте «каталог_установки / samples / tutorial / cosmosxpress / aw_control_arm.sldpr».
- Виберіть «Файл / Зберегти як» і збережіть файл деталі з ім'ям «aw_contrl_arm - test.SLDPRT» в своїй папці. Це дозволить знову використовувати вихідний файл.

Необхідно додати матеріал з наступними фізичними властивостями і призначити його для деталі (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Фізичні властивості матеріалу деталі

Властивість	**Значення (одиниці)**
Модуль пружності	1,2e11 Н/м²
Коефіцієнт Пуассона	0.3
Межа текучості	5e8 Н/м²
Масова щільність	7500 кг/м³

Щоб додати матеріал в нову базу даних матеріалів і призначити його для деталі:

- Натисніть «Редагувати матеріал» («Панель інструментів / Стандартна»). З'явиться діалогове вікно Матеріал.
- Щоб створити нову базу даних матеріалів:

  а) Натисніть правою кнопкою миші на ліву панель і виберіть «Нова бібліотека».

  б) У полі «Ім’я файла» введіть ім'я нової бази даних матеріалів, наприклад: «My Materials» (Мої матеріали) і натисніть «Зберегти».

- Щоб створити нову категорію матеріалів:
    а) Натисніть правою кнопкою миші на нову базу даних матеріалів і виберіть «Нова категорія».
    б) Введіть ім'я для класифікації матеріалу, наприклад, «Схожі на сталь матеріали»
- Щоб створити новий матеріал , використовуючи легованих сталей в якості бази:
    а) У розділі Матеріали *SolidWorks* натисніть на знак плюса поруч з елементом «Сталь», натисніть правою кнопкою миші на легованих сталей і виберіть «Копіювати».
    б) Натисніть правою кнопкою миші на нову створену вами категорію і виберіть «Вставить».
    в) Натисніть правою кнопкою миші на вашу копію легованої сталі, виберіть «Перейменувати» та введіть ім'я, наприклад, «Сталь рукоятки».
- Щоб змінити властивості матеріалу, на вкладці «Властивості» натисніть, почекайте і знову натисніть на значення для кожного з таких властивостей і введіть нові значення:
    а) Модуль пружності: 1.2e11;
    б) Коефіцієнт Пуассона: 0.3;
    в) Щільність: 7500;
    г) Межа плинності: 5e8;
- Натисніть «Зберегти», «Застосувати», а потім «Закрити».

Нова сталь буде призначена для деталі.

1.2.2 Налаштування аналізу

Натисніть «Майстер аналізу» *SimulationXpress* або виберіть «Інструменти / SimulationXpress». Запускається помічник *SimulationXpress*.

Для вибору параметрів аналізу:

- Виберіть «Параметри».
- Встановіть для параметра «Одиниці виміру» значення «SI».
- Оберіть потрібну папку і натисніть кнопку «OK».
- Виберіть «Показувати примітки» для максимуму і мінімуму в епюрах результатів.
- Натисніть «OK».
- Натисніть кнопку «Далі».

1.2.3 Застосування кріплень та навантажень

Щоб зафіксувати великий отвір:

- Виберіть «Додати кріплення».
- У графічній області натисніть на грань великого отвору. «Грань < 1 >» відобразиться в полі вибору (рис. 1.6).

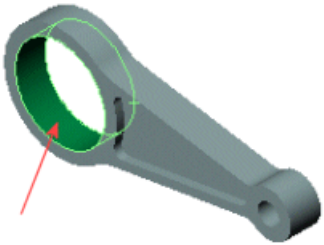


Рисунок 1.6 – Грань для закріплення

- Натисніть «ОК». «Фиксированный-1» відобразиться в дереві дослідження *SimulationXpress*, галочка відобразиться поруч з папкою «Кріплення» у верхній панелі помічника *SimulationXpress*.
- Виберіть «Далі». З'явиться крок «Навантаження».

У цьому кроці застосовується зусилля в 4000 Н до верхньої циліндричної грані невеликого отвору. Грань невеликого отвору розділена за допомогою команди «Лінія роз'єму».

Щоб прикласти силу:

- Виберіть «Додати силу».
- У графічній області виберіть грань, показану на рис. 1.7. «Грань < 1 >» відобразиться в полі вибору.

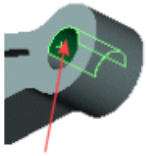


Рисунок 1.7 – Грань для навантаження

- Виберіть «Вибраний напрям».

- У дереві конструювання *FeatureManager* виберіть «Зверху». Параметр «Зверху» відобразиться в поле «Площина для напрямку».
- Введіть 4000 в якості величини сили.
- Натисніть ОК. Сила-1 відобразиться в дереві дослідження *SimulationXpress* і галочка відобразиться поруч з папкою «Навантаження» у верхній панелі помічника *SimulationXpress*.
- Виберіть «Далі». З'явиться крок «Матеріал».
- Поточний матеріал деталі – Сталь рукоять.
- Виберіть «Далі». Відображається крок «Запуск».

1.2.4 Аналіз моделі та перегляд результатів

Натисніть кнопку «Запуск моделювання», щоб прийняти параметри сітки «За замовчуванням».

По завершенні аналізу в графічній області відображається анімація деформованої деталі, і галочка відображається поруч з розділами «Запуск» і «Результати» в помічнику *SimulationXpress*.

- Після перегляду анімації виберіть «Зупинка анімації».
- Виберіть «Так, продовжити», щоб переглянути результати.

Крок «Результати» містить список мінімального запасу міцності в моделі при певному навантаженні і обмеження 6,49, тобто руйнування моделі не очікується при даних кріпленнях і навантаженні.

Щоб оцінити міцність різних областей моделі на основі певного значення для запасу міцності, наприклад 8, введіть значення 8 в поле і натисніть «Показати, в яких місцях запас міцності нижче».

Області, які показані синім кольором, мають значення запасу міцності більше 8 (безпечні зони). Області, які показані червоним кольором, мають значення запасу міцності менше 8 (рис. 1.8).

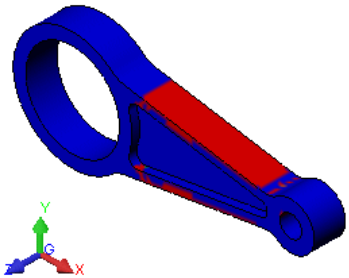


Рисунок 1.8 – Область запасу міцності менше 8

Лабораторна робота №2 (2 години)
Тема: **Статичний аналіз деталі «Кронштейн»**

Кронштейн, виготовлений з легованої сталі, зафіксований у двох отворах і навантажений тиском 7 МПа, як показано (рис. 2.1).

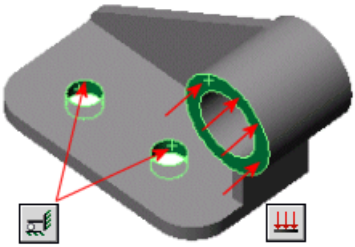


Рисунок 2.1 – Схема закріплення та навантаження кронштейну

У даній лабораторній роботі необхідно буде виконати наступні процедури:
- Призначення матеріалу деталі;
- Створення дослідження статичного аналізу;
- Застосування фіксованого обмеження і прикладання навантаження тиску;
- Налаштування параметрів формування сітки і створення сітки деталі;
- Запуск дослідження;
- Перегляд основних результатів статичного аналізу;
- Оцінка міцності конструкції;
- Створення звіту дослідження;
- Відстеження тенденцій у результатах.

2.1 Підготовка дослідження та проведення розрахунку

Відкрийте деталь «Examples_dir / Tutor1.SLDPRT», потім призначте матеріал з бібліотеки матеріалів *SolidWorks*.

Щоб призначити леговану сталь з бібліотеки матеріалів *SolidWorks*:
- Натисніть «Редагувати матеріал» (панель інструментів «Стандартна» *SolidWorks*). З'явиться діалогове вікно «Матеріал».

- У лівій панелі натисніть на знак плюса поруч з «Матеріалами SolidWorks» і потім на знак плюса поруч з розділом «Сталь» і виберіть «Легована сталь». Механічні характеристики легованої сталі з'являться у вікні «Властивості».
- Натисніть «Застосувати» і потім «Закрити». Назва призначеного матеріалу з'явиться в дереві *FeatureManager*.

Щоб створити статичне дослідження:

- Натисніть стрілку вниз в розділі «Консультант дослідження» (*Simulation Command Manager*) і виберіть пункт «Нове дослідження».
- У вікні *PropertyManager* в поле «Ім'я» введіть Static-1.
- У розділі «Тип» натисніть «Статичне».
- Натисніть «ОК».

Програмне забезпечення створить дослідження в дереві дослідження *Simulation*. Зверніть увагу: прапорець навпроти поля «Деталі» в дереві дослідження вказує на те, що Ви призначили матеріал (рис. 2.2).

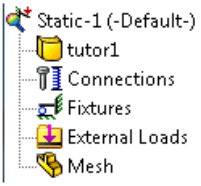


Рисунок 2.2 – Дерево керування дослідженням

Для статичного аналізу ви повинні застосувати достатні фіксуючі обмеження, щоб стабілізувати модель.

Щоб зафіксувати два отвори:

- Натисніть кнопку зі стрілкою вниз в поле «Консультант по кріпленням» (*Simulation Command Manager*) і виберіть «Зафіксована геометрія» або натисніть правою кнопкою миші «Кріплення» в дереві дослідження та виберіть «Зафіксована геометрія». З'явиться вкладка *PropertyManager* «Кріплення».
- У графічній області виберіть поверхні двох отворів, показаних на рис. 2.3). «Грань <1>» і «Грань <2>» з'являться у вікні «Грани», «Кромки», «Вершини для обмеження».

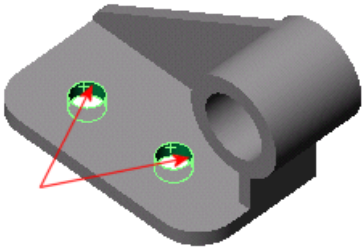


Рисунок 2.3 – Грані для закріплення

Щоб змінити колір позначень обмежень натисніть «Редагувати колір» в списку «Налаштування позначення». Відкриється палітра. Виберіть бажаний колір і натисніть «ОК».

Програмне забезпечення фіксує поверхні двох отворів і створить значок, названий «Зафиксированный-1» в папці «Кріплення» в дереві дослідження *Simulation*.

Прикладіть тиск 7 МПа перпендикулярно кругової поверхні кронштейна, для цього:

- Натисніть кнопку зі стрілкою вниз у полі «Зовнішні навантаження» (*Simulation Command Manager*) і виберіть «Тиск» або натисніть правою кнопкою миші «Зовнішні навантаження» в дереві дослідження *Simulation* і виберіть «Тиск».
- У *PropertyManager* на вкладці «Тип» в розділі «Тип» виберіть «Перпендикулярно вибраній грані».
- У графічній області виберіть грань в розділі «Грані для тиску» (рис. 2.4).

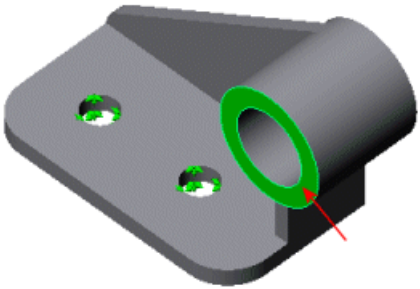


Рисунок 2.4 – Грань кронштейну для прикладення тиску

- У розділі «Значення тиску» виберіть «МПа» в поле «Одиниці виміру», потім введіть 7 у полі «Значення тиску». Якщо ви зміните одиниці виміру після введення значення, програмне забезпечення перетворює значення в нові одиниці виміру.
- Натисніть «ОК».

Програмне забезпечення застосовує тиск 7 МПа і створює значок з ім'ям «Давление-1» в папці «Зовнішні навантаження» дерева дослідження *Simulation*.

Налаштування параметрів формування кінцево-елементної сітки

Створення сітки залежить від активних параметрів формування сітки. Щоб задати параметри формування сітки:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші «Сітка» і виберіть «Створити сітку» або натисніть кнопку зі стрілкою вниз у полі «Запуск» (*Simulation Command Manager*) і виберіть «Створити сітку».
- У *PropertyManager* застосуєте наступні настройки.

