

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**Вдосконалення процесу проектування деталі за
допомогою топологічної оптимізації**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМм-21

Семанюк Андрій Петрович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Сичук Віктор Анатолійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 20__ р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

Луцький національний технічний університет

Факультет Транспорту та механічної інженерії
Кафедра Прикладної механіки та мехатроніки
Другий (магістерський) рівень
освітньо-професійної програми «Прикладна механіка»
Спеціальність 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
_____ Р.Г. Редько
“ _____ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Семанюк Андрій Петрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вдосконалення процесу проектування деталі за допомогою топологічної оптимізації, керівник кваліфікаційної роботи магістра Сичук В.А. затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» червня 2025 р., № 391/01-07.
2. Строк подання студентом роботи 1.12.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: Програмне забезпечення SolidWorks Simulation, 3D принтер _____ Creality _____ Ender-3 V2 _____
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ. РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ. РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ. Висновок. Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Загальний	Сичук В.А.		
Конструкторський	Сичук В.А.		
Технологічний	Сичук В.А.		
Дослідний	Сичук В.А.		

7. Дата видачі завдання _____

Керівник _____

(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1.	<i>Загальна частина.</i>		
2.	<i>Конструкторська частина.</i>		
3.	<i>Технологічна частина.</i>		
4.	<i>Дослідна частина.</i>		
5.	<i>Представлення роботи до захисту</i>		
6.	<i>Електронний варіант кваліфікаційної роботи магістра</i>		

Студент _____

(підпис)

Семанюк А.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

Сичук В.А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Семанюк А.П. Вдосконалення процесу проектування деталі за допомогою топологічної оптимізації. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття кваліфікації другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності 131 Прикладна механіка спеціалізації технологія машинобудування. – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2025.

Сутність роботи полягає у ефективному проектуванні деталі з застосуванням методу оптимізації топології. Тобто в роботі представлена конструкція деталі з точки зору людини-інженера, та відповідно оптимізована її версія в спеціалізованому програмному забезпеченні. Нова версія форми деталі залишається повністю функціональною причому маса її знижена на 50%. Для наглядності оптимізована деталь була виготовлена за допомогою адитивних технологій.

Ключові слова: оптимізація топології, 3D принтер, CAE програмне забезпечення.

ANNOTATION

Semanyuk A.P. Improving the part design process using topological optimization. - Manuscript.

Master's Qualification for Qualification of the Second (Master's) Level of Higher Education in Specialty 131 Applied Mechanics of Specialization mechanical engineering technology. - Lutsk National Technical University. - Lutsk, 2025.

The essence of the work is the effective design of the part using the topology optimization method. That is, the work presents the design of the part from the point of view of a human engineer, and its optimized version in specialized software. The new version of the part shape remains fully functional, and its mass is reduced by 50%. For clarity, the optimized part was manufactured using additive technologies.

Keywords: topology optimization, 3D printer, CAE software.

Зміст

Вступ.....	.....
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ.....	.....
1.1 Поняття оптимізації топології деталі.....	.....
1.2 Поняття генеративного проектування деталі.....	.....
1.3 Висновки до розділу.....	.....
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	.....
2.1 Побудова тестової деталі.....	.....
2.2 Перевірка деталі віртуальним випробуванням на працездатність.....	.....
2.3 Застосування методу оптимізації топології конструкції деталі.....	.....
2.4 Висновки до розділу.....	.....
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ .....	.....
3.1 Підготовка керуючої програми виготовлення кронштейну на 3D принтері.	.....
3.2 Підготовка керуючої програми виготовлення кронштейну на фрезерному верстаті з ЧПК.....	.....
3.3 Висновки до розділу.....	.....
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	.....
4.1 Виготовлення оптимізованої деталі за допомогою адитивних технологій....	.....
4.2 Висновки до розділу.....	.....
Висновок.....	.....
Список використаних джерел.....	.....

ВСТУП

Сучасне машинобудування та інженерне проєктування активно розвиваються у напрямку зменшення маси конструкцій при збереженні їхньої міцності та надійності. Особливу роль у цьому процесі відіграють CAD/CAE-системи, які дозволяють не лише проєктувати деталі, а й виконувати інженерний аналіз та оптимізацію конструкцій. Актуальність даної теми зумовлена широким впровадженням методів топологічної оптимізації, що дають змогу суттєво знизити матеріаломісткість виробів без втрати їх експлуатаційних характеристик.

Мета роботи полягає у проєктуванні та оптимізації деталі типу кронштейн, призначеної для кріплення та підймання важкого обладнання, із застосуванням модуля SolidWorks Simulation, а також у виготовленні оптимізованої моделі за допомогою адитивних технологій.

Об'єкт дослідження – конструкція кронштейна, призначеного для сприйняття значних механічних навантажень під час переміщення важкого обладнання.

Предмет дослідження – процес топологічної оптимізації деталі в середовищі SolidWorks Simulation та її вплив на масу і міцнісні характеристики конструкції.

Методи дослідження, що застосовувалися при виконанні роботи, пов'язані з 3D-моделюванням кронштейна, проведенням статичного аналізу напружено-деформованого стану, виконанням топологічної оптимізації з використанням CAE-інструментів SolidWorks Simulation, а також виготовленням фізичної моделі оптимізованої деталі методом 3D-друку.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у практичній реалізації топологічної оптимізації кронштейна, що дозволило зменшити його масу приблизно на 50% при збереженні здатності витримувати задане робоче навантаження.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні оптимізованої конструкції кронштейна, яку можна використовувати в реальних умовах експлуатації, а також у демонстрації ефективності застосування топологічної оптимізації та адитивних технологій у сучасному інженерному проектуванні та навчальному процесі.

