

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до лабораторних робіт з курсу «CAD-CAE системи для
ПТДБМ машин» для студентів спеціальності 133
Галузеве машинобудування освітня програма
«Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні
машини і обладнання» усіх форм навчання**

2019

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу “CAD-CAE системи для ПТДБМ машин” для студентів спеціальності 133 Галузеве машинобудування освітня програма “Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання” усіх форм навчання. / Укл.: В.О. Лятуринський, Г.В. Клименко, М.В. Сидоренко. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 75 с.

Укладачі: В.О. Лятуринський, доцент, к.т.н.,
М.В. Сидоренко, доцент, к.т.н.,
Г.В. Клименко, ст. викладач

Рецензент: Г.П. Волков, доцент, к.т.н.

Відповідальний
за випуск: Л.М. Мартовицький, доцент, к.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри
“Деталі машин і ПТМ”
Протокол № 4
Від 23 січня 2019 р.

Рекомендовано
до видання
НМК М-факультета
Протокол № 5
Від 21 лютого 2019 р.

ЗМІСТ

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

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 нестационарними 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 тривимірний 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.

Найвний 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 Мізеса, 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. Різка 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: статички, коливаль, 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 $10^5 \dots 25 \times 10^6$ 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-гранні елементи). Як зазначалось вище, спільні точки елементів називаються вузлами. Типовий кінцевий елемент показано на (рис. 2.1).

Червоні точки позначають вузли елемента. 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.

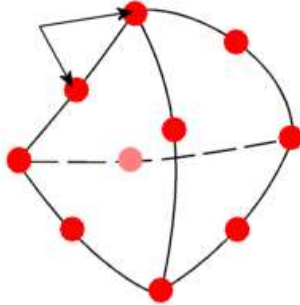


Рисунок 2.1 – Типовий кінцевий елемент

SolidWorks Simulation пропонує задати розмір глобального елемента, 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 / Сохранить как» і збережіть файл деталі з ім'ям «aw_hook - test.SLDPRT» в вашій персональній папці. Це дозволить знову використовувати вихідний файл.
- Натисніть «Мастер анализа SimulationXpress» або виберіть «Инструменты / SimulationXpress». Запускається помічник *Simulation Xpress*.
- На вкладці «Добро пожаловать» встановіть одиниці виміру «по умолчанию для SimulationXpress», вкажіть папку для збереження результатів аналізу і встановіть налаштування епюр результатів.

Для вибору параметрів аналізу:

- Виберіть «Параметры».
- Встановіть в параметрі «Единицы измерения» систему СИ.
- Натисніть на «...», щоб перейти до папки, в якій необхідно зберегти результати аналізу, і натисніть на кнопку «ОК».
- Виберіть «Показывать примечание для максимума и минимума в эпюрах результатов».
- Натисніть «ОК».
- Натисніть на кнопку «Далее».
- У даній таблиці (табл. 1.1) показані величини, які використовуються в *SimulationXpress* і відповідні одиниці вимірювання в різних системах одиниць вимірювання.

Таблица 1.1 – Величини, які використовуються в *SimulationXpress*.

		СИ	Англійська (IPS)
Навантаження	Сила	Н (Ньютон)	фунт
	Тиск	Н/м ²	фунт на квадратний дюйм (фунт/дюйм ²)
Властивості матеріалу	EX:Модуль пружності	Н/м ²	фунт на кв. дюйм
	NUXY:Коефіцієнт Пуассона	–	–
	SIGYLD:Межа текучості	Н/м ²	фунт на кв. дюйм
	DENS:Масова щільність	Кг/м ³	фунт/дюйм ³
Результати	Еквівалент напруження (по Мізесу)	Н/м ²	фунт на кв. дюйм

1.1.2 Застосування кріплень та навантажень

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

Щоб зафіксувати грань отвору:

- Виберіть «Добавьте крепление».
- У графічній області натисніть на грань отвору. «Грань <1>» відобразиться в полі вибору в *PropertyManager* – «Крепление», а позначення кріплення з'являться на обраній грані.
- Натисніть ОК. «Фиксированный-1» відобразиться в «дереве исследования» *SimulationXpress*, і галочка відобразиться поруч з папкою «Крепление» у верхній панелі помічника *SimulationXpress*, що означає, що даний крок завершено.

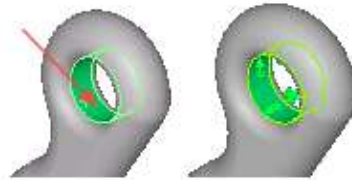


Рисунок 1.2 – Закріплення гака

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

Щоб прикласти силу:

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

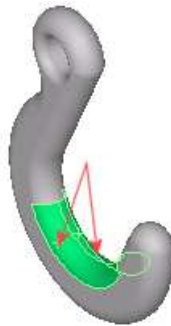


Рисунок 1.3 – Ділянка прикладання навантаження на гак

- Грань <1> і Грань <2> відобразяться в поле вибору в *PropertyManager* «Сила».
- Виберіть «Выбранное направление».
- У дереві конструювання *FeatureManager* натисніть *Plane2* (Плоскість2).
- Параметр «Плоскість2» відобразиться в поле «Плоскість для напрямлення». Зверніть увагу, що напрямок сили – вгору.
- Виберіть «Реверс напрямлення». Напрямок сили зміниться (рис. 1.4).

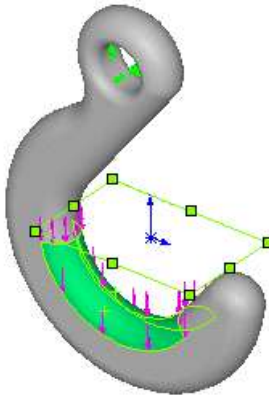


Рисунок 1.4 – Напрямок дії сили

- 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 «Нагрузки» у верхній панелі помічника *SimulationXpress*, що означає, що даний крок завершено.
- Виберіть «Далее». З'явиться крок «Материал».

1.1.3 Задання матеріалу

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

Щоб призначити леговану сталь для деталі:

- Виберіть параметр «Выберите материал».

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

1.1.4 Проведення розрахунку

Щоб виконати аналіз деталі:

- Натисніть кнопку «Запуск моделирования», щоб прийняти параметри кінцево-елементної сітки «по умовчанию». 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 «Результаты» в помічнику *SimulationXpress*.
- Після перегляду анімації виберіть «Остановка анимации».
- Виберіть «Да, продолжить», щоб переглянути результати.

У вікні «Результаты» 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 «Изменить настройки».
- Виберіть «Измените плотность сетки». Повідомлення попереджає вас про те, що повторне створення сітки призведе до видалення результатів.
- Натисніть «ОК», щоб закрити вікно попередження.

- У *PropertyManager* «Сетка» в розділі «Плотность сетки» перетягніть регулятор в крайнє праве положення.
- Натисніть ОК, щоб повторно створити сітку моделі.
- Натисніть кнопку «Далее».
- 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 «Отобразить напряжение 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 Мизесу, оскільки вони були обрані в «Параметрах», а маркер межі текучості відображається в нижній частині легенди епюри.

- Оберіть «Отображение анимации», щоб виконати анімацію епюри напружень.
- Оберіть «Остановка анимации», щоб зупинити анімацію.

1.1.7 Перегляд результатів епюри переміщення

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

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

- Виберіть «Просмотр результатов завершен».
- 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.sldprg».
- Виберіть «Файл / Сохранить как» 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/м ²
Коефіцієнт Пуассона	0.3
Межа текучості	5e8 Н/м ²
Масова щільність	7500 кг/м ³

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

- Натисніть «Редактировать материал» («Панель инструментов / Стандартная»). З'явиться діалогове вікно Матеріал.
- Щоб створити нову базу даних матеріалів:
 - а) Натисніть правою кнопкою миші на ліву панель і виберіть «Новая библиотека».
 - б) У полі «Имя файла» введіть ім'я нової бази даних матеріалів, наприклад: «My Materials» (Мої матеріали) і натисніть «Сохранить».

- Щоб створити нову категорію матеріалів:
 - а) Натисніть правою кнопкою миші на нову базу даних матеріалів і виберіть «Новая категория».
 - б) Введіть ім'я для класифікації матеріалу, наприклад, «Похожие на сталь материалы»
- 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 «Копировать».
 - б) Натисніть правою кнопкою миші на нову створену вами категорію і виберіть «Вставить».
 - в) Натисніть правою кнопкою миші на вашу копію леговоної сталі, виберіть «Переименовать» та введіть ім'я, наприклад, «Сталь рукояти».
- Щоб змінити властивості матеріалу, на вкладці «Свойства» 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 «Сохранить», «Применить», а потім «Закрыть».

Нова сталь буде призначена для деталі.

1.2.2 Налаштування аналізу

Натисніть «Мастер анализа» *SimulationXpress* або виберіть «Инструменты / SimulationXpress». Запускається помічник *SimulationXpress*.