У полі «Параметри сітки»:

а) «Стандартна сітка» – обрано;
б) «Глобальний розмір» – обчислено програмою;
в) «Допуск» – обчислено програмою;
г) «Автоматичний перехід» – не обрано.

У вікні «Додатково»:

а) «Меню перевірки Якобіана» – встановити на 4 точки;
б) «Сітка чорнової якості» – не обрана;
в) «Автоматичні проби для твердих тіл» – обрано;

Число проб – 3.

При створенні сітки програмне забезпечення використовує активні параметри створення сітки. Щоб створити сітку деталі і запустити статичне дослідження натисніть «Запуск».

Починається створення сітки і відкриється вікно «Процедура створення сітки». Після завершення створення сітки модель з сіткою з'явиться в графічній області (рис. 2.5).

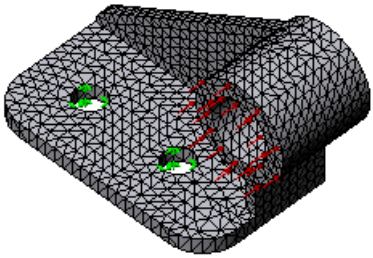


Рисунок 2.5 – Кронштейн із сіткою КЕ

Натисніть «Виконати» (*Simulation Command Manager*).

Проводиться аналіз і папка «Результати» відображається в дереві дослідження Simulation.

Для відображення інформації про сітку у дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші значок «Сітка» і виберіть «Відомості».

Щоб приховати або показати сітку натисніть «показати/сховати сітку» на панелі інструментів *Simulation*.

2.2 Аналіз результатів розраунку

Щоб побудувати епюру напружень по Мізесу в дереві досліджень *Simulation* відкрийте папку «Результати». Двічі клацніть «Напруження» (-von Mises-) для відображення епюри (рис. 2.6).

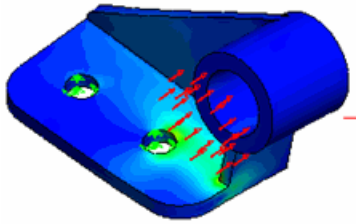


Рисунок 2.6 – Відображення епюри еквівалентних напружень

Епюра напружень створюється на деформованої формі. Щоб показати деформовану форму, програмне забезпечення масштабує максимальну деформацію на 10% діагоналі граничної рамки моделі. У даному випадку шкала деформації приблизно дорівнює 12.

Щоб переглянути епюри напружень в різних системах одиниць вимірювання, натисніть правою кнопкою миші значок епюри і клацніть «Редагувати визначення». У розділі «Відображення» встановіть у полі «Одиниці виміру» потрібні одиниці вимірювання та натисніть «ОК».

Можна налаштувати епюри «за замовчуванням», які з'являються в кожному типі дослідження. Крім того, можна додати епюри до досліджень.

Щоб додати епюру: натисніть правою кнопкою миші папку «Результати» та виберіть «Визначити епюру <тип епюри>»; встановіть потрібні параметри в *PropertyManager* і натисніть ОК.

Щоб побудувати графік результуючого переміщення:

- У дереві досліджень Simulation відкрийте папку «Результати».
- Двічі клацніть «Переміщення (-Розташування результату-)» для відображення епюри (рис. 2.7).

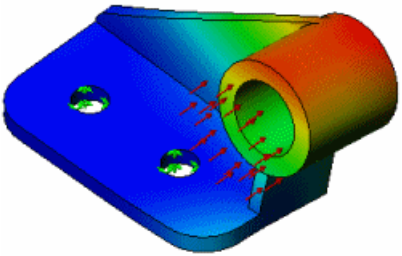


Рисунок 2.7 – Переміщення моделі

Щоб виконати анімацію епюри результуючого переміщення натисніть «Інструменти епюри» (*Simulation Command Manager*) і виберіть «Анімувати». «За замовчуванням» анімація відтворюється повторно і безперервно. Вона буде відтворюватися з початку до кінця, потім з кінця до початку і повторення триватимуть.

Щоб побудувати графік еквівалентних деформацій елементів у дереві досліджень *Simulation* відкрийте папку «Результати». Двічі клацніть «Деформація (-еквівалентна)» для відображення епюри (рис. 2.8).

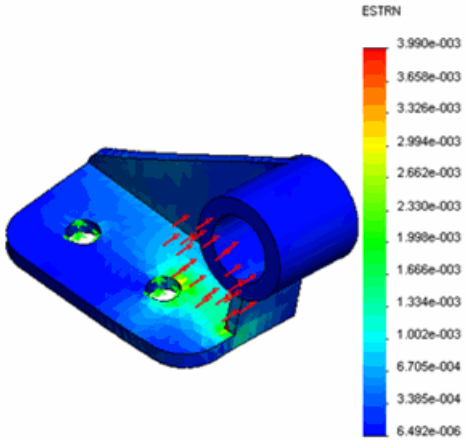


Рисунок 2.8 – Еквівалентні деформації моделі

Коефіцієнт запасу міцності проектування допоможе оцінити міцності вашої конструкції. Щоб переглянути розподіл у моделі коефіцієнта запасу міцності (FOS) (рис. 2.9):

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші на папку «Результати» та виберіть «Визначити епюру коефіцієнтів запасу міцності».
- З'явиться вікно *PropertyManager* «Запас міцності».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Крок 1 з 3» виберіть «Максимальне напруження von Mises» в поле «Критерій».
- Клацніть «Далі».
- У розділі «Крок 2 з 3» виберіть «Для межі текучості».
- Натисніть кнопку «Далі».
- У розділі «Крок 3 з 3», виберіть «Розподіл запасу міцності».
- Натисніть «ОК».

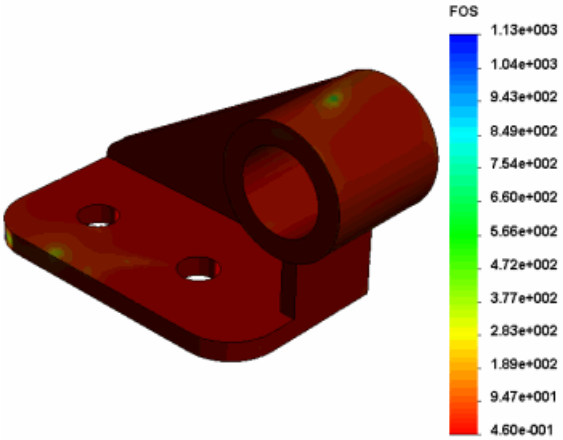


Рисунок 3.9 – Розподіл запасу міцності моделі

Щоб побудувати графік критичних областей деталі:

- Натисніть стрілку вниз в розділі «Консультант по результатам» (диспетчер команд *Simulation*) і виберіть «Нова епюра», «Запас міцності».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Крок 1 з 3» виберіть «Максимальне напруження von Mises» в поле «Критерій».
- Клацніть «Далі».
- У розділі «Крок 2 з 3» виберіть «Для межі текучості».
- Натисніть кнопку «Далі».
- У розділі «Крок 3 з 3»:
    а) Виберіть «Області нижче запасу міцності».
    б) Введіть 1 в поле «Запас міцності».
- Клацніть ОК.

Області з запасом міцності менше 1 (небезпечні області) відображаються червоним кольором. Області з більш високим коефіцієнтом запасу міцності (міцні області) відображаються синім кольором (рис. 2.10).

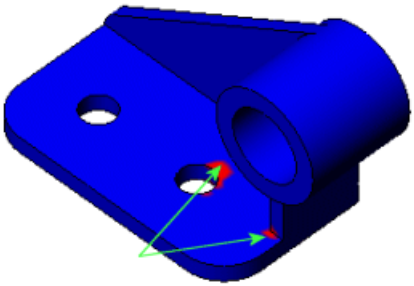


Рисунок 2.10 – Області кронштейну з низьким запасом міцності

Щоб краще бачити критичні області моделі, може знадобитися приховати позначення обмежень і тиску. Натисніть правою кнопкою миші на папки «Кріплення» та «Зовнішні навантаження» і виберіть «Скрити всі». Двічі натисніть значок «Запас міцності» в розділі «Результати», щоб знову відобразити епюру запасу міцності.

Для створення звіту дослідження:

- Клацніть «Звіт» (*Simulation Command Manager*).
- У діалоговому вікні в розділі «Розділи звіту»:
  а) Очистіть розділи, не включені в дослідження: «Визначення з'єднувачів», «Данні контакту», «Данні датчиків», «Балки».
  б) Можна додати коментарі до кожного включеного до звіту розділу. Виберіть розділ звіту, потім обновіть дані в поле «Властивості розділу».
- Введіть «Данні заголовка». Ці дані відображаються на початку звіту і у верхній частині кожної сторінки.
- В «Параметрах публікації звіту»:
  а) Введіть «Перший звіт» в полі «Ім'я документа».
  б) Виберіть «Відобразити звіт при публікації».
- Виберіть «Опублікувати».
- Звіт відображається у вікні Microsoft Word. Можна переходити в різні розділи звіту, натискаючи на посилання нагорі.
- Для закриття вікна звіту натисніть «ОК».

Щоб змінити формат звіту «за замовчуванням», виберіть Simulation, «Параметри». На вкладці «Налаштування за замовчуванням» виберіть «Звіт». Виберіть формат звіту, вкажіть параметри та натисніть на кнопку «ОК».

Щоб зберегти модель та аналітичну інформацію в документі деталі натисніть «Файл / Зберегти».

2.3 Відстеження тенденцій в результатах

Функція «Выявить тенденцию» допоможе виявити тенденції в результатах різних повторів статичного дослідження. Результати представлені таким чином, щоб порівнювати базову лінію з подальшими повторами.



Рисунок 2.11 – Модель з отвором

Щоб відкрити «TrendTraker.SLDPRT» перейдіть в «<Examples_dir> / TrendTracker.SLDPRT».

Дослідження *Ready* включає статичний аналіз, матеріал – легована сталь. Тиск і кріплення відповідають попередньому розрахунку в даній ЛР.

- У дереві дослідження Simulation натисніть правою кнопкою миші дослідження «Готово» і виберіть «Виконати».
- Після завершення аналізу визначте епюру напружень по Мізесу та епюру переміщення URES (рис. 2.12).

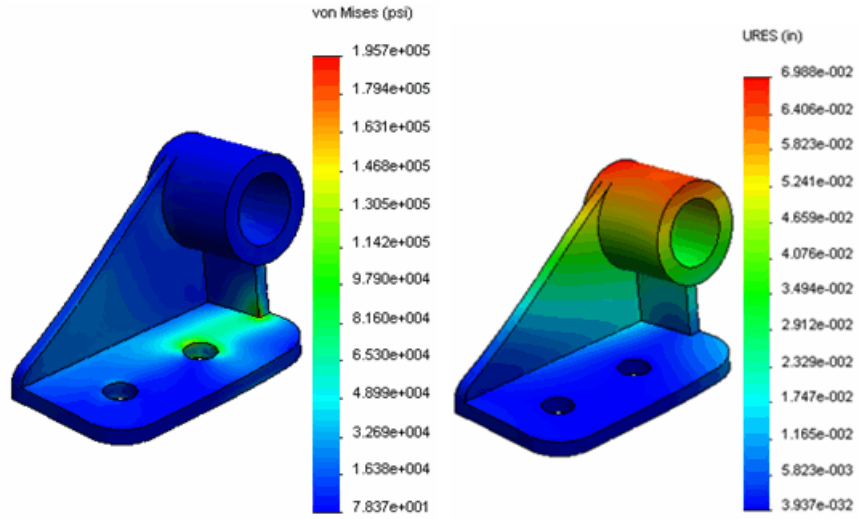


Рисунок 2.12 – Епюри напружень та переміщень моделі

Ми відстежуємо тенденції в існуючому статичному дослідженні. Після успішного запуску статичного дослідження, задайте базову лінію в якості бази порівняння з майбутніми результатами. Натисніть правою кнопкою миші дослідження «Готово» і виберіть «Виявити тенденцію».

Функція виявлення тенденції буде включена і значки «Виявлення тенденції» та «Журнал тенденцій» з'являться в дереві досліджень *Simulation*.

Натисніть правою кнопкою миші «Виявити тенденцію» і виберіть «Встановити базу».

Будуть виконані наступні дії:

- Епюри *von-Mises* і *URES* ненадовго з'являться в графічній області, коли програмне забезпечення додає їх в галерею зображень результатів.
- У папці «Виявити тенденцію» з'являться графіки: «За замовчуванням», «Маса». Також з'являться графіки «Напруження» і «Переміщення», так як епюри *von-Mises* і *URES* визначені в папці «Результати».

Додайте датчик для моніторингу змін 1-ї головної напруги:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Датчики» у дереві конструювання *FeatureManager* і виберіть «Додати датчик».

- У вікні *PropertyManager* в розділі «Тип датчика» виберіть «Данні моделювання».
- У вікні «Данні кількісної величини» виберіть:
  а) Переконайтеся, що у вікні «Результати» обрано пункт «Напруження».
  б) Виберіть «P1: 1-е главное напряжение» в поле «Компонент».
- У розділі «Властивості»:
  а) Виберіть МПа в списку «Одиниці вимірювання».
  б) Виберіть «Макс моделі» в поле «Критерій».
- Клацніть «ОК».
- Натисніть правою кнопкою миші функцію «Выявить тенденцию» в дереві дослідження *Simulation* і виберіть «Додати графік відслідковуваних даних».
- У вікні *PropertyManager* виберіть «Напруження-2» в полі «Список датчиків».
- Натисніть кнопку «ОК».

Новий графік даних для напруги відкриється в папці «Виявлення тенденції».

Також можна додати графіки для відстеження переміщення, сил коннектора і сил вільно падаючого тіла.

2.4 Оптимізація конструкції

2.4.1 Зміна товщини

Спочатку змініть ширину фланця в дереві конструювання FeatureManager. Потім перегляньте «Журнал тенденцій», щоб побачити зміни в результуючих величинах:

- У дереві конструювання *FeatureManager* розгорніть елемент «Boss-Extrude3 (Бобишка-Витягнути3)» і виберіть «Sketch4 (Ескіз4).».
- Двічі натисніть на розмір 8 в графічному вікні. Він називається «D1@Sketch4» (рис. 2.13).

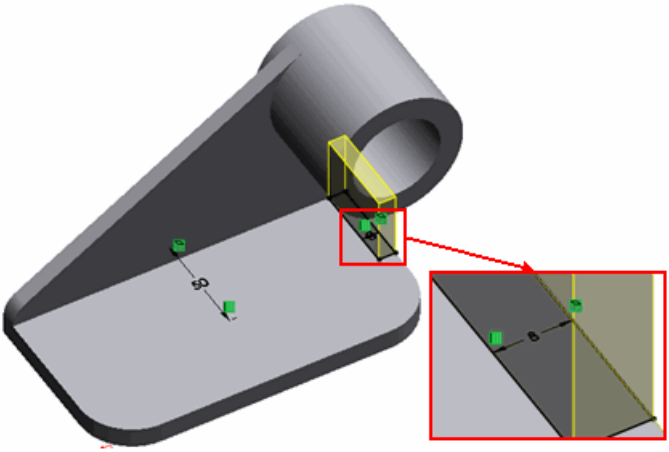


Рисунок 2.13 – Зміна ширини фланця

- У діалоговому вікні «Змінити» введіть 10мм.
- Натисніть «ОК», потім натисніть «Перебудувати».
- У *PropertyManager* «Розмір» натисніть___. Вийдіть з ескізу.
- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші дослідження «Готово» і виберіть «Виконати».
- Повторіть всі попередні кроки двічі, але змініть розмір моделі на 12 мм і 14 мм відповідно.
- Натисніть правою кнопкою миші «Виявити тенденцію» та «Відкрити».
- Прокрутіть до низу журналу, щоб переглянути інформацію про «Повтор 4».

Загальна вага збільшила приблизно на 102% від базового значення. Напруга по Мизесу, *URES* - переміщення і 1-е головне напруження P1 зменшилися приблизно на 78%, 85% і 81%, відповідно.

Закрийте документ.

2.4.2 Зміна форми

Перейдіть на дерево конструювання *FeatureManager*. Натисніть правою кнопкою миші «Extrude1 (Витягнути1)», «Fillet1 (Скруглення1)», и «Fillet2 (Скруглення2)» і виберіть «Висвітити».

Ця операція видаляє геометрію з фланця і додає закруглення на деяких кромках (рис. 2.14).

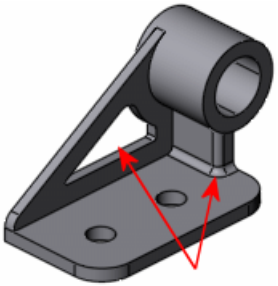


Рисунок 2.14 – Зміни в геометрії кронштейну

У дереві дослідження Simulation натисніть правою кнопкою миші дослідження «Готово» і виберіть «Виконати».

У галереї містяться зображення епюр деформацій і напруг базової лінії і наступних повторів.

Натисніть правою кнопкою миші папку «Виявити тенденцію» і виберіть «Перегляд Галереї». Програма перегляду малюнків і факсів *Windows* відкриває зображення епюри переміщення (деформації) від базової лінії.

Прокрутіть інші зображення галереї. Два останніх зображення з напруженням по Мізесу також відображаються в ілюстрації (рис. 2.15).

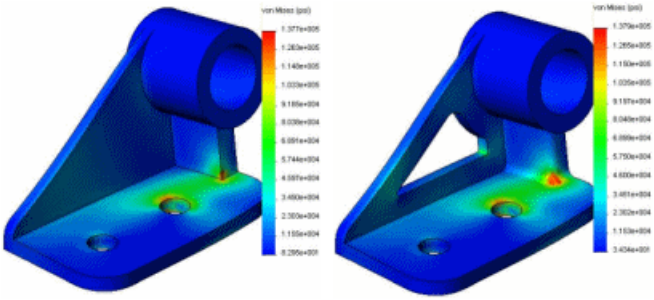


Рисунок 2.15 – Епюри зображень по Мізесу

Закрийте програму перегляду малюнків і факсів Windows.

3.4.3 Зміна розміру отвору

Тепер змінимо діаметр отвору:

- Перейдіть на дерево конструювання *FeatureManager*.

- Виправте «Ескіз7 Cut-Extrude1 (Виріз-Витягнути1)», клацнувши правою кнопкою миші елемент і виберіть «Редагувати ескіз».
- Двічі клацніть на розмір діаметру 42 мм і змініть його на 30 мм.
- Натисніть *Ctrl+B*, щоб закрити ескіз і перебудувати модель (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Зміни в моделі кронштейну

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші дослідження «Готово» і виберіть «Виконати».

Програмне забезпечення створює нову сітку для зміненої форми і запускає аналіз.

Розглянемо зміни моделі графічно:

- Двічі клацніть «Масса1» в папці «Выявление тенденции».
- На графіку (рис. 2.17) видно, що вага збільшується при зменшенні розміру отвору. Значення маси показані в кг.

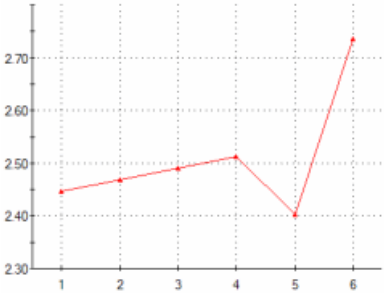


Рисунок 2.17 – Графік зміни маси моделі

- Двічі натисніть на «Напруження1», що відповідає напрузі по Мізесу.

На графіку (рис. 2.18) видно, що максимальні напруження по Мізесу також збільшились. Насправді, значення майже дорівнює первісному значенню базової лінії (повторення 1). Значення напруження відображені в фунтах на кв.дюйм.

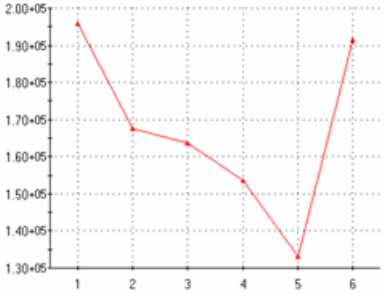


Рисунок 2.18 – Графік зміни напружень

Закрийте обидва графіка.

Як видно з графіків, остання зміна форми не дало бажаних результатів. Вага та максимальна напруга по Мізесу виросли в результаті зміни. Можна відновити модель на попередньому повторенні, щоб повернутися до стану моделі з кращими результатами. Для цього:

- Натисніть правою кнопкою миші на функцію «Виявити тенденцію» і виберіть «Відновити модель до ітерації».
- У діалоговому вікні виберіть «Повтор 5» і натисніть «ОК».
- Натисніть «Так» при запиті видалити всі наступні повтори. Модель повертається в стан, в якому діаметр отвору дорівнює 42 мм.
- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші «Журнал тенденцій» в папці «Виявлення тенденції» та «Відкрити».
- Прокрутіть до низу документа.
- Закрийте документ.

Лабораторна робота №3 (2 години)
Тема: **Аналіз шківа під навантаженням на опору**

Навантаження на опору утворюються в місцях контакту, передаючи сили з однієї деталі на іншу (рис. 3.1). Більш точне рішення передбачає використання контактної взаємодії, але контактні задачі потребують більших ресурсів для розрахунку.

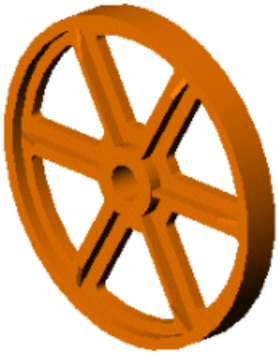


Рисунок 3.1 – Модель шківа

У даній лабораторній роботі ви ознайомитеся з наступними процедурами:
- Прикладання навантаження на опору в автоматичному режимі;
- Прикладання навантаження на опору вручну, використовуючи нерівномірний розподіл сил;
- Виведення списку сил реакції.

3.1 Дослідження зі стандартним навантаженням

Щоб відкрити «Pulley_Bearing.SLDPRT» перейдіть в «<Examples_dir> / Pulley_Bearing.SLDPRT».

Часткові дослідження включають:
- Статичний аналіз.
- Вирішальну програму встановити на режим *FFEPlus.*
- Вибрано параметр «Використовувати м’яку пружину для стабілізації моделі»
- Матеріал – легована сталь

- Обмеження на верхній і нижній кромках моделі «Використовувати довідкову геометрію» (рис. 3.2).

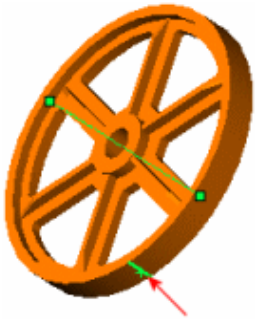


Рисунок 3.2 – Нижня кромка

Прикладаємо навантаження на опору:

- Натисніть правою кнопкою миші на папку «Зовнішні навантаження» дослідження «Partial(Часткове)-BearingLoad» і виберіть «Робоче завантаження».
- У вікні *PropertyManager* виберіть «Циліндричні грані и кругові кромки оболонки для робочого навантаження», потім виберіть нижню поверхню центрального отвору (рис. 3.3)

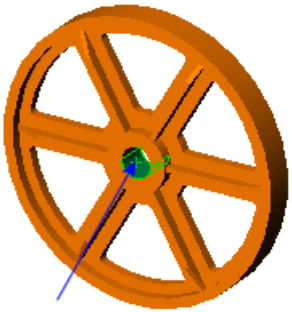


Рисунок 3.3 – Половина поверхні циліндричного отвору

- Клацніть «Вибиріть систему координат», потім виберіть «Система координат 1» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager*.
- У вікні «Навантаження на опору»:
  а) Виберіть «Англійська (ДФС)» в меню «Одиниці виміру».

б) Натисніть «Y-напрямок» і введіть 700.

- Виберіть параметр «Синусоїдальне розподілення».
- Клацніть «ОК».

Щоб створити сітку моделі і запустити дослідження:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші значок «Сітка» і виберіть «Створити сітку».
- У розділі «Параметри» виберіть «Запуск (рішення) аналізу».
- Натисніть «ОК», щоб прийняти значення.

Виведемо список сил реакцій. Сили реакції утворюються на опорах. Щоб вивести список сил реакції по відношенню до системи координат 1:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Результати» та виберіть «Список результуючих сил».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Вибір»:

а) Виберіть «Система координат 1» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для «Площина, ось або система координат».