Для вибору параметрів аналізу:

- Виберіть «Параметри».
- Встановіть для параметра «Единицы измерения» значення «SI».
- Оберіть потрібну папку і натисніть кнопку «ОК».
- Виберіть «Показывать примечание» для максимуму і мінімуму в епюрах результатів.
- Натисніть «ОК».
- Натисніть кнопку «Далее».

1.2.3 Застосування кріплень та навантажень

Щоб зафіксувати великий отвір:

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

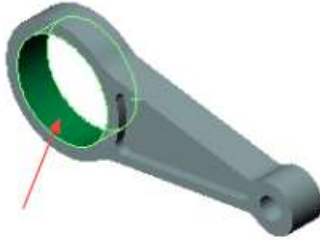


Рисунок 1.6 – Грань для закріплення

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

У цьому кроці застосовується зусилля в 4000 Н до верхньої циліндричної грані невеликого отвору. Грань невеликого отвору розділена за допомогою команди «Линия разъема».

Щоб прикласти силу:

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

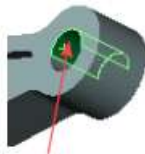


Рисунок 1.7 – Грань для навантаження

- Виберіть «Выбранное направление».

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

1.2.4 Аналіз моделі та перегляд результатів

Натисніть кнопку «Запуск моделювання», щоб прийняти параметри сітки «по умовчанию».

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 «Остановка анімації».
- Виберіть «Да, продолжить», 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 «Отобразить, в каких местах запас прочности ниже».

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).

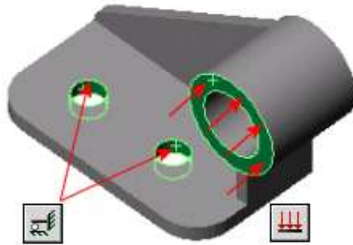


Рисунок 2.1 – Схема закріплення та навантаження кронштейну

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 «Редактировать материал» (панель інструментів «Стандартная» *SolidWorks*). З'явиться діалогове вікно «Материал».

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

Щоб створити статичне дослідження:

- Натисніть стрілку вниз в розділі «Консультант исследования» (*Simulation Command Manager*) і виберіть пункт «Новое исследование».
- У вікні *PropertyManager* в поле «Имя» введіть Static-1.
- У розділі «Тип» натисніть «Статическое».
- Натисніть «ОК».

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

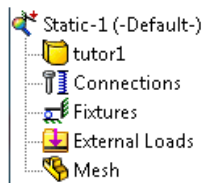


Рисунок 2.2 – Дерево керування дослідженням

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

Щоб зафіксувати два отвори:

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

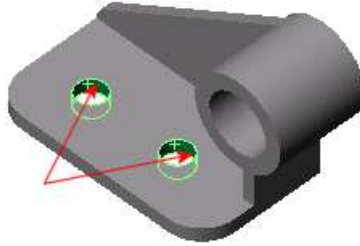


Рисунок 2.3 – Грані для закріплення

Щоб змінити колір позначень обмежень натисніть «Редактировать цвет» в списку «Настройки обозначения». Відкриється палітра. Виберіть бажаний колір і натисніть «ОК».

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

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

- Натисніть кнопку зі стрілкою вниз у полі «Внешние нагрузки» (*Simulation Command Manager*) і виберіть «Давление» або натисніть правою кнопкою миші «Внешние нагрузки» в дереві дослідження *Simulation* і виберіть «Давление».
- У *PropertyManager* на вкладці «Тип» в розділі «Тип» виберіть «Перпендикулярно выбранной грани».
- У графічній області виберіть грань в розділі «Грани для давления» (рис. 2.4).

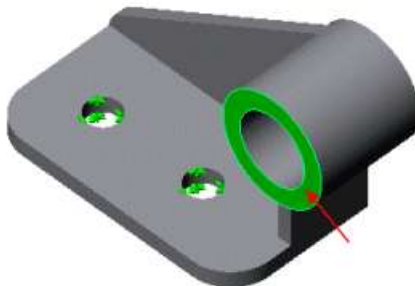


Рисунок 2.4 – Грань кронштейну для прикладення тиску

- У розділі «Значение давления» виберіть «МПа» в поле «Единицы измерения», потім введіть 7 у полі «Значение давления». 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 «Внешние нагрузки» 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 «Сетка» і виберіть «Создать сетку» або натисніть кнопку зі стрілкою вниз у полі «Запуск» (*Simulation Command Manager*) і виберіть «Создать сетку».
- У *PropertyManager* застосує наступні настройки.

У полі «Параметры сетки»:

- а) «Стандартная сетка» – обрано;
- б) «Глобальный размер» – обчислено програмою;
- в) «Допуск» – обчислено програмою;
- г) «Автоматический переход» – не обрано.

У вікні «Дополнительно»:

- а) «Меню проверки Якобиана» – встановити на 4 точки;
- б) «Сетка черного качества» – не обрана;
- в) «Автоматические пробы для твердых тел» – 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 создания сетки». Після завершення створення сітки модель з сіткою з'явиться в графічній області (рис. 2.5).

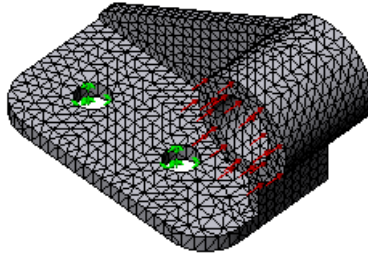


Рисунок 2.5 – Кронштейн із сіткою KE

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

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

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

Щоб приховати або показати сітку натисніть «Отобразить/скрыть сетку» на панелі інструментів *Simulation*.

2.2 Аналіз результатів розрахунку

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

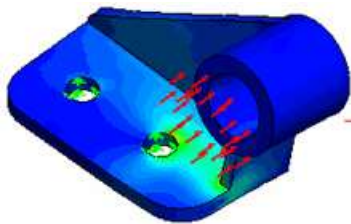


Рисунок 2.6 – Відображення епюри еквівалентних напружень

Епюра напружень створюється на деформованій 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 «Редактировать определение». У розділі «Отображение» встановіть у полі «Единицы измерения» потрібні одиниці вимірювання та натисніть «ОК».

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

Щоб додати епюру: натисніть правою кнопкою миші папку «Результаты» та виберіть «Определить эпюру <тип эпюры>»; встановіть потрібні параметри в *PropertyManager* і натисніть ОК.

Щоб побудувати графік результуючого переміщення:

- У дереві досліджень *Simulation* відкрийте папку «Результаты».
- Двічі клацніть «Перемещение (-Расположение результата-)» для відображення епюри (рис. 2.7).

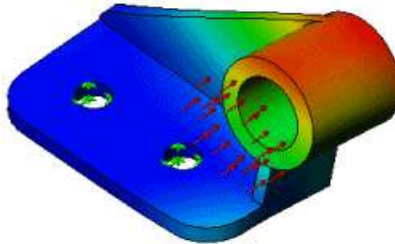


Рисунок 2.7 – Переміщення моделі

Щоб виконати анімацію епюри результуючого переміщення натисніть «Инструменты эпюры» (*Simulation Command Manager*) і виберіть «Анимировать». «По умолчанию» 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 «Результаты». Двічі клацніть «Деформация (-эквивалентная)» для відображення епюри (рис. 2.8).

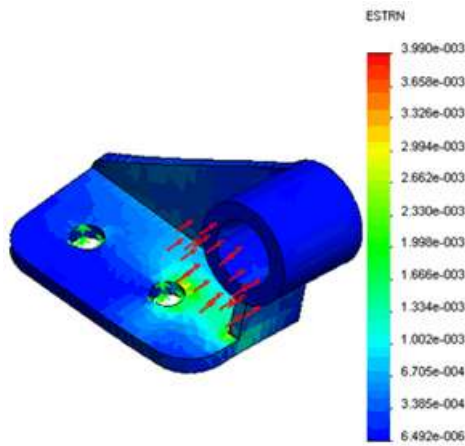


Рисунок 2.8 – Еквівалентні деформації моделі

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 «Результаты» та виберіть «Определить эпюру коэффициентов запаса прочности».
- З'явиться вікно *PropertyManager* «Запас прочности».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Шаг 1 из 3» виберіть «Максимальное напряжение von Mises» в поле «Критерий».
- Клацніть «Далее».
- У розділі «Шаг 2 из 3» виберіть «Для предела текучести».
- Натисніть кнопку «Далее».
- У розділі «Шаг 3 из 3», виберіть «Распределение запаса прочности».
- Натисніть «ОК».