б) Виберіть «Англійська (ДФС)» в меню «Одиниці вимірювання».

в) Виберіть показану кромку для «Грані», «Кромки або Вершини».

г) Натисніть кнопку «Оновити» (рис. 3.4).

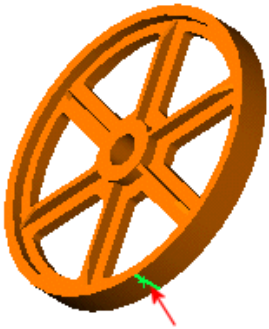


Рисунок 3.4 – Кромка для виводу сил реакцій

У вікні «Сила реакції» зверніть увагу, що результуюча сила реакції 700,17 фунта в цілій моделі приблизно дорівнює і протилежна доданої силі, що виконує умову рівноваги.

3.2 Дослідження зі специфічним навантаженням

Змоделюємо навантаження на опору сил з нерівномірним розподілом (рис. 3.5).

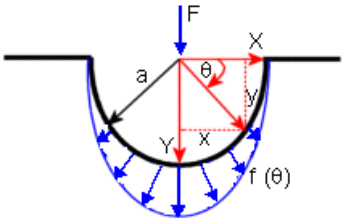


Рисунок 3.5 – Розподіл сил на поверхню центрального отвору

$$f(\theta) = F_o \cdot \mathrm{Sin}(\theta) = (F_o) \cdot (y/a) = 1{,}333 \cdot F_o \cdot y,$$

де f(θ) – інтенсивність сили;

a – радіус отвору;

F_o – коефіцієнт масштабування, розрахований програмою таким, як сума всіх сил, що впливають на вузли у вертикальному напрямку ($\sum F_o \cdot \mathrm{Sin}^2(\theta)$), який встановлений на значення, рівне вказаному значенню сили F. Інтенсивність сили передбачається рівномірною в напрямку z.

Необхідно прикласти нерівномірну силу. Аналітично знаходимо загальну силу нерівномірного навантаження в радіальному напрямі (рис. 3.6).

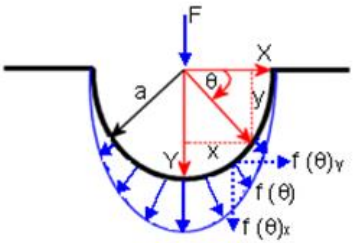


Рисунок 3.6 – Розподіл сили за напрямами

$$f(\theta) = F_0 \cdot \mathrm{Sin}(\theta)$$

Вертикальні та горизонтальні компоненти сили відповідно:

$$f(\theta)_y = F_0 \cdot \mathrm{Sin}^2(\theta); \quad f(\theta)_x = F_0 \cdot \mathrm{Sin}(\theta) \cdot \mathrm{Cos}(\theta).$$

Рівнодіюча розподіленої сили направлена за віссю Y.

$$\int_0^{\pi} F_0 \sin^2\theta \, d\theta = F .$$

Як відомо, F = 700 фунтів, звідки:

$$\left[\frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2\theta}{4}\right]_0^{\pi} F_0 = 700 .$$

Вирішуючи рівняння отримуємо, що F_0 = 445,6 фунтів.

Загальна сила, прикладена в радіальному напрямі (нормально до грані) розраховується як:

$$\int_0^{\pi} F_0 \sin^2\theta \, d\theta = -\left[\cos\theta\right]_0^{\pi} F_0 = 2F_0 .$$

Отже загальна сила по нормалі має значення 891 фунт. Коефіцієнт масштабування, на який помножується навантаження на опору для синусоїдального розподілу = 891 / 700 ≈ 1,273.

Прикладемо нерівномірну силу:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Зовнішні навантаження» дослідження «Часткове-NonuniformForce» і виберіть «Сила».
- У PropertyManager на вкладці «Тип» в розділі «Сила/Обертовий момент»:

  а) Виберіть «Сила» і потім «По нормалі». Навантаження впливає в радіальному напрямку.

  б) Виберіть вікно «Грані и кромки оболонки для нормальної сили», потім виберіть нижню грань центрального отвору.
- У полі «Одиниця вимірювання» виберіть «Англійська (IPS)».
- У полі «Значення сили» введіть 891 і очистіть параметр «Реверс напрямку», щоб сила в 891 фунтів була спрямована радіально на зовню.
- Встановіть прапорець «Нерівномірне розподілення» і виконайте такі дії:

  а) Клацніть «Вибір системи координат», потім виберіть «Система координат 1» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager*.

  б) У полі «Коефіцієнти рівняння» введіть 1,3333 для Y і введіть нулі для всіх інших коефіцієнтів.

  Значення Y, що було використано є інверсним радіусом отвору – 1/a (тут $r_{отв}$ = a = 0,75”), бо наше рівняння виглядає $f(\theta) = (F_o)\cdot(y/a)$.
- Клацніть «ОК».

- Зкопіюйте сітку з першого дослідження в поточне дослідження.
- Виконайте статичний аналіз.
- Виведіть список сил реакції на тій же самій кромці, яку ви використовували в першій частині лабораторної роботи.

Зверніть увагу, що результати сил реакцій дуже близькі на отримані за стандартним навантаженням.

Лабораторна робота №4 (2 години)
Тема: **Розрахунок елементарної балки**

В даній лабораторній роботі розраховується елементарна балка. Балку навантажено та закріплено згідно рис. 4.1.

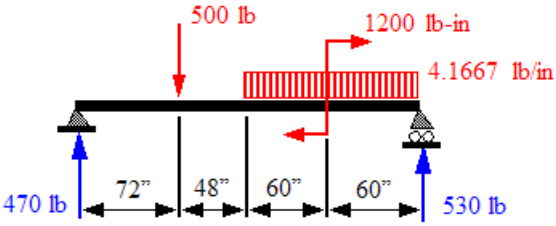


Рисунок 4.1 – Балка на 2-х опорах

У цій роботі ви ознайомитеся з наступними процедурами:
- Створення дослідження з сіткою балок;
- Визначення балок і їх з'єднань;
- Додаток навантажень і обмежень до балок;
- Створення сітки і запуск дослідження сітки балок;
- Перегляд графіків поперечних сил і моменту;
- Виведення списку зусиль на балці;
- Перегляд напруги при згині.

4.1 Налаштування моделі та розрахунок

- Щоб відкрити «beam_diagrams.SLDPRT» перейдіть в «<Examples_dir> / Beams / beam_diagrams.SLDPRT».
- Натисніть на стрілку вниз в розділі «Консультант дослідження» (*Simulation Command Manager*) і виберіть «Нове дослідження».
- У менеджері властивостей виконайте наступні дії:
  а) Введіть *ShearMoment* в поле «Ім'я».
  б) У розділі «Тип» натисніть «Статическое».
- Натисніть «ОК».
- У дереві дослідження *Simulation* розгорніть папку *beam_diagrams* і:
  а) Натисніть правою кнопкою миші на «SolidBody 1» і виберіть «Розглядати як балку».
  б) Натисніть правою кнопкою миші на «SolidBody 2» і виберіть «Розглядати як балку».

- Натисніть правою кнопкою миші на «Группу з’єднань» і виберіть «Редагувати».
- У *PropertyManager* «Редагувати з’єднання» в розділі «Вибранні балки» натисніть «Обчислити». Три з'єднання відобразяться у вікні «Результати».
- Натисніть «ОК».

Два значка балки з'являться в папці «beam_diagrams», а папка «Група шарнирів» з'явиться в дереві дослідження *Simulation*.

Застосуємо матеріал:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «beam_diagrams» і виберіть «Застосувати матеріал до всіх тіл».
- Призначте «Легована сталь» з бібліотеки матеріалів *SolidWorks*.

З’єднання визначені автоматично на вільному кінці балки і в кожному місці перетину двох або більше балок. Кріплення застосовані тільки до з'єднань.

Щоб перевірити з'єднання:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Група з’єднань» і виберіть «Редагувати».
- У вікні *PropertyManager* три з'єднання відображаються в розділі «Результати» (рис. 4.2)



Рисунок 4.2 – Групи з’єднань моделі

- Клацніть правою кнопкою миші по одному із з'єднань в графічній області для перевірки витягнутих тіл, що утворюють з'єднання. Елементи виділяться в графічній області.
- Натисніть «ОК».

Додайте кріплення на вільних кінцях балок на з'єднаннях. Один кінець закріплено шарнірно, а на іншому кінці ролик (рис. 4.3).

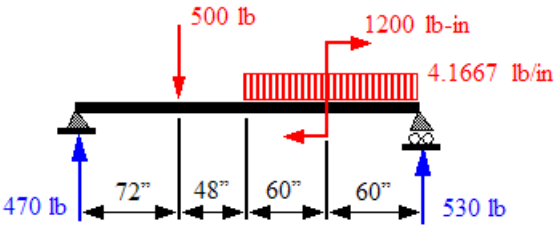


Рисунок 4.3 – Заріплення моделі

Щоб змоделювати шарнір на кінці А:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Кріплення» та виберіть «Зафіксована геометрія».
- Змініть орієнтацію виду на «Ізометрія», щоб безпомилково вибрати правильні з'єднання.
- У менеджері властивостей виконайте наступні дії:
  а) Виберіть «Нерухоме (немає переміщень)» в параметрі «Стандартний».
  б) Оберіть з'єднання, показане для параметра «З'єднання».
- Натисніть «ОК».

Щоб змоделювати ролик на кінці В:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Кріплення» та виберіть «Зафіксована геометрія».
- У менеджері властивостей виконайте наступні дії:
  а) Виберіть «Використати довідкову геометрію» в параметрі «Стандартний».
  б) Оберіть з'єднання, показане для параметра «З'єднання» (рис. 4.4).

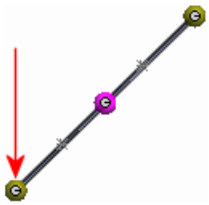


Рисунок 4.4 – Вузел першого закріплення

в) Виберіть «Передню площину» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для параметра «Грань», «кромка», «площина», «осі для напрямку».

- У полі «Переміщення» натисніть «Вздовж площини - напрям 1» і «Вздовж площини - напрям 2», щоб заборонити переміщення в цих напрямках.
- Натисніть «ОК».

Прикладіть силу і момент в необхідних точках.

Щоб прикласти силу:

- Щоб правильно вибрати контрольну точку, переконайтеся, що орієнтація виду – «Ізометрія».
- Клацніть правою кнопкою миші «Внешние нагрузки» і виберіть «Сила».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Вибір»:
  а) Натисніть «Вершини», «Точки» і виберіть «Точка1» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager*.
  б) Виберіть «Передню площину» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для параметра «Грань», «кромка», «площина для напрямку».
- Для «Одиниця вимірювання» виберіть англійська (IPS).
- У списку «Сила»:
  а) Натисніть «Вздовж площини - напрям 2».
  б) Введіть 500 фунт-сил (226,796 кг).
  в) Виберіть «Реверс напряму».
- Натисніть «ОК» (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Сила 1

Щоб докласти зосереджений момент:

- Клацніть правою кнопкою миші «Зовнішні навантаження» і виберіть «Сила».
- У вікні PropertyManager в розділі «Вибір»:
  а) Натисніть «Вершини», «Точки» і виберіть «Точка2» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager*.
  б) Виберіть передню площину в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для параметра «Грань», «кромка», «площина для напрямку».
- Для «Одиниця виміру» виберіть англійська (IPS).
- У розділі Момент:
  а) Натисніть «Вздовж площини - напрям 1».
  б) Введіть 1200 фунт-дюйм.
- Натисніть «ОК» (рис. 4.6).

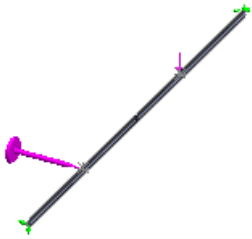


Рисунок 4.6 – Момент сил, прикладений до моделі

Щоб докласти розподілене навантаження по всій довжині балки:

- Клацніть правою кнопкою миші «Зовнішні навантаження» і виберіть «Сила».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Вибір»:
  а) Клацніть «Балки» і виберіть «Витяжка2» в графічній області. Можна прикласти розподілені навантаження тільки на всю довжину балки.
  б) Виберіть «Передню площину» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для параметра «Грань», «кромка», «площина для напрямку».
- У меню «Одиниці вимірювання» виберіть «Англійська (ДФС)» і виберіть «На одиницю. довжини».
- У списку «Сила»:
  а) Натисніть «Вздовж площини - напрям 2».

б) Введіть 4,1667 фунт-дюйм.
в) Виберіть «Реверс напрямку».

- Натисніть «ОК» (Рис. 4.7).

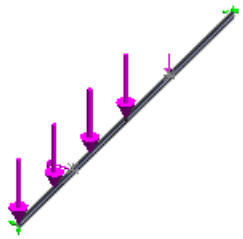


Рисунок 4.7 – Розподілене навантаження балки

Щоб створити сітку моделі і запустити дослідження:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші значок «Сітка» і виберіть «Створити сітку». Зверніть увагу, що кожна з балок розділена на декілька елементів (рис. 4.8).

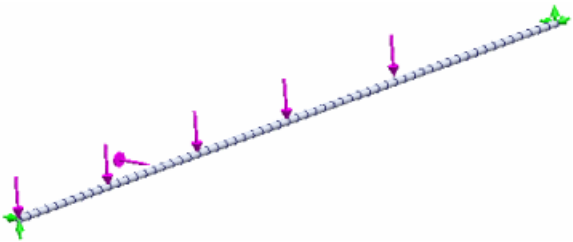


Рисунок 4.8 – Кінцево-елементна сітка балки

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші дослідження і виберіть «Запуск».

4.2 Аналіз результатів

Розглянемо епюру поперечних сил, для цього:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Результати» та виберіть «Визначити діаграмму балки».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Відобразити»:
  а) Виберіть «Поперечна сила в напрямку 1» в «Компонент».
  б) Виберіть фунт-сила в списку «Одиниці вимірювання».
- Клацніть «ОК».

- Змініть орієнтацію виду, встановивши «Зліва» (рис. 4.9).

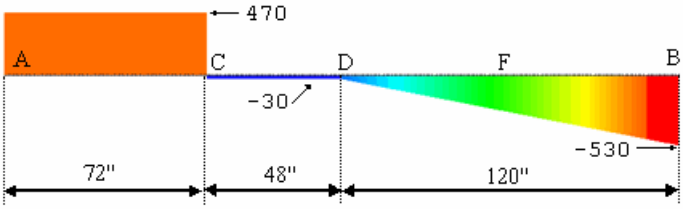


Рисунок 4.9 – Епюра поперечних сил

Як можна побачити, значення поперечної сили (рис. 4.9) збігаються з теоретичним (рис. 4.10) рішенням (зауважте, що значення мають одиниці виміру фунт-сила).

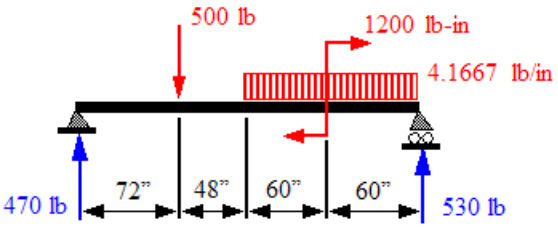


Рисунок 4.10 – Теоретичні значення поперечних сил

Розглянемо епюру згинальних моментів:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Результати» та виберіть «Визначити діаграмму балки».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Відобразити»:
  а) Виберіть «Момент в напрямку 2» в списку «Компонент».
  б) Виберіть фунт-дюйм як одиниці виміру.
- Клацніть «ОК».
- Змініть орієнтацію виду на «Зверху» і поверніть графік на 90° проти годинникової стрілки (рис. 4.11).

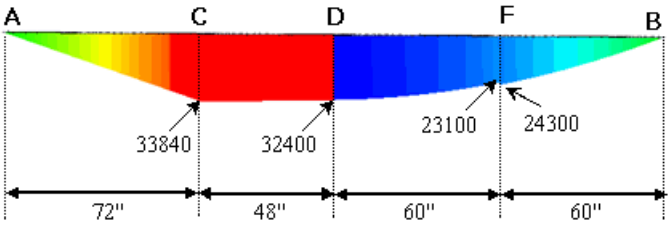


Рисунок 4.11 – Епюра згинальних моментів

Виведемо список зусиль в балці:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Результати» та виберіть «Список сил балки».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Список»:
  а) Виберіть «Силы».
  б) Виберіть «Англійска (ДФС)» у розділі «Одиниці вимірювання».
- Клацніть «ОК».

У діалоговому вікні розгляньте значення поперечних сил і моментів в ключових точках вздовж балки (табл. 4.1):

Таблиця 4.1 – Значення сил і моментів в ключових точках

	Точка A	**Точка D**	**Точка B**
Поперечная сила 1, SolidWorks Simulation (фунты)	470.01	-29.99	-530.03
Поперечная сила 1, теория (фунты)	470	-30	-530
Момент 2, SolidWorks Simulation (фунт·дюйм)	1,75e-8	32401	4,83e-6
Момент 2, теория (фунт·дюйм):	0	32400	0

Розглянемо напруження при згині:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Результати» та виберіть «Визначити эпюру втоми».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Відобразити»:
  а) Виберіть ф/кв.дюйм як «единица измерения».
  б) Виберіть «Згин в місцевому напрямку 2» в полі «Напруження балки».

- Клацніть «ОК» (рис. 4.12).

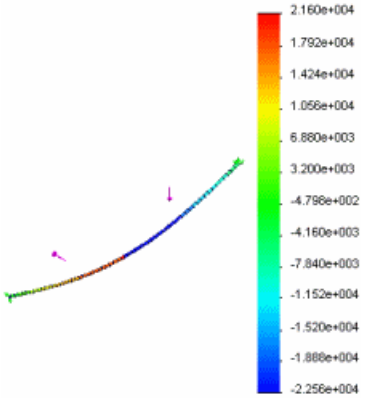


Рисунок 4.12 – Епюра напружень від згину

Лабораторна робота №5 (2 години)
Тема: **Статичний аналіз ферми**

Модель пласкої ферми навантажена вертикально і закріплена, як показано на рис. 5.1.

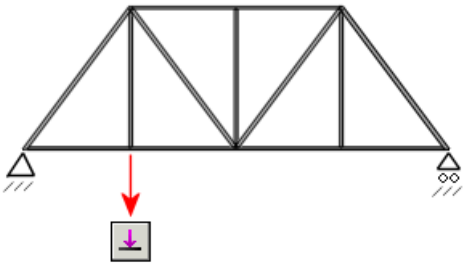


Рисунок 5.1 – Модель ферми для розрахунку

У даній лабораторній роботі ви ознайомитеся з наступними процедурами:
- Створення дослідження з сіткою балок;
- Визначення ферм і з'єднань;
- Додавання навантажень і кріплень до з'єднань ферми;
- Створення сітки і запуск дослідження сітки балок;
- Перегляд переміщення і осьового напруження.

5.1 Розрахунок ферми

Відкрийте модель ферми:
- Щоб відкрити «Beam_Truss.SLDPRT» перейдіть в «<Examples_dir> / Beams Beam_Truss.SLDPRT».
- Натисніть на стрілку вниз в розділі «Консультант дослідження» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Нове дослідження».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Ім'я» виберіть «Стержень».
- У розділі «Тип» натисніть «Статичне».
- Клацніть «ОК».

Для деталей з елементами конструкції (збірки) програма за замовчуванням створює елементи типу балка. Ви повинні редагувати визначення балок для зміни їх на тип – ферма.

Щоб створити елементи ферми з усіх структурних елементів:

- У дереві дослідження *Simulation* в папці «Beam_Truss» виберіть всі дев'ять елементів конструкції.
- Натисніть правою кнопкою миші і виберіть «Редагувати визначення».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Тип» виберіть «Стержень».
- Клацніть «ОК».

Щоб призначити матеріали:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Beam_Truss» і виберіть «Застосувати матеріал до всіх тіл».
- Призначте матеріал користувача з наступними властивостями:
  а) Модуль пружності = 3e7 фунт/кв.дюйм;
  б) Коефіцієнт Пуассона = 0,3;
  в) Масова щільність = 0,28 фунт/дюйм^3;
  г) Межа текучесті = 90,000 фунт/кв.дюйм.

З'єднання між стержнями ферми визначається автоматично: (а) на кінці елемента конструкції, яка не перетинається з якими-небудь іншими елементами конструкції і (б) на перетині двох або більше елементів конструкції.

Щоб визначити з'єднання:

- Натисніть правою кнопкою миші на «Группу з’єднань» і виберіть «Редагувати».
- Вісім з'єднань відобразяться у вікні «Результати».

При наявності відсутніх або невірних сполук виберіть «Все» і натисніть на кнопку «Обрахувати» (рис. 7.2).

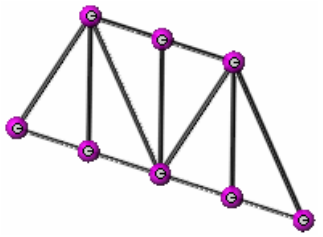


Рисунок 5.2 – З’єднання ферми

- Натисніть правою кнопкою миші на одне із з'єднань в графічній області для перевірки елементів конструкції, які утворюють з'єднання. Елементи виділяться в графічній області.
- Клацніть «ОК».

Необхідно додати навантаження у вигляді зосередженої сили. В аналізі з сітками балок можна прикласти навантаження і кріплення тільки на з'єднання.

Щоб додати силу:

- Клацніть правою кнопкою миші «Зовнішні навантаження» і виберіть «Сила».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Вибір»:
  а) Виберіть «З'єднання».
  б) Оберіть з'єднання, показане для параметра «З'єднання» (рис. 5.3).

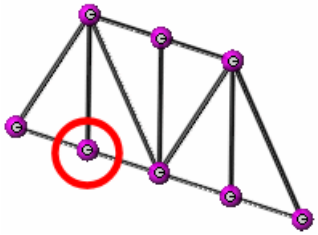


Рисунок 5.3 – Вузол прикладання навантажень

- Виберіть «Передня» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для параметра «Грань», «кромка», «площина для напрямку».
- Для «Одиниця вимірювання» виберіть англійська (IPS).
- У списку Сила:
  а) Натисніть «Вздовж площини - напрям 2».
  б) Введіть 64000.
  в) Виберіть «Реверс напряму» таким чином, щоб сила була спрямована вниз.
- Клацніть «ОК».

Необхідно додати кріплення, щоб запобігти руху поза площиною та зафіксувати нижні кути ферми.

Щоб запобігти рух поза площиною:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Кріплення» та виберіть «Зафіксована геометрія».
- У *PropertyManager* в розділі «Стандартні (Зафикована геометрія)»:
  а) Виберіть параметр «Використовувати довідкову геометрію».
  б) Виберіть шість показаних з'єднань для параметра «З'єднання» (рис. 5.4).

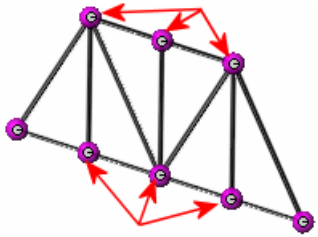


Рисунок 5.4 – Вузли для фіксації руху в межах одної площини

  в) Виберіть «Передня» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для «Грань», «Кромка», «Площина», «Осі для напрямку».
- У вікні «Переміщення», натисніть кнопку «Перпендикулярно площині» і переконайтеся, що значення дорівнює нулю.
- Клацніть «ОК».

Щоб зробити опори з'єднань нерухомими додайте обмеження «Нерухома (без змін)» до двох показаних з'єднань (рис. 5.5).

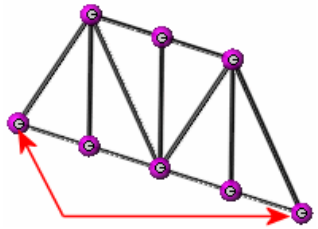


Рисунок 5.5 – Закріплення ферми

Щоб створити сітку моделі і запустити дослідження:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші значок «Сітка» і виберіть «сітку Створити».

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші значок дослідження та виберіть «Запуск».

5.2 Аналіз результатів дослідження

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші на папку «Результати» та виберіть «Визначити епюру переміщення».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Відобразити»:
  а) Виберіть «UY: Перемещення по Y в Компонент».
  б) Виберіть «Дюйм», як одиниці виміру.
- У списку «Деформована форма» виберіть «Визначені користувачем».
- Клацніть «ОК».