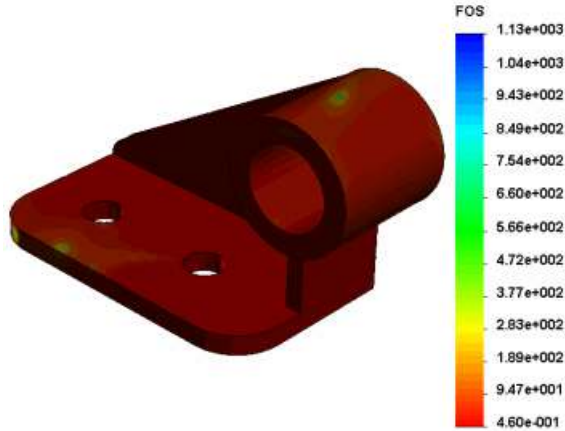


Рисунок 3.9 – Розподіл запасу міцності моделі

Щоб побудувати графік критичних областей деталі:

- Натисніть стрілку вниз в розділі «Консультант по результатам» (диспетчер команд *Simulation*) і виберіть «Новая эпора», «Запас прочности».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Шаг 1 из 3» виберіть «Максимальное напряжение von Mises» в поле «Критерий».
- Клацніть «Далее».
- У розділі «Шаг 2 из 3» виберіть «Для предела текучести».
- Натисніть кнопку «Далее».
- У розділі «Шаг 3 из 3»:
 - а) Виберіть «Области ниже запаса прочности».
 - б) Введіть 1 в поле «Запас прочности».
- 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).

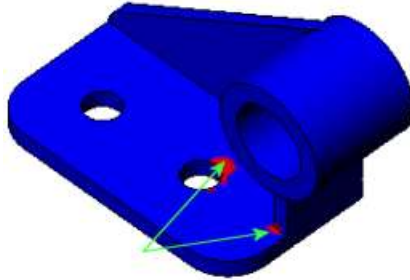


Рисунок 2.10 – Области кронштейну з низьким запасом міцності

Щоб краще бачити критичні області моделі, може знадобитися приховати позначення обмежень і тиску. Натисніть правою кнопкою миші на папки «Крепления» та «Внешние нагрузки» і виберіть «Скрыть все». Двічі натисніть значок «Запас прочности» в розділі «Результаты», щоб знову відобразити епіюру запасу міцності.

Для створення звіту дослідження:

- Клацніть «Отчет» (*Simulation Command Manager*).
- У діалоговому вікні в розділі «Разделы отчета»:
 - а) Очистіть розділи, не включені в дослідження: «Определения соединителей», «Данные контакта», «Данные датчиков», «Балки».
 - б) Можна додати коментарі до кожного включеного до звіту розділу. Виберіть розділ звіту, потім оновіть дані в полі «Свойства раздела».
- Введіть «Данные заголовка». Ці дані відображаються на початку звіту і у верхній частині кожної сторінки.
- В «Параметрах публикации отчета»:
 - а) Введіть «Первый отчет» в полі «Имя документа».
 - б) Виберіть «Отобразить отчет при публикации».
- Виберіть «Опубликовать».
- 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 «по умолчанию», виберіть Simulation, «Параметры». На вкладці «Настройки по умолчанию» виберіть

«Отчет». Виберіть формат звіту, вкажіть параметри та натисніть на кнопку «ОК».

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

2.3 Відстеження тенденцій в результатах

Функція «Виявити тенденцію» 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 «TrendTracker.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 «Выполнить».
- Після завершення аналізу визначте епюру напружень по Мизесу та епюру переміщення URES (рис. 2.12).

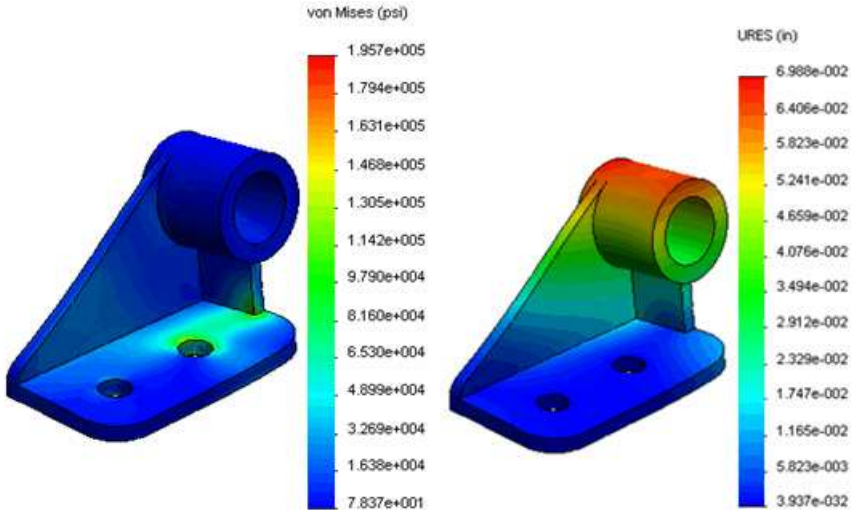


Рисунок 2.12 – Епюри напружень та перемішень моделі

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 «Виявить тенденцію».

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

Натисніть правою кнопкою миші «Виявить тенденцію» і виберіть «Установить 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 «Виявить тенденцію» з'являться графіки: «По умолчанию», «Масса». Також з'являться графіки «Напряжения» і «Перемещения», так як епюри *von-Mises* і *URES* визначені в папці «Результаты».

Додайте датчик для моніторингу змін 1-ї головної напруги:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Датчики» у дереві конструювання *FeatureManager* і виберіть «Добавить датчик».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Тип датчика» виберіть «Данные моделирования».
- У вікні «Данные количественной величины» виберіть:
 - а) Переконайтеся, що у вікні «Результаты» обрано пункт «Напряжение».
 - б) Виберіть «P1: 1-е главное напряжение» в поле «Компонент».
- У розділі «Свойства»:
 - а) Виберіть МПа в списку «Единицы измерения».
 - б) Виберіть «Макс модели» в поле «Критерий».
- Клацніть «ОК».
- Натисніть правою кнопкою миші функцію «Выявить тенденцию» в дереві дослідження *Simulation* і виберіть «Добавить график отслеженных данных».
- У вікні *PropertyManager* виберіть «Напряжение-2» в полі «Список датчиков».
- Натисніть кнопку «ОК».

Новий графік даних для напруги відкриється в папці «Выявление тенденции».

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 тенденций», щоб побачити зміни в результуючих величинах:

- У дереві конструювання *FeatureManager* розгорніть елемент «Boss-Extrude3 (Бобышка-Вытянуть3)» і виберіть «Sketch4 (Эскиз4)».
- Двічі натисніть на розмір 8 в графічному вікні. Він називається «D1@Sketch4» (рис. 2.13).

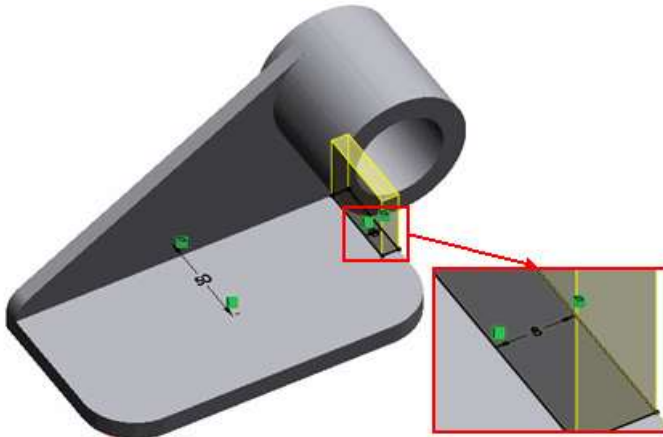


Рисунок 2.13 – Зміна ширини фланця

- У діалоговому вікні «Изменить» введіть 10мм.
- Натисніть «ОК», потім натисніть «Перестроить».
- У *PropertyManager* «Размер» натисніть ___. Вийдіть з ескізу.
- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші дослідження «Готово» і виберіть «Выполнить».
- Повторіть всі попередні кроки двічі, але змініть розмір моделі на 12 мм і 14 мм відповідно.
- Натисніть правою кнопкою миші «Выявить тенденцию» та «Открыть».
- Прокрутіть до низу журналу, щоб переглянути інформацію о «Повторе 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 (Вытянуть1)», «Fillet1 (Скругление1)», и «Fillet2 (Скругление2)» і виберіть «Высветить».

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 «Выполнить».

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

Натисніть правою кнопкою миші папку «Виявить тенденцію» і виберіть «Просмотр Галереи». 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).

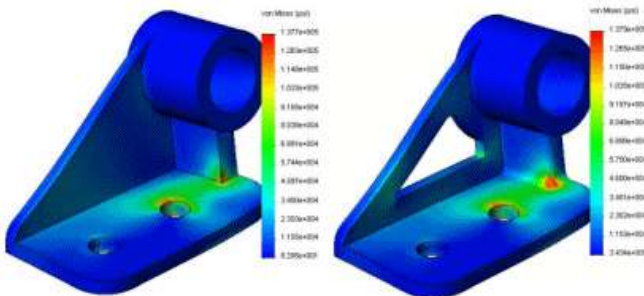


Рисунок 2.15 – Епюри зображень по Мізесу

Закрийте програму перегляду малюнків і факсів Windows.

3.4.3 Зміна розміру отвору

Тепер змінимо діаметр отвору:

- Перейдіть на дерево конструювання *FeatureManager*.
- Виправте «Ескиз7 Cut-Extrude1 (Вырез-Вытянуть1)», клацнувши правою кнопкою миші елемент і виберіть «Редактировать эскиз».
- Двічі клацніть на розмір діаметру 42 мм і змініть його на 30 мм.
- Натисніть *Ctrl+B*, щоб закрити ескиз 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 «Выполнить».

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.

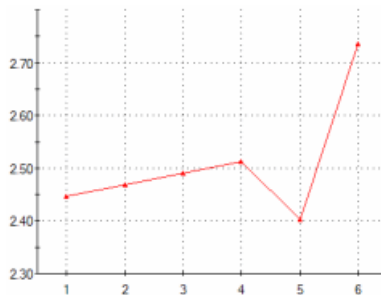


Рисунок 2.17 – Графік зміни маси моделі

- Двічі натисніть на «Напряжение1», що відповідає напрузі по Мізесу.

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

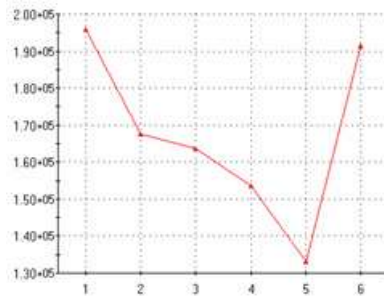


Рисунок 2.18 — Графік зміни напружень

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 «Виявить тенденцію» і виберіть «Восстановить модель до итерации».
- У діалоговому вікні виберіть «Повтор 5» і натисніть «ОК».
- Натисніть «Да» 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 тенденций» в папці «Выявление тенденции» та «Открыть».
- Прокрутіть до низу документа.
- Закрийте документ.

Лабораторна робота №3 (2 години)

Тема: Аналіз шківів 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 шківів

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 «Использовать мягкую пружину для стабилизации модели»
- Матеріал – легована сталь

- Обмеження на верхній і нижній кромках моделі «Использовать справочную геометрию» (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Нижня кромка

Прикладаємо навантаження на опору:

- Натисніть правою кнопкою миші на папку «Внешние нагрузки» дослідження «Partial(Частичное)-BearingLoad» і виберіть «Рабочая загрузка».
- У вікні *PropertyManager* виберіть «Цилиндрические грани и круговые кромки оболочки для рабочей нагрузки», потім виберіть нижню поверхню центрального отвору (рис. 3.3)

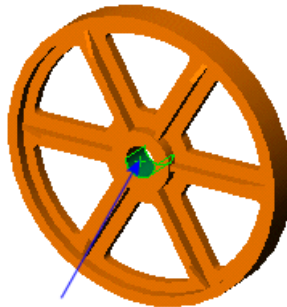


Рисунок 3.3 – Половина поверхні циліндричного отвору

- Клацніть «Выберите систему координат», потім виберіть «Система координат 1» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager*.
- У вікні «Нагрузка на опору»:

а) Виберіть «Английская (ДФС)» в меню «Единицы измерения».

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

- Виберіть параметр «Синусоидальное распределение».
- Клацніть «ОК».

Щоб створити сітку моделі і запустити дослідження:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші значок «Сетка» і виберіть «Создать сетку».
- У розділі «Параметры» виберіть «Запуск (решение) анализа».
- 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 «Результаты» та виберіть «Список результирующих сил».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Выбор»:
 - а) Виберіть «Система координат 1» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для «Плоскость, ось или система координат».
 - б) Виберіть «Английская (ДФС)» в меню «Единицы измерения».
 - в) Виберіть показану кромку для «Грани», «Кромки или Вершины».
 - г) Натисніть кнопку «Обновить» (рис. 3.4).

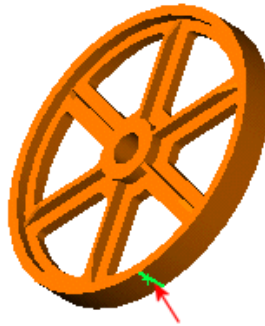


Рисунок 3.4 – Кромка для виводу сил реакцій

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).

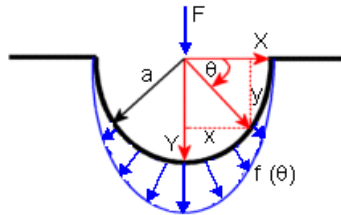


Рисунок 3.5 – Розподіл сил на поверхню центрального отвору

$$f(\theta) = F_0 \cdot \sin(\theta) = (F_0) \cdot (y/a) = 1,333 \cdot F_0 \cdot y,$$

де $f(\theta)$ – інтенсивність сили;

a – радіус отвору;

F_0 – коефіцієнт масштабування, розрахований програмою таким, як сума всіх сил, що впливають на вузли у вертикальному напрямку ($\sum F_0 \cdot \sin^2(\theta)$), 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).

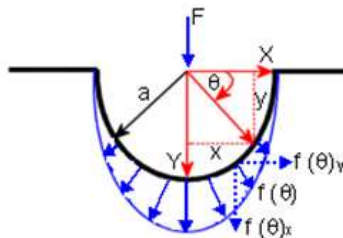


Рисунок 3.6 – Розподіл сили за напрямками

$$f(\theta) = F_0 \cdot \sin(\theta)$$

Вертикальні та горизонтальні компоненти сили відповідно:

$$f(\theta)_y = F_0 \cdot \sin^2(\theta); \quad f(\theta)_x = F_0 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta).$$

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:

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

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

Прикладемо нерівномірну силу:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Внешние нагрузки» дослідження «Частичное-NonuniformForce» і виберіть «Сила».

- У PropertyManager на вкладці «Тип» в розділі «Сила/Вращающий момент»:

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

б) Виберіть вікно «Грани и кромки оболочки для нормальной силы», потім виберіть нижню грань центрального отвору.

- У полі «Единица измерения» виберіть «Английская (IPS)».

- У полі «Значение силы» введіть 891 і очистіть параметр «Реверс направления», щоб сила в 891 фунтів була спрямована радіально на зовню.

- Встановіть прапорець «Неравномерное распределение» і виконайте такі дії:

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

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

Значення Y , що було використано є інверсним радіусом отвору – $1/a$ (тут $r_{\text{отв}} = a = 0,75''$), бо наше рівняння виглядає $f(\theta) = (F_0) \cdot (y/a)$.

- 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.

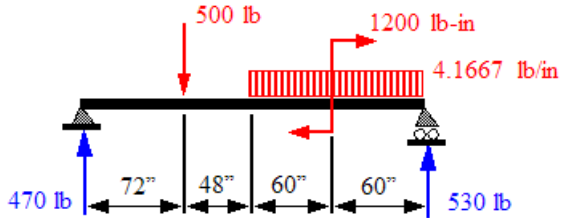


Рисунок 4.1 – Балка на 2-х опорах

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 исследования» (*Simulation Command Manager*) і виберіть «Новое исследование».
- У менеджері властивостей виконайте наступні дії:
 - а) Введіть *ShearMoment* в поле «Имя».
 - 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 «Рассматривать как балку».
 - б) Натисніть правою кнопкою миші на «SolidBody 2» і виберіть «Рассматривать как балку».

- Натисніть правою кнопкою миші на «Группу соединений» і виберіть «Редактировать».
- У *PropertyManager* «Редактировать соединения» в розділі «Выбранные балки» натисніть «Вычислить». Три з'єднання відобразяться у вікні «Результаты».
- Натисніть «ОК».

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

Застосуємо матеріал:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «beam_diagrams» і виберіть «Применить материал ко всем телам».
- Призначте «Легированная 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 «Группа соединений» і виберіть «Редактировать».
- У вікні *PropertyManager* три з'єднання відображаються в розділі «Результаты» (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).

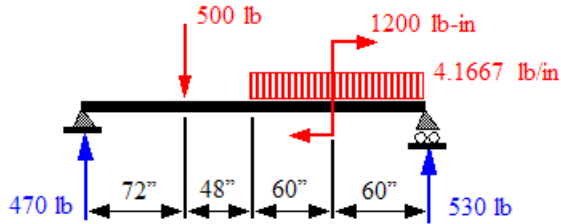


Рисунок 4.3 – Закріплення моделі

Щоб змоделювати шарнір на кінці А:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Крепления» та виберіть «Зафиксированная геометрия».
- Змініть орієнтацію виду на «Изометрия», щоб безпомилково вибрати правильні з'єднання.
- У менеджері властивостей виконайте наступні дії:
 - а) Виберіть «Неподвижное (нет перемещений)» в параметрі «Стандартный».
 - б) Оберіть з'єднання, показане для параметра «Соединения».
- Натисніть «ОК».