Максимальне переміщення 0,066 дюйма з'являється у вузлу, до якого прикладали навантаження (рис. 5.6).

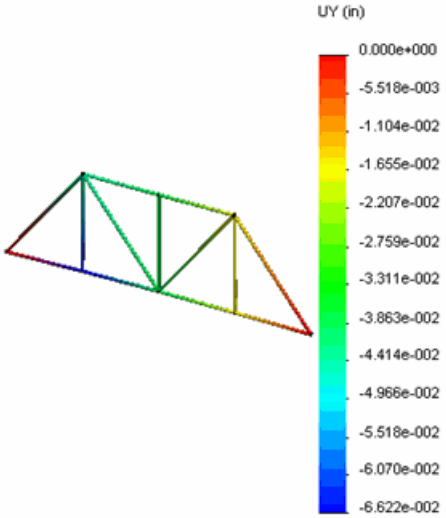


Рисунок 5.6 – Епюра переміщень ферми

Побудуємо графік сил реакції (рис. 5.7):

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші на папку «Результати» та виберіть «Визначити епюру переміщення».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Відобразити»:
  а) Виберіть «RFY: сила реакції Y в Компонент».

б) Виберіть фунт-сила в списку «Одиниці вимірювання».

- У списку «Деформована форма» виберіть «Визначені користувачем».
- Клацніть «ОК».

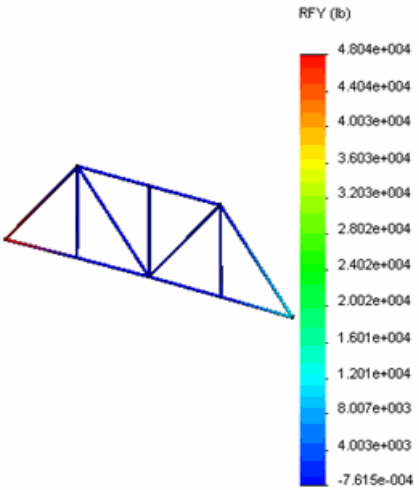


Рисунок 5.7 – Епюра сил реакції Y

Для зондування сил реакції:

- Натисніть правою кнопкою миші «Переміщення 2 (-Реакція Y-)» і виберіть «Зонд».
- Виберіть нижній лівий і нижній правий вузли в графічній області.
- Клацніть «ОК».

Сила реакції в лівому нижньому вузлі дорівнює 48000 фунтам. Сила реакції в нижньому правому вузлі дорівнює 16000 фунтам. Обидва значення узгоджуються з теоретичним розрахунком справжньою ферми.

Розглянемо напруження в стержнях ферми. В ідеальній фермі є тільки рівномірні осьові напруження стержнів.

Щоб побудувати графік осьових напружень:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Результати» та виберіть «Визначити эпюру втоми».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Відобразити»:

а) Виберіть ф/кв.дюйм в списку «Одиниці вимірювання».
б) Виберіть «Осьове» в розділі «Напруження балки».

- Клацніть «ОК».

Сила в стрижневому елементі дорівнює осьовому напруженню, помноженому на площу поперечного перерізу (рис. 5.8).

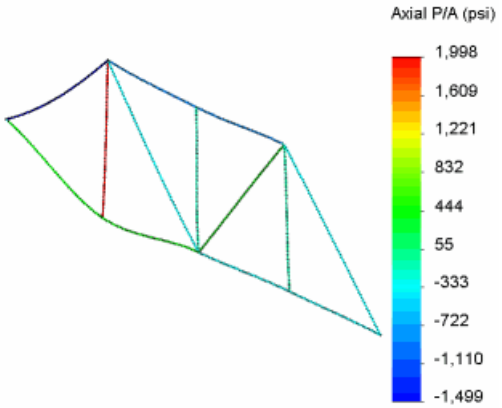


Рисунок 5.8 – Напруження в стержнях ферми

Лабораторна робота №6 (2 години)
Тема: **Аналіз втрати стійкості пластини**

Під аналізом втрати стійкості розуміється обчислення коефіцієнтів втрати стійкості (критичних) під навантаженням, а також відповідних мод втрати стійкості.

У даній лабораторній роботі ви ознайомитеся з наступними процедурами:

- Створення дослідження втрати стійкості під навантаженням;
- Визначення параметрів оболонки і призначення матеріалів;
- Застосування кріплень і навантажень до оболонок;
- Створення сітки моделей оболонок;
- Перегляд результатів аналізу втрати стійкості;
- Обчислення критичної поздовжнього навантаження.

6.1 Створення дослідження втрати стійкості

Розглядаються три прямокутні пластини 100×20 мм, з'єднані між собою (рис. 6.1). Центральна пластина має товщину 4 мм. Дві інші пластини мають товщину 2 мм.

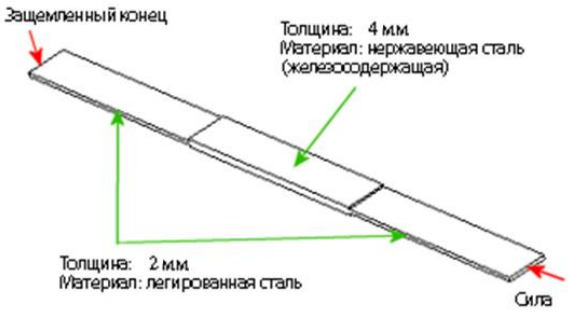


Рисунок 6.1 – Модель пластини

Щоб створити дослідження втрати стійкості під навантаженням:

- Відкрийте «3Plates - Surfaces.SLDPRT» в «Examples_dir».
- Натисніть на стрілку вниз в розділі «Консультант дослідження» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Нове дослідження».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Ім'я» виберіть «3Surfaces-Buckling».
- У розділі «Тип» натисніть «Втрата Стійкості».

- Натисніть кнопку «ОК».

Дана модель є оболонковою, а не твердотільною. Оскільки ліва і права оболонки моделі мають однакові розміри і матеріал, визначте їх за однаковою процедурою. Потім визначте середню оболонку в окремій процедурі.

Щоб відредагувати товщину лівої і правої оболонок:

- У дереві *Simulation* розгорніть папку «3plates – surfaces».
- Тримаючи клавішу *Ctrl*, виберіть «SurfaceBody2» і «SurfaceBody3» (рис. 6.2).



Рисунок 6.2 – Оболонки з товщиною 2 мм

- Натисніть правою кнопкою миші і виберіть «Редагувати визначення».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Тип» виберіть «Тонкий».
- Виберіть мм, потім введіть 2 в поле «Толщина оболонки».
- Клацніть «ОК».

Щоб відредагувати товщину середньої оболонки:

- У папці «3plates / surfaces» натисніть правою кнопкою миші на «SurfaceBody1» і виберіть «Редагувати визначення» (рис. 6.3).



Рисунок 6.3 – Оболонка з товщиною 4 мм

- У вікні *PropertyManager* в розділі «Тип» виберіть «Тонкий».
- Виберіть мм, потім введіть 4 в поле «Товщина оболонки».
- Клацніть «ОК».

Ліва і права оболонки виготовлені з легованої сталі, а середня оболонка виготовлена з нержавіючої сталі.

Щоб призначити леговану сталь лівій і правій оболонкам:

- У дереві дослідження *Simulation*, тримаючи клавішу *Ctrl*, виберіть «SurfaceBody 2» і «SurfaceBody 3».

- Натисніть правою кнопкою миші два обраних значка і оберіть «Застосувати/редагувати матеріал».
- З'явиться діалогове вікно «Матеріал».
- У «Матеріалах SolidWorks» виберіть «Легована сталь» в розділі «Сталь».
- Натисніть «Застосувати».
- Натисніть кнопку «Закрить».

Програмне забезпечення призначить леговану сталь лівій і правій оболонкам і з'являться прапорці на їх значках.

Також надайте значення «Нержавіюча сталь (ферритна)» у розділі «Сталь» в бібліотеці «Матеріалів SolidWorks» для середньої оболонки «SurfaceBody 1».

Застосуємо кріплення до одній кромці моделі, а силу до іншої кромки (рис. 6.4).

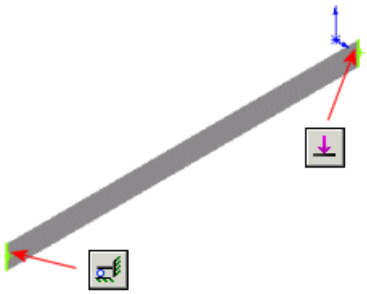


Рисунок 6.4 – Визначення кріплень та зусиль

Щоб зафіксувати ліву кромку моделі:

- Натисніть стрілку вниз в розділі «Консультант кріплень» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Зафиксована геометрія».

З'явиться вкладка *PropertyManager* «Кріплення». Обмеження «Фіксований» встановлює переміщення і обертання всіх точок вздовж обраної кромки на нуль.

- У графічній області виберіть ліву кромку моделі, як показано на рис. 6.4. «Кромка < 1 >» з'явиться у вікні «Грані, Кромки, Вершини для крепления».
- Клацніть «ОК».

На відміну від твердотільних моделей, фіксування кромки є достатнім для стабілізації моделі оболонки.

Щоб прикласти силу до правої кромці моделі:
- Натисніть стрілку вниз в розділі «Консультант по зовнішнім навантаженням» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Сила».
- У вікні «Сила/Обертовий момент» натисніть «Сила».
- Виберіть вікно «Грані, Кромки, Вершини, Довідкові точки для сили», потім виберіть праву крайку моделі в графічній області (рис. 6.4).
- Виберіть «Вибраний напрямок».
- Виберіть вікно «Грань, кромка, площина для напряму», потім виберіть площину «Передня» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager*.
- У полі «Одиниця вимірювання» виберіть систему СІ.
- У вікні «Сила» натисніть «Перпендикулярно площині» і введіть 1000.
- Клацніть «ОК».

Тепер створіть сітку моделі з глобальним розміром і допуском за замовчуванням, для цього:
- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші значок «Сітка» і виберіть «Створити сітку».
- У *PropertyManager* застосуєте настройки сітки з п. 2.1 (Налаштування параметрів формування кінцево-елементної сітки).
- Натисніть «ОК» щоб прийняти глобальний розмір і допуск «за замовчуванням» (рис. 6.5).

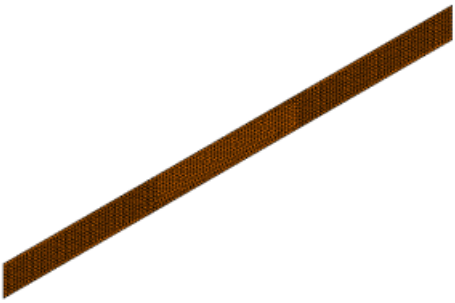


Рисунок 6.5 – Модель з КЕ сіткою

Щоб запустити дослідження: клацніть «Виконати» (*Simulation CommandManager*).

6.2 Аналіз результатів дослідження

Відображення першої моди форми втрати стійкості відповідає коефіцієнту критичної поздовжнього навантаження.

Щоб отримати коефіцієнт критичної поздовжнього навантаження:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Результати» та виберіть параметр «Показать коэффициент критической нагрузки при потере устойчивости».

Коефіцієнт критичного поздовжнього навантаження дорівнює приблизно ___.

- Натисніть кнопку «Закрити».

Щоб побудувати графік і анімувати форму коливань моди №1:

- У дереві досліджень *Simulation* відкрийте папку «Результати».
- Двічі клацніть «Переміщення1 (-Розташування результата -Форма коливань1-)» для відображення епюри. З'явиться форма коливань моди №1.
- Натисніть кнопку «Зверху» на панелі інструментів «Стандартний вид»
- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші епюру і виберіть «Анімувати».
- Клацніть «ОК».

Критичне поздовжнє навантаження (що викликає втрату стійкості) підраховується таким чином: критична поздовжнє навантаження = прикладене навантаження (і) × коефіцієнт критичного поздовжнього навантаження.

Для наявної моделі маємо: критичне поздовжнє навантаження = 1000×____ = ____ Н.

Лабораторна робота №7 (2 години)
Тема: **Модальний аналіз валу**

Частотний аналіз, так званий модальний або динамічний аналіз, розраховує резонансні (власні) частоти і відповідні форми (моди) коливань.