Щоб змоделювати ролик на кінці В:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Крепления» та виберіть «Зафиксированная геометрия».
- У менеджері властивостей виконайте наступні дії:
 - а) Виберіть «Использовать справочную геометрию» в параметрі «Стандартный».
 - б) Оберіть з'єднання, показане для параметра «Соединения» (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Вузел першого закріплення

в) Виберіть «Передню плоскість» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для параметра «Грань», «кромка», «плоскість», «оси для напрямлення».

- У полі «Перемещения» натисніть «Вдоль плоскости - направление 1» і «Вдоль плоскости - направление 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 – «Изометрия».
- Клацніть правою кнопкою миші «Внешние нагрузки» і виберіть «Сила».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Выбор»:
 - а) Натисніть «Вершины», «Точки» і виберіть «Точка1» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager*.
 - б) Виберіть «Передню плоскість» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для параметра «Грань», «кромка», «плоскість для напрямлення».
- Для «Единица измерения выберите» виберіть англійська (IPS).
- У списку «Сила»:
 - а) Натисніть «Вдоль плоскости - направление 2».
 - б) Введіть 500 фунт-сил (226,796 кг).
 - в) Виберіть «Реверс напрямлення».
- Натисніть «ОК» (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Сила 1

Щоб докласти зосереджений момент:

- Клацніть правою кнопкою миші «Внешние нагрузки» і виберіть «Сила».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Выбор»:
 - а) Натисніть «Вершины», «Точки» і виберіть «Точка2» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager*.
 - б) Виберіть передню площину в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для параметра «Грань», «кромка», «плоскость для направления».
- Для «Единица измерения выберите» англійська (IPS).
- У розділі Момент:
 - а) Натисніть «Вдоль плоскости - направление 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 «Внешние нагрузки» і виберіть «Сила».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Выбор»:
 - а) Клацніть «Балки» і виберіть «Вытяжка2» в графічній області. Можна прикласти розподілені навантаження тільки на всю довжину балки.
 - б) Виберіть «Переднюю плоскость» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для параметра «Грань», «кромка», «плоскость для направления».
- У меню «Единицы измерения» виберіть «Английская (ДФС)» і виберіть «На единицу длины».
- У списку «Сила»:
 - а) Натисніть «Вдоль плоскости - направление 2».

- б) Введіть 4,1667 фунт-дюйм.
- в) Виберіть «Реверс напрямлення».
- Натисніть «ОК» (Рис. 4.7).

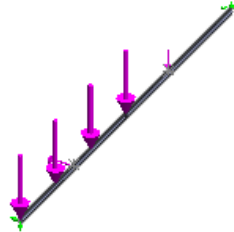


Рисунок 4.7 – Розподілене навантаження балки

Щоб створити сітку моделі і запустити дослідження:

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

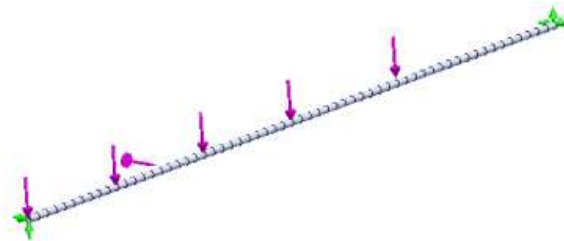


Рисунок 4.8 – Кінцево-елементна сітка балки

- 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 «Результаты» та виберіть «Определить диаграмму балки».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Отобразить»:
 - а) Виберіть «Поперечная сила в направлении 1» в «Компонент».
 - б) Виберіть фунт-сила в списку «Единицы измерения».

- Клацніть «ОК».
- Змініть орієнтацію виду, встановивши «Слева» (рис. 4.9).

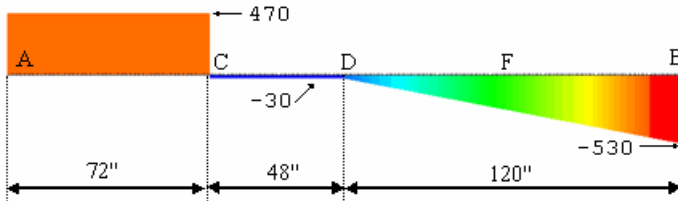


Рисунок 4.9 – Епюра поперечних сил

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

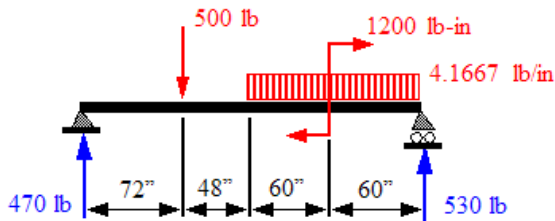


Рисунок 4.10 – Теоретичні значення поперечних сил

Розглянемо епюру згинальних моментів:

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

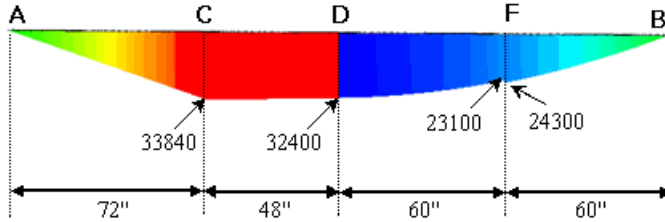


Рисунок 4.11 – Епюра згинальних моментів

Виведемо список зусиль в балці:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Результаты» та виберіть «Список сил балки».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Список»:
 - а) Виберіть «Силы».
 - б) Виберіть «Английская (ДФС)» у розділі «Единицы измерения».
- Клацніть «ОК».

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

Таблица 4.1 – Значення сил і моментів в ключових точках

	Точка А	Точка D	Точка В
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 «Результаты» та виберіть «Определить эпюру усталости».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Отобразить»:
 - а) Виберіть ф/кв.дюйм як «единица измерения».
 - б) Виберіть «Изгиб в местном направлении 2» в полі «Напряжение балки».

- Клацніть «ОК» (рис. 4.12).

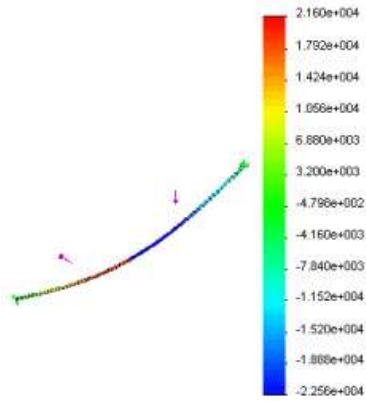


Рисунок 4.12 – Епюра напружень від згину

Лабораторна робота №5 (2 години)

Тема: Статичний аналіз ферми

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

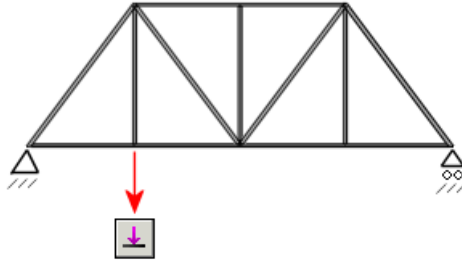


Рисунок 5.1 – Модель ферми для розрахунку

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.SLDPRТ» перейдіть в «<Examples_dir> / Beams Beam_Truss.SLDPRТ».
- Натисніть на стрілку вниз в розділі «Консультант исследования» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Новое исследование».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Имя» виберіть «Стержень».
- У розділі «Тип» натисніть «Статическое».
- 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 «Редактировать определение».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Тип» виберіть «Стержень».
- Клацніть «ОК».

Щоб призначити матеріали:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Beam_Truss» і виберіть «Применить материал ко всем телам».
- Призначте матеріал користувача з наступними властивостями:
 - а) Модуль пружності = $3e7$ фунт/кв.дюйм;
 - б) Коефіцієнт Пуассона = 0,3;
 - в) Масова щільність = 0,28 фунт/дюйм³;
 - 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 соединений» і виберіть «Редактировать».
- Вісім з'єднань відобразяться у вікні «Результаты».

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

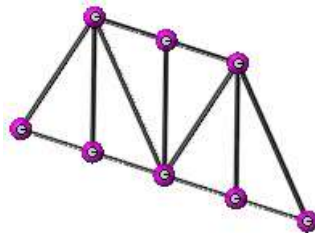


Рисунок 5.2 – З'єднання ферми

- 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 «Внешние нагрузки» і виберіть «Сила».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Выбор»:
 - а) Виберіть «Соединения».
 - б) Оберіть з'єднання, показане для параметра «Соединения» (рис. 5.3).

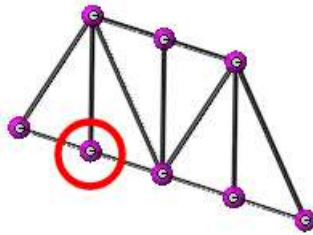


Рисунок 5.3 – Вузол прикладання навантажень

- Виберіть «Передняя» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для параметра «Грань», «кромка», «плоскость для направления».
- Для «Единица измерения» виберіть англійська (IPS).
- У списку Сила:
 - а) Натисніть «Вдоль плоскости - направление 2».
 - б) Введіть 64000.
 - в) Виберіть «Реверс направления» таким чином, щоб сила була спрямована вниз.
- Клацніть «ОК».

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

Щоб запобігти руху поза площиною:

- Натисніть правою кнопкою миші папку «Крепления» та виберіть «Зафиксированная геометрия».
- У *PropertyManager* в розділі «Стандартные (Зафиксированная геометрия)»:
 - а) Виберіть параметр «Использовать справочную геометрию».
 - б) Виберіть шість показаних з'єднань для параметра «Соединения» (рис. 5.4).

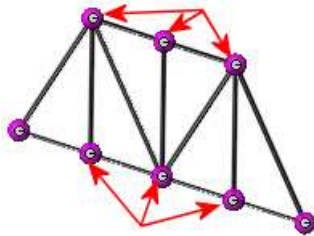


Рисунок 5.4 – Вузли для фіксації руху в межах одної площини

- в) Виберіть «Передняя» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager* для «Грань», «Кромка», «Плоскость», «Оси для направления».
- У вікні «Перемещения», натисніть кнопку «Перпендикулярно плоскости» і переконайтеся, що значення дорівнює нулю.
 - Клацніть «ОК».

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

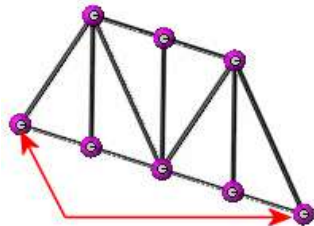


Рисунок 5.5 – Закріплення ферми

Щоб створити сітку моделі і запустити дослідження:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші значок «Сетка» і виберіть «сетку Создать».
- 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 «Результаты» та виберіть «Определить эпюру перемещения».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Отобразить»:
 - а) Виберіть «UY: Перемещение по Y в Компонент».
 - б) Виберіть «Дюйм», як одиниці виміру.
- У списку «Деформированная форма» виберіть «Определяемые пользователем».
- Клацніть «ОК».

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

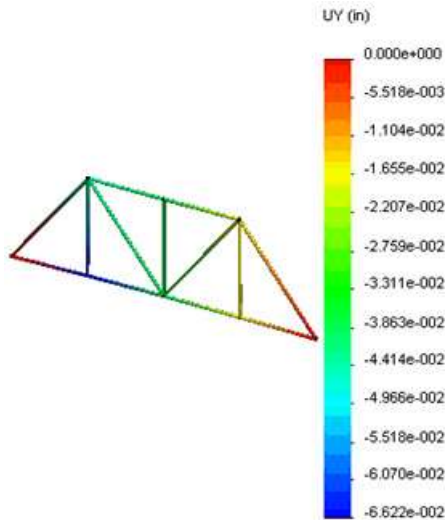


Рисунок 5.6 – Епюра переміщень ферми

Побудуємо графік сил реакції (рис. 5.7):

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші на папку «Результаты» та виберіть «Определить эпюру перемещения».

- У вікні *PropertyManager* в розділі «Отобразить»:
 - а) Виберіть «RFY: сила реакції Y в Компонент».
 - б) Виберіть фунт-сила в списку «Единицы измерения».
- У списку «Деформированная форма» виберіть «Определяемые пользователем».
- Клацніть «ОК».

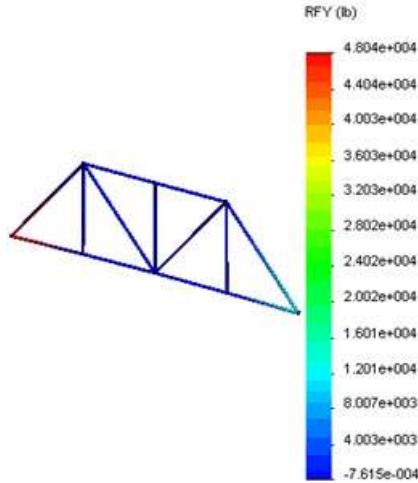


Рисунок 5.7 – Епюра сил реакції Y

Для зондування сил реакції:

- Натисніть правою кнопкою миші «Перемещение 2 (-Реакция 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 справжньої 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 «Результаты» та виберіть «Определить эпюру усталости».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Отобразить»:
 - а) Виберіть ф/кв.дюйм в списку «Единицы измерения».
 - б) Виберіть «Осевое» в розділі «Напряжение балки».
- Клацніть «ОК».

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

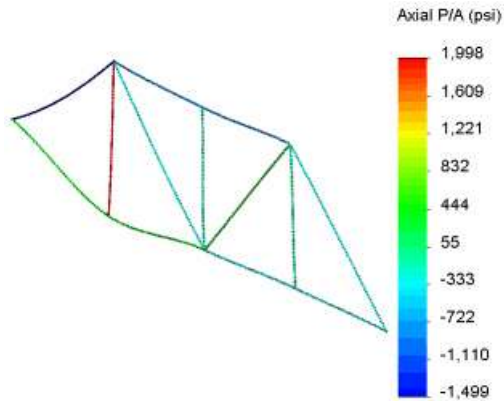


Рисунок 5.8 – Напруження в стержнях ферми

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.

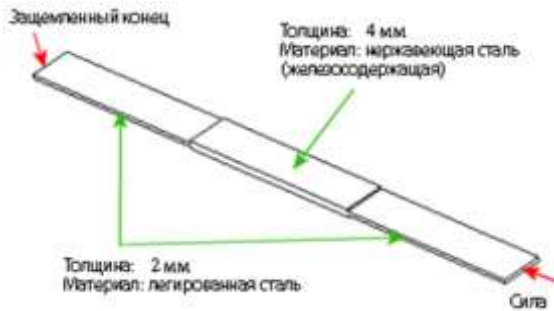


Рисунок 6.1 – Модель пластини

Щоб створити дослідження втрати стійкості під навантаженням:

- Відкрийте «3Plates - Surfaces.SLDPRT» в «Examples_dir».
- Натисніть на стрілку вниз в розділі «Консультант исследования» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Новое исследование».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Имя» виберіть «3Surfaces-Buckling».

- У розділі «Тип» натисніть «Потеря устойчивости».
- 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 оболонки:

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



Рисунок 6.2 – Оболонки з товщиною 2 мм

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

Щоб відредагувати товщину середньої оболонки:

- У папці «3plates / surfaces» натисніть правою кнопкою миші на «SurfaceBody1» і виберіть «Редактировать определение» (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 «Толщина оболочки».
- 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*, тримавши клавішу *Ctrl*, виберіть «SurfaceBody 2» і «SurfaceBody 3».

- Натисніть правою кнопкою миші два обраних значка і оберіть «Применить/редактировать материал».
- З'явиться діалогове вікно «Материал».
- У «Материалах SolidWorks» виберіть «Легированная сталь» в розділі «Сталь».
- Натисніть «Применить».
- Натисніть кнопку «Закричь».

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

Також надайте значення «Нержавеющая сталь (ферритная)» у розділі «Сталь» в бібліотеці «Материалов SolidWorks» для середньої оболонки «SurfaceBody 1».

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

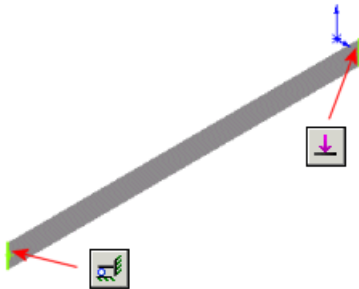


Рисунок 6.4 – Визначення кріплення та зусиль

Щоб зафіксувати ліву кромку моделі:

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

З'явиться вкладка *PropertyManager* «Крепления». Обмеження «Фиксированный» 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 «Грани, Кромки, Вершины для кріплення».
- 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 внешним нагрузкам» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Сила».
- У вікні «Сила/Вращающий момент» натисніть «Сила».
- Виберіть вікно «Грани, Кромки, Вершины, Справочные точки для силы», потім виберіть праву крайку моделі в графічній області (рис. 6.4).
- Виберіть «Выбранное направление».
- Виберіть вікно «Грань, кромка, плоскость для направления», потім виберіть площину «Спереди» в плаваючому дереві конструювання *FeatureManager*.
- У полі «Единица измерения» виберіть систему СИ.
- У вікні «Сила» натисніть «Перпендикулярно плоскости» 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 «Сетка» і виберіть «Создать сетку».
- У *PropertyManager* застосуєте настройки сітки з п. 2.1 (Налаштування параметрів формування кінцево-елементної сітки).
- Натисніть «ОК» щоб прийняти глобальний розмір і допуск «по умолчанию» (рис. 6.5).