У даній лабораторній роботі ви ознайомитеся з наступними процедурами:
- Створення дослідження частотного аналізу;
- Призначення матеріалів і застосування кріплень (обмежень);
- Запуск частотного аналізу;
- Перегляд результатів частотного аналізу;
- Виведення списку коефіцієнтів масової участі;
- Оцінка точності результатів.

7.2 Проведення частотного аналізу

Щоб створити дослідження частотного аналізу:
- Відкрийте «Shaft.sldasm» (<Examples_dir> / Shaft.SLDASM).
- Натисніть стрілку вниз в розділі «Консультант дослідження» (*Simulation CommandManager*) і виберіть пункт «Нове дослідження».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Ім'я» виберіть «Freq-1».
- У розділі «Тип» натисніть «Частота».
- Клацніть «ОК».

Збірка валу (рис. 7.1) виготовлена зі сталі AISI 1020.

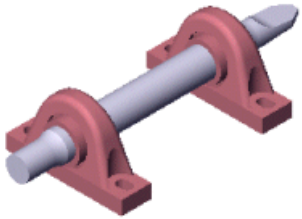


Рисунок 9.1 – Збірка валу

Щоб призначити сталь AISI 1020 всім компонентам:
- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші папку «Деталі» і оберіть «Застосувати матеріал до всіх».
- У діалоговому вікні «Матеріал» виконайте наступне:

а) Розгорніть «Матеріали SolidWorks».
б) Виберіть AISI 1020 в списку «Сталь».
в) Натисніть «Застосувати».
г) Натисніть кнопку «Закрити».

Програмне забезпечення призначає сталь AISI 1020 всім компонентами збірки. З'явиться прапорець на кожному значку в папці «Деталі».

Зафіксуйте показані на рис. 7.2 поверхні:
- Натисніть стрілку вниз в розділі «Консультант кріплень» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Зафіксована геометрія».
- У графічній області виберіть дві вказаних поверхні (рис. 7.2).

«Грань < 1 >» і «Грань < 2 >» з'являться в «Грані, кромки, вершини для кріплення».

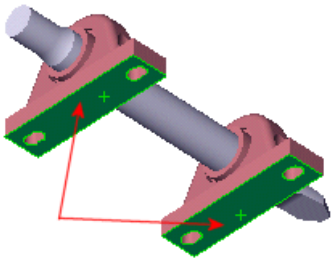


Рисунок 7.2 – Грані моделі, що закріплюються

В *SolidWorks* можна визначити епюри «за замовчуванням», які створюються для кожного типу аналізу, який запускається. Щоб задати епюри «за замовчуванням» для частотного дослідження:
- Натисніть «Simulation» / «Параметри».
- На вкладці «Налаштування за замовчуванням» виберіть «Результати дослідження по частотам/втраті стійкості».
- У вікні «Створити епюру для» виберіть «Для перших 5-и форм коливань».
- У полі «Тип результатів» виберіть «Переміщення» і «URES: Результуюче переміщення» для генерації епюр переміщення.
- Натисніть «OK».

Щоб створити сітку моделі і запустити дослідження:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші пункт «Сітка» і виберіть «Створити сітку» або натисніть кнопку зі стрілкою вниз у полі «Запуск» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Створити сітку».
- У *PropertyManager* застосуйте стандартні настройки сітки з п. 2.1 (Налаштування параметрів формування кінцево-елементної сітки).
- У розділі «Параметри» виберіть «Запуск (рішення) аналізу».
- Натисніть «ОК» щоб прийняти значення.

Щоб вивести список резонансних частот:

- Натисніть стрілку вниз в розділі «Результати» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Список резонансних частот».

У вікні «Список мод» перераховані: номер моди, резонансна частота (в рад/сек і Гц) і відповідний період в секундах.

- Для збереження перерахованих результатів у файлі Excel:
    а) Натисніть кнопку «Зберегти».
    б) Введіть «Frequency1» в полі «Ім’я файла».
    в) Натисніть кнопку «Зберегти».
- Натисніть кнопку «Закрити».

Щоб вивести список масової участі:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші на папку «Результати» та виберіть «Показати масову участь».

У діалоговому вікні «Масова участь» відобразяться номера форм коливань (мод), частоти (в рад/сек або Гц) і масова участь в X, Y і Z напрямках.

- Натисніть кнопку «Закрити».

Щоб перевірити похибку попередніх результатів, повторно створіть сітку моделі, використовуючи менший глобальний розмір елемента і перезапустіть дослідження.

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші значок «Сітка» і виберіть «Створити сітку».

З'явиться попереджувальне повідомлення про те, що створення сітки знову видалить існуючі результати.

- Натисніть ОК.
- З'явиться вікно *PropertyManager* «Сітка».

- У розділі «Параметри сітки» встановіть для параметра «Одиниці вимірювання» значення дюйми і встановіть для параметра «Глобальный размер» значення 6 мм.
- У розділі «Параметри» виберіть «Запуск (рішення) аналізу».
- Клацніть «ОК».

Щоб вивести список нових резонансних частот:

- Натисніть стрілку вниз в розділі «Результати» *Simulation CommandManager* і виберіть «Список резонансних частот».
- У діалоговому вікні зверніть увагу, що мода номер 1 зараз має частоту приблизно 3364 Гц і мода номер 2 має частоту приблизно 3383 Гц.
- Натисніть кнопку «Закрити».

Порівняння з попередніми результатами показує максимальна зміна приблизно на 0,3 %. Це вказує на те, що попередні результати є досить точними. Поточні результатами є більш точними, так як для сітки використовується менший розмір елемента.

Щоб переглянути основну форму (моду) коливань (рис. 7.3):

- У дереві дослідження *Simulation*, натисніть правою кнопкою миші на папку «Кріплення» та виберіть «Скрити все», щоб приховати позначення кріплень.
- Розгорніть папку «Результати» та натисніть правою кнопкою миші на «Деформація1 (-Розташування результату-Форма моди1-)» і виберіть «Редагувати визначення».
- У *PropertyManager* в розділі «Деформована форма» очистіть параметр «Відобразити кольори».
- Прийміть інші настройки, потім натисніть «ОК».

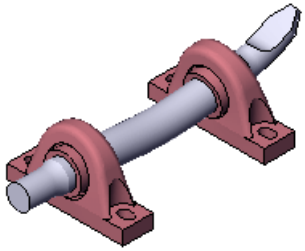


Рисунок 7.3 – Форма коливань валу

Для відображення первісної (недеформованої) моделі в основній формі (моді) коливань:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші «Деформація (-Розташування результату-Форма моди1)» та виберіть «Налаштування».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Параметри епюри деформації»:
  а) Виберіть «Помістити модель на деформовану форму».
  б) Виберіть у списку «Полупрозорий (один колір)».
  в) Натисніть на параметр «Редагувати колір», виберіть яскраво-блакитний колір і натисніть «ОК».
  г) Перемістіть бігунок «Прозорості» на 0,75.
- Клацніть «ОК».

З'явиться недеформована модель в основній формі (моді) коливань (рис. 7.4).

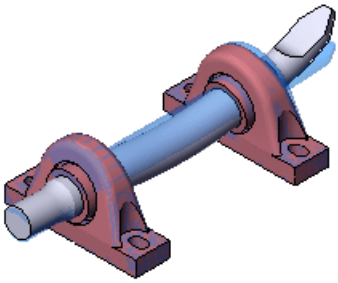


Рисунок 7.4 – Зпівставлення недеформованої моделі та основної моди коливань

Щоб переглянути інші форми (моди) коливань двічі клацніть «Переміщення2 (-Розташування результата -Форма коливань2-)» для відображення епюри (рис. 7.5).

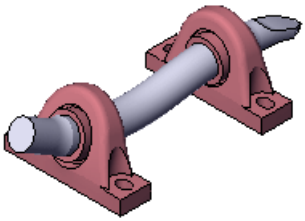


Рисунок 7.5 – Друга мода коливань валу

Лабораторна робота №8 (2 години)
Тема: **Втомний розрахунок ходової частини**

Епюра перевірки втоми, заснована на розрахунках знакозмінної напруги і меж витривалості матеріалу. Вона відображає області моделі, які сприйнятливі до втомного руйнування, а також міцні області. Щоб детально оцінити здатність моделі витримувати циклічні навантаження, необхідно провести дослідження на втому.

Компоненти збірки (рис. 8.1) піддаються знакозмінним навантаженням коли автомобіль рухається по рівній дорозі і заходить на віраж.

В даній лабораторній роботі ви навчитеся:

- Визначати недостатньо міцні ділянки збірки, схильні до втоми, за допомогою епюри перевірки втоми;
- Визначати подію втомного напруження з постійною амплітудою;
- Інтерпретувати результати аналізу втоми.

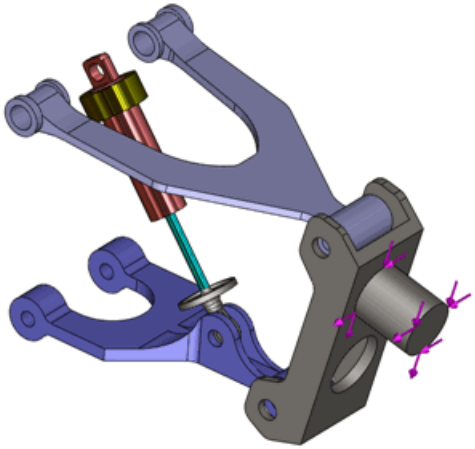


Рисунок 8.1 – Збірка елементу підвіски автомобіля

8.1 Статичне дослідження збірки підвіски для визначення зон можливих втомних руйнувань

У дослідженні збірки з назвою «Готово» вже визначені матеріали, з'єднання і навантаження.

- Відкрийте файл «VehicleSuspension.sldasm» в «<каталог_установки Simulation> / examples / Fatigue / VehicleSuspension.sldasm».
- Натисніть вкладку дослідження «Ready_Static» і вивчіть з'єднання, кріплення і навантаження. Особливо зверніть увагу на наступне:

  а) Для всіх деталей зборки вказана «Лита вуглецева сталь» з бібліотеки матеріалів *SolidWorks*.

  б) Деталі з'єднуються за допомогою чотирьох з'єднувачів штифтів і одного пружинного з'єднувача (рис. 8.2).

  в) Для циліндричних граней застосовуються п'ять фіксованих шарнірів (рис. 8.3).

  г) Завдяки фіксованому шарніру радіус і довжина циліндричної грані під навантаженням залишаються постійними. Циліндрична грань може тільки обертатися навколо своєї осі.

  д) Навантаження, що повідомляються передній маточині, імітують перенесення контактних сил, коли автомобіль закладає крутий віраж.

  е) Елементи управління сіткою застосовуються до округлених поверхонь з метою уточнення сітки в областях з більш високою кривизною.
- Натисніть «Виконати» на панелі інструментів «Моделювання».

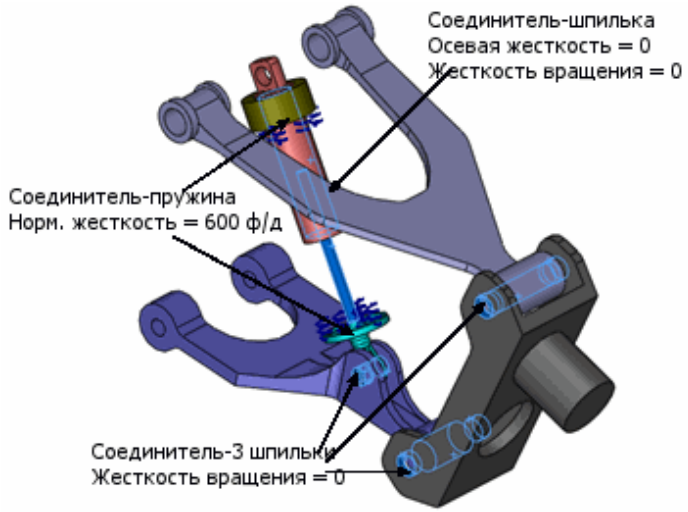


Рисунок 8.2 – З’єднання в моделі зборки підвіски

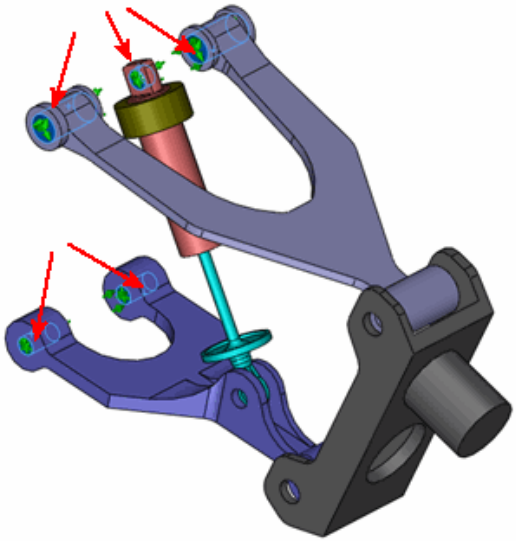


Рисунок 8.3 – Закріплення моделі зборки підвіски

Після запуску статичного дослідження потрібно задати епюру перевірки втоми, щоб визначити області моделі, які можуть бути пошкоджені внаслідок багаторазових навантажень.