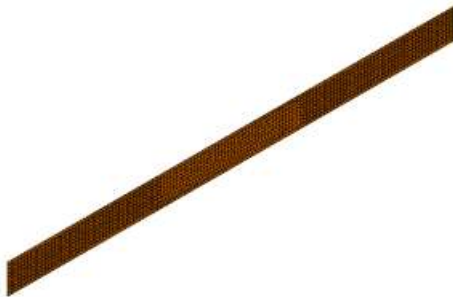


Рисунок 6.5 – Модель з KE сіткою

Щоб запустити дослідження: клацніть «Выполнить» (*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 «Результаты» та виберіть параметр «Показать коэффициент критической нагрузки при потере устойчивости».

Коефіцієнт критичного поздовжнього навантаження дорівнює приблизно ____.

- Натисніть кнопку «Закрыть».

Щоб побудувати графік і анімувати форму коливань моди №1:

- У дереві досліджень *Simulation* відкрийте папку «Результаты».
- Двічі клацніть «Перемещение1 (-Расположение результата -Форма колебания1-))» для відображення епюри. З'явиться форма коливань моди №1.
- Натисніть кнопку «Сверху» на панелі інструментів «Стандартный вид»
- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші епюру і виберіть «Анимировать».
- Клацніть «ОК».

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

Для наявної моделі маємо: критичне поздовжнє навантаження = $1000 \times \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Н.}$

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 исследования» (*Simulation CommandManager*) і виберіть пункт «Новое исследование».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Имя» 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 «Детали» і оберіть «Применить материал ко всем».
- У діалоговому вікні «Материал» виконайте наступне:

- а) Розгорніть «Материалы SolidWorks».
- б) Виберіть AISI 1020 в списку «Сталь».
- в) Натисніть «Применить».
- г) Натисніть кнопку «Закреть».

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

Зафіксуйте показані на рис. 7.2 поверхні:

- Натисніть стрілку вниз в розділі «Консультант крeплений» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Зафиксированная геометрия».
- У графічній області виберіть дві вказаних поверхні (рис. 7.2).

«Грань < 1 >» і «Грань < 2 >» з'являться в «Грани, кромки, вершины для крeпления».

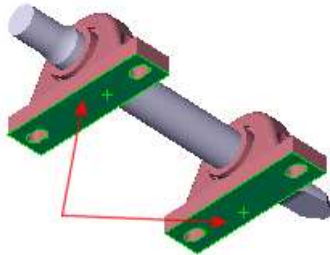


Рисунок 7.2 – Грані моделі, що закріплюються

В *SolidWorks* можна визначити епюри «по умовчанию», які створюються для кожного типу аналізу, який запускається. Щоб задати епюри «по умовчанию» для частотного дослідження:

- Натисніть «Simulation» / «Параметры».
- На вкладці «Настройки по умовчанию» виберіть «Результаты исследования по частотам/потере устойчивости».
- У вікні «Создать эпюру для» виберіть «Для первых 5-и форм колебаний».
- У полі «Тип результатов» виберіть «Перемещение» і «URES: Результирующее перемещение» для генерації епюр переміщення.
- Натисніть «OK».

Щоб створити сітку моделі і запустити дослідження:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші пункт «Сетка» і виберіть «Создать сетку» або натисніть кнопку зі стрілкою вниз у полі «Запуск» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Создать сетку».
- У *PropertyManager* застосуйте стандартні настройки сітки з п. 2.1 (Налаштування параметрів формування кінцево-елементної сітки).
- У розділі «Параметры» виберіть «Запуск (решение) анализа».
- Натисніть «ОК» щоб прийняти значення.

Щоб вивести список резонансних частот:

- Натисніть стрілку вниз в розділі «Результаты» (*Simulation CommandManager*) і виберіть «Список резонансных 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 «Сохранить».
 - б) Введіть «Frequency1» в полі «Имя файла».
 - в) Натисніть кнопку «Сохранить».
 - Натисніть кнопку «Закрыть».

Щоб вивести список масової участі:

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші на папку «Результаты» та виберіть «Показать массовое участие».
- У діалоговому вікні «Массовое участие» відобразяться номери форм коливань (мод), частоти (в рад/сек або Гц) і масова участь в X, Y і Z напрямках.
- Натисніть кнопку «Закрыть».

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 «Сетка» і виберіть «Создать сетку».
- З'явиться попереджувальне повідомлення про те, що створення сітки знову видалить існуючі результати.
- Натисніть ОК.
 - З'явиться вікно *PropertyManager* «Сетка».

- У розділі «Параметры сетки» встановить для параметра «Единицы измерения» значення дюйми і встановить для параметра «Глобальный размер» значення 6 мм.
- У розділі «Параметры» виберіть «Запуск (решение) анализа».
- Клацніть «ОК».

Щоб вивести список нових резонансних частот:

- Натисніть стрілку вниз в розділі «Результаты» *Simulation CommandManager* і виберіть «Список резонансных 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 «Закрыть».

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 «Крепления» та виберіть «Скрыть все», щоб приховати позначення кріплень.
- Розгорніть папку «Результаты» та натисніть правою кнопкою миші на «Деформация1 (-Расположение результата-Форма моды1-)» і виберіть «Редактировать определение».
- У *PropertyManager* в розділі «Деформированная форма» очистіть параметр «Отобразить цвета».
- Прийміть інші настройки, потім натисніть «ОК».

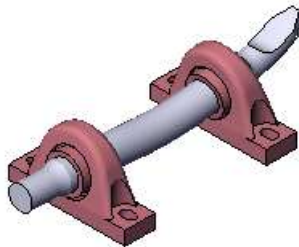


Рисунок 7.3 – Форма коливань вала

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

- У дереві дослідження *Simulation* натисніть правою кнопкою миші «Деформація (-Расположение результата-Форма моды1)» та виберіть «Настройки».
- У вікні *PropertyManager* в розділі «Параметры эпюры деформации»:
 - а) Виберіть «Поместить модель на деформированную форму».
 - б) Виберіть у списку «Полупрозрачный (один цвет)».
 - в) Натисніть на параметр «Редактировать цвет», виберіть яскраво-блакитний колір і натисніть «ОК».
 - г) Перемістіть бігунок «Прозрачности» на 0,75.
- Клацніть «ОК».

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

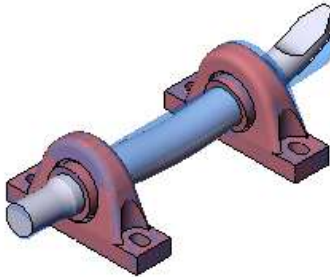


Рисунок 7.4 – Зпівставлення недеформованої моделі та основної моди коливач

Щоб переглянути інші форми (моди) коливач двічі клацніть «Перемещение2 (-Расположение результата -Форма колебания2-)» для відображення епюри (рис. 7.5).

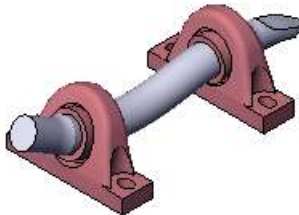


Рисунок 7.5 – Друга мода коливач валу

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.

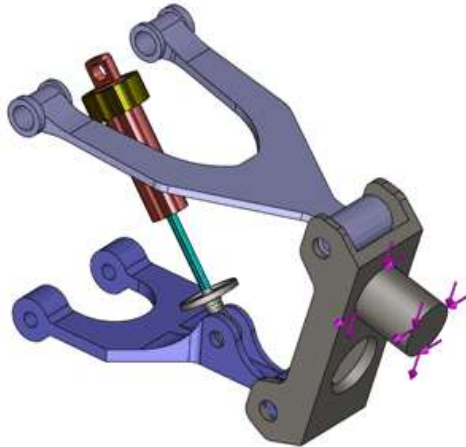


Рисунок 8.1 – Збірка елемента підвіски автомобіля

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 «Литая углеродистая 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 «Выполнить» на панелі інструментів «Моделирование».