- Натисніть правою кнопкою миші «Результати» та натисніть «Визначити епюру втоми».
- У *PropertyManager* в розділі «Коррегуючі коеффіцієнти»:

а) Натисніть «віднульове завантаження».

б) У вікні «Коэффициент впливу обробки поверхні» виберіть «Оброблена».

Поправочний коефіцієнт шорсткості поверхні дозволяє оцінити коефіцієнт місцевої концентрації напружень деталі, коли вона знаходиться в робочому стані.

в) У полі «Коеффіцієнт навантаження» виберіть «По осі».

Межі витривалості зазвичай визначаються з використанням тестових зразків при прикладанні згину. Зразок з доданою деформацією має нижчу межу витривалості.

г) У полі «Коеффіцієнт розміру» введіть 0,80.

На підставі експериментальних результатів можна зробити висновок, що деталі більшого розміру мають нижчу межу

витривалості, чим менші деталі. Значення необхідно ввести в діапазоні від 0,1 до 1.

При моделюванні коефіцієнт місцевої концентрації напружень для матеріалу вважається рівним половині межі міцності матеріалу. Результуючий коефіцієнт зниження втомної міцності дорівнює результуючому впливу трьох понижувальних коефіцієнтів і знижує коефіцієнт місцевої концентрації напружень матеріалу в 0,686 разів.

Виконуються розрахунки для епюри перевірки втоми (рис. 8.4). Червоний значок вказує, що частини моделі можуть піддатися пошкодження при багаторазових навантаженнях.

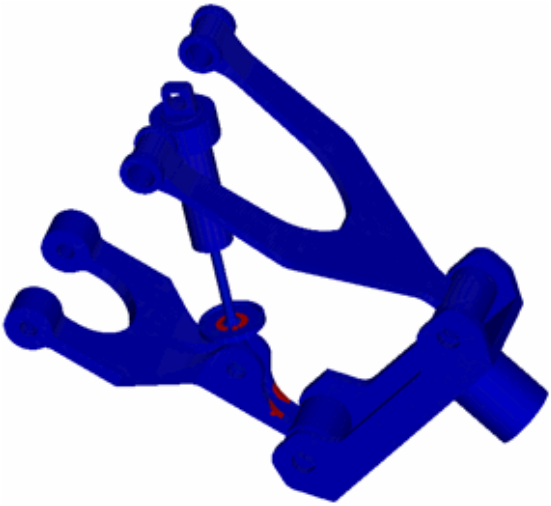


Рисунок 8.4 – Епюра вузлів низької довговічності

Області синього кольору – це області, в яких напруження настільки малі, що втому, яка виникає при зазначеному навантаженні, в розрахунок можна не приймати. Області червоного кольору – це області, в яких зазначена навантаження сприяє скороченню терміну служби збірки на певний відсоток. Області червоного кольору займають дуже невелику площу поверхні деталі.

Для збільшення мінімально прийнятного запасу міцності для коефіцієнта місцевої концентрації напружень матеріалу введіть в поле «Мінімальний запас міцності» значення 1,50 і натисніть Enter.

При моделюванні коефіцієнт місцевої концентрації напружень буде розділений на задану величину і оновиться колір деталей в графічній області. Зверніть увагу на те, що області, пофарбовані червоним, злегка збільшилися (рис. 8.5), так як коефіцієнт місцевої концентрації напружень зменшився.

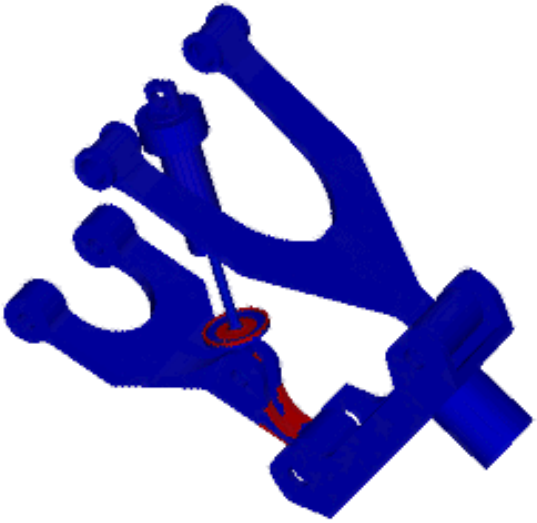


Рисунок 8.5 – Епюра вузлів низької довговічності 2

Для збільшення коефіцієнта місцевої концентрації напружень матеріалу (який дорівнює половині межі міцності матеріалу) введіть у поле «Масштаб» значення вище 1. Площа червоних областей скоротиться.

8.2 Дослідження збірки на втому

Дослідження втоми створюється для детальної оцінки міцності проектованої моделі.

- Клацніть правою кнопкою миші на вкладці дослідження Готовоі виберіть «Створити нове дослідження моделювання».
- У PropertyManager:
  а) У полі «Ім’я» введіть ім'я дослідження, наприклад, «Втома 1».
  б) У розділі «Тип» натисніть «Втома».
  в) Клацніть «ОК».

Буде створена вкладка «Втома 1». Дослідження на втому ґрунтується на події постійної амплітуди з певною кількістю циклів.

Подія втоми матеріалів постійної амплітуди повністю визначене знакозмінною напругою (амплітудою), середньою напругою (або коефіцієнтом напруги) і кількістю циклів навантаження. Всі цикли подій постійної амплітуди мають однакові знакозмінні і середні напруги.

Визначимо події втоми після виконання 20,000 циклів навантаження на основі статичного дослідження Ready_Static.

- В дереві дослідження на втому натисніть правою кнопкою миші «Нагрузка (-Постійна амплітуда)» і виберіть «Додати подію».
- В *PropertyManager*:
  а) В полі «Цикли» введіть значення 20000.
  б) В полі «Тип» навантаження виберіть «Відлік від нуля (LR = 0)»
  в) Клацніть «ОК».

Модуль *Simulation* створить значок «Подія-1» в папці «Навантаження». Під час кожного циклу навантаження в базовому статичному дослідженні значення навантажень, а значить і компонентів напружень, змінюються від максимуму до нуля (рис. 8.6).

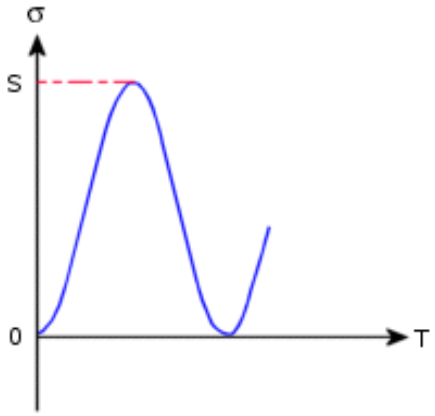


Рисунок 8.6 – Циклограма навантаження

В якості базового дослідження події втоми можна вибрати статичне дослідження, або отримати результуючі напруження після

виконання певного кроку рішення нелінійного дослідження або динамічного лінійного дослідження модальної часової діаграми.

Крива втоми SN з бази даних матеріалів застосовується до всіх деталей даної збірки.

- У дереві дослідження втоми правою кнопкою миші клацніть на папку «Деталі» і оберіть «Застосувати данні втоми до всіх тіл».
- У діалоговому вікні, на вкладці «Криві втоми SN», у вікні «Джерело»:
  а) Виберіть «Похідна від модулів пружності матеріалів».
  б) Натисніть «Криві аустенитної сталі по ASME». Графік кривої з'явиться у вікні попереднього перегляду.
- Натисніть «Застосувати» і потім «Закрити».

Після виконання аналізу втоми можна переглянути епюри терміну служби, пошкоджень і коефіцієнта навантаження.

- Натисніть «Виконати» на панелі інструментів «Моделювання», щоб прийняти параметри, задані «за замовчуванням» для властивостей дослідження на втому. Щоб переглянути властивості дослідження на втому, натисніть правою кнопкою миші значок дослідження і виберіть «Властивості».
- Натисніть правою кнопкою миші на «Результати» та виберіть «Визначити епюру втоми».
- У *PropertyManager* виберіть «Епюра пошкодження» та натисніть «ОК» (рис. 8.7). Епюра пошкодження показує на скільки відсотків зменшився термін служби компонента в результаті певної події втоми. В результаті події втоми термін служби компонента зменшився всього на 11,88 %.
- Перегляд видів моделі з різних сторін підтверджує, що область, яка отримала найбільші пошкодження, є однією з тих, які згідно епюрі перевірки втоми розглядалися як можлива причина втоми.
- Повторіть етапи 2 і 3, щоб переглянути результати втоми за параметрами «Термін служби» та «Коефіцієнт навантажень».

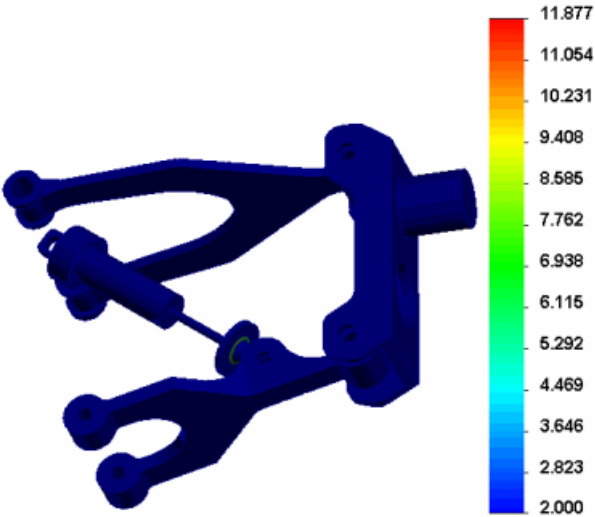


Рисунок 8.7 – Епюра пошкоджень

Епюра «Термін служби» показує, через скільки циклів станеться втомне руйнування компонента. Епюра «Коефіцієнт навантажень» показує коефіцієнт запасу міцності для втомного руйнування. Значення 2 коефіцієнта запасу міцності вказує, що подія втоми призведе до втомного руйнування компонента в даній області у разі подвійного збільшення всіх навантажень, заданих в базовому статичному дослідженні.

4 ЛІТЕРАТУРА

1. SOLIDWORKS Online Help: https://help.solidworks.com/2025/English/SolidWorks/sldworks/r_welcome_sw_online_help.htm

2. Козяр М.М. Комп'ютерна графіка. SolidWorks: навчальний посібник. / М.М. Козяр, Ю.В. Фещук, О.В. Парфенюк. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2018. – 251 с.

3. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем. Навч. посібник / В.Я. Ворощук, Т.М. Вітенько. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2021. 164 с.

4. Пустюльга С., Самостян В., Клак В. Інженерна графіка в SolidWorks. ЛНТУ, Луцьк 2018.– 174 с.

5. Planchard D.C. SOLIDWORKS 2020 Quick Start. / D.C. Planchard. – SDC Publications, 2020. – 280 p.

6.Huei-Huang Lee. Machanics of Meterials Labs with SolidWorks Simulation 2014 / 2014. – 278 с..

7. Інженерна графіка в SolidWorks: Навчальний посібник/ С.І. Пустюльга, В.Р. Самостян, Ю.В. Клак – Луцьк: Вежа, 2018. – 172 с.

Інформаційні ресурси

1. Електронні навчальні посібники SolidWorks.