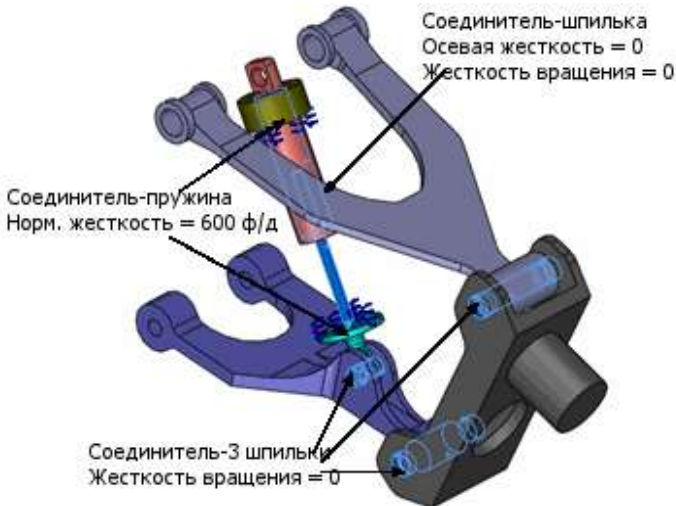


Рисунок 8.2 – З'єднання в моделі зборки підвіски

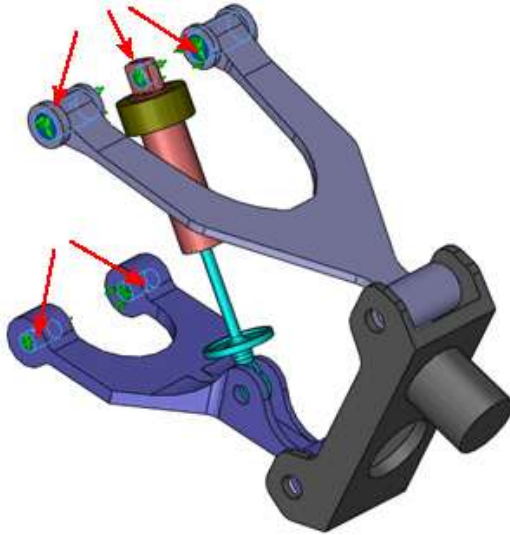


Рисунок 8.3 – Закріплення моделі зборки підвіски

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

- Натисніть правою кнопкою миші «Результаты» та натисніть «Определить эпору усталости».

- У *PropertyManager* в розділі «Корректирующие коэффициенты»:

а) Натисніть «Отнулевая загрузка».

б) У вікні «Коэффициент влияния обработки поверхности» виберіть «Обработанная».

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

в) У полі «Коэффициент нагрузки» виберіть «По оси».

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

г) У полі «Коэффициент размера» 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.

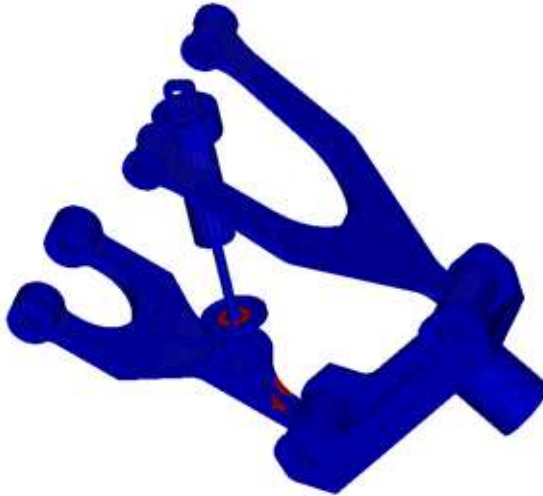


Рисунок 8.4 – Епюра вузлів низької довговічності

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 «Минимальный запас прочности» 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.

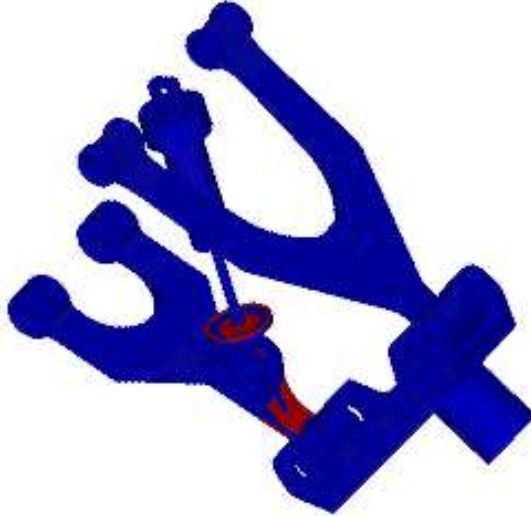


Рисунок 8.5 – Епюра вузлів низької довговічності 2

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 проєктованої моделі.

- Клацніть правою кнопкою миші на вкладці дослідження Готової виберіть «Создать новое исследование моделирования».
- У PropertyManager:
 - а) У полі «Имя» введіть ім'я дослідження, наприклад, «Втома 1».
 - б) У розділі «Тип» натисніть «Усталость».

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 (-Постоянная амплитуда)» і виберіть «Добавить событие».

- В *PropertyManager*:

а) В полі «Циклы» введіть значення 20000.

б) В полі «Тип» навантаження виберіть «Отсчет от нуля (LR = 0)»

в) Клацніть «ОК».

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

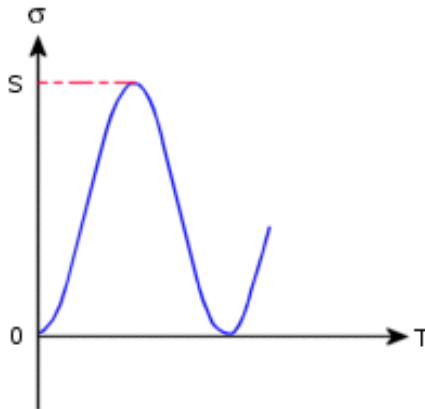


Рисунок 8.6 – Циклограма навантаження

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 «Детали» і оберіть «Применить данные усталости ко всем телам».
- У діалоговому вікні, на вкладці «Кривые усталости SN», у вікні «Источник»:
 - а) Виберіть «Производная от модулей упругости материалов».
 - б) Натисніть «Кривые аустенитной стали по ASME». Графік кривої з'явиться у вікні попереднього перегляду.
- Натисніть «Применить» і потім «Закрыть».

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

- Натисніть «Выполнить» на панелі інструментів «Моделирование», щоб прийняти параметри, задані «по умолчанию» для властивостей дослідження на втому. Щоб переглянути властивості дослідження на втому, натисніть правою кнопкою миші значок дослідження і виберіть «Свойства».
- Натисніть правою кнопкою миші на «Результаты» та виберіть «Определить эпюру усталости».
- У *PropertyManager* виберіть «Эпюра повреждения» 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 «Срок службы» та «Коэффициент нагрузок».

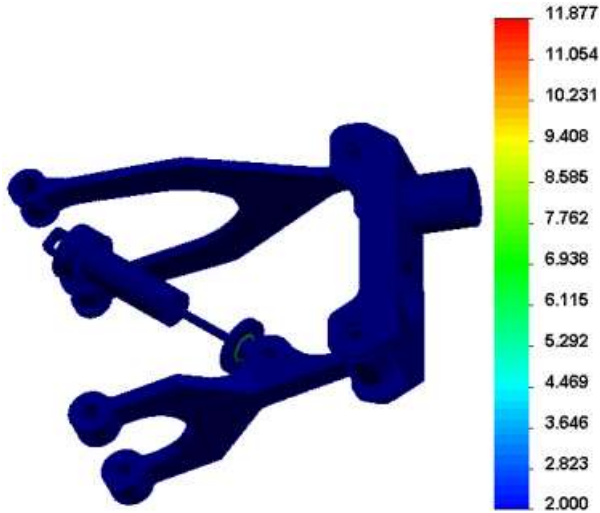


Рисунок 8.7 – Епюра пошкоджень

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

ЛІТЕРАТУРА

1. Дементьев Ю.В. САПР в автомобиле- и тракторостроении / Ю.В. Дементьев, Ю.С. Щетинин; Под общ. ред. В.М. Шарипова. – М.: Изд-во «Академия», 2004. – 224 с.
2. Основные элементы SolidWorks / Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. 2011. – 548 с.
3. Расширенное моделирование деталей / Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. 2010. – 341 с.
4. Дударева Н.Ю. SolidWorks 2009 на примерах / Н.Ю. Дударева, С.А. Загайко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 544 с.
5. Алямовский А.А. Инженерные расчёты в SolidWorks Simulation / А.А. Алямовский. М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
6. Алямовский А.А. COSMOSWorks. Основы расчёта конструкций на прочность в среде SolidWorks / А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 784 с.
7. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А.А. Алямовский. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 448 с.
8. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks Инженерный анализ методом конечных элементов. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
9. Бакаев В.В. Информационное обеспечение, поддержка и сопровождение жизненного цикла изделия / В.В. Бакаев, Е.В. Судов, В.А. Гомозов. – М.: Машиностроение, 2005. – 624 с.
10. Черепашков А.А. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении / А.А. Черепашков, Н.В. Носов. – Волгоград: «Ин-фолио», 2009. – 640 с.

Інформаційні ресурси

1. Електронні навчальні посібники SolidWorks.