Особистий внесок здобувача полягає у постановці мети та задач дослідження, розробці початкової моделі кронштейна, проведенні інженерного аналізу, виконанні топологічної оптимізації, підготовці моделі до 3D-друку та виготовленні фізичного зразка оптимізованої деталі.

Апробація отриманих результатів роботи здійснювалася під час обговорень на науково-практичних семінарах кафедри, де були представлені результати моделювання, оптимізації та виготовлення деталі.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел. Основний зміст викладено на ___ сторінках машинописного тексту, робота містить ___ рисунків та ___ таблиць. Список використаних джерел налічує ___ найменувань.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Поняття оптимізації топології деталі

Проаналізуємо матеріал який добре викладений в матеріалі [1]. Представлений нижче матеріал добре описує та пояснює саму суть оптимізації топології при проектуванні деталей та вузлів (рис. 1.1).

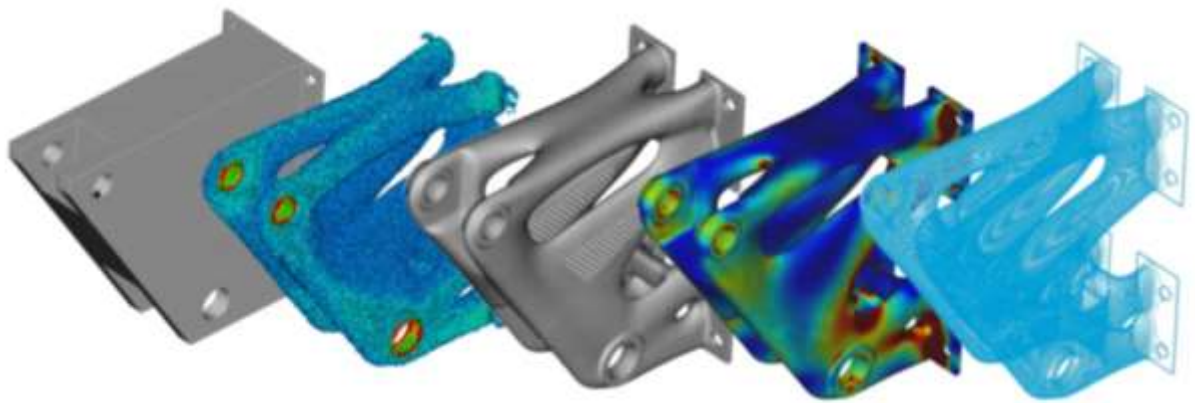


Рисунок 1.1 – Етапи сучасного проектування деталі з застосуванням методів оптимізації топології.

Де хороший дизайн зустрічається з функціональністю? Оскільки автоматизоване проектування (САПР) продовжує розвиватися, а передові технології виробництва, такі як 3D-друк, стають все більш поширеними, що дозволяє створювати складні деталі легше, ніж будь-коли раніше, дизайнери та інженери можуть використовувати програмне забезпечення для оптимізації топології, щоб розширити межі можливостей та знайти нові способи максимізації ефективності проектування.

Розглянемо основи оптимізації топології, її переваги та застосування, а також, які програмні інструменти можна використовувати для початку роботи.

Топологічна оптимізація (ТО) – це метод оптимізації форми, який використовує алгоритмічні моделі для оптимізації розташування матеріалів у визначеному користувачем просторі для заданого набору навантажень, умов

та обмежень. ТО максимізує продуктивність та ефективність конструкції, видаляючи надлишковий матеріал з областей, які не потребують значних навантажень, щоб зменшити вагу або вирішити проблеми проектування, такі як зменшення резонансу або термічного напруження.

Конструкції, створені за допомогою топологічної оптимізації, часто включають вільні форми та складні фігури, які складно або неможливо виготовити традиційними методами виробництва. Однак, конструкції ТО ідеально підходять для процесів адитивного виробництва, які мають більш поблажливі правила проектування та можуть легко відтворювати складні форми без додаткових витрат.

Оптимізація топології в порівнянні з генеративним проектуванням

Генеративне проектування та оптимізація топології стали модними словами в галузі проектування САПР, але поширеною помилковою думкою є те, що вони є синонімами.

Оптимізація топології не є новою. Вона існує щонайменше 20 років і широко доступна в поширених програмних інструментах САПР. Початок її процесу вимагає від інженера-людини створення моделі САПР, застосування навантажень та обмежень з урахуванням параметрів проекту. Потім програмне забезпечення видаляє зайвий матеріал і генерує єдину оптимізовану концепцію сітчастої моделі, готову для оцінки інженером. Іншими словами, оптимізація топології вимагає від самого початку роботи моделі, розробленої людиною, що обмежує процес, його результати та масштаб.

У певному сенсі, оптимізація топології служить основою для генеративного проектування. Генеративне проектування виводить процес на новий рівень і усуває необхідність у початковій моделі, розробленій людиною, беручи на себе роль проектувальника на основі попередньо визначеного набору обмежень.

Як працює оптимізація топології

Оптимізація топології зазвичай відбувається ближче до кінця процесу проектування, коли бажана деталь повинна мати меншу вагу або використовувати менше матеріалів. Потім проектувальник працює над визначенням певних попередньо встановлених параметрів, таких як прикладені навантаження, тип матеріалу, обмеження та компоновання.

Структурна оптимізація топології спочатку визначає мінімально допустимий простір проектування, необхідний для оптимізації форми виробу. Потім, віртуально, програмне забезпечення для оптимізації топології застосовує тиск до конструкції з різних кутів, перевіряє її структурну цілісність та виявляє непотрібні матеріали (рис. 1.2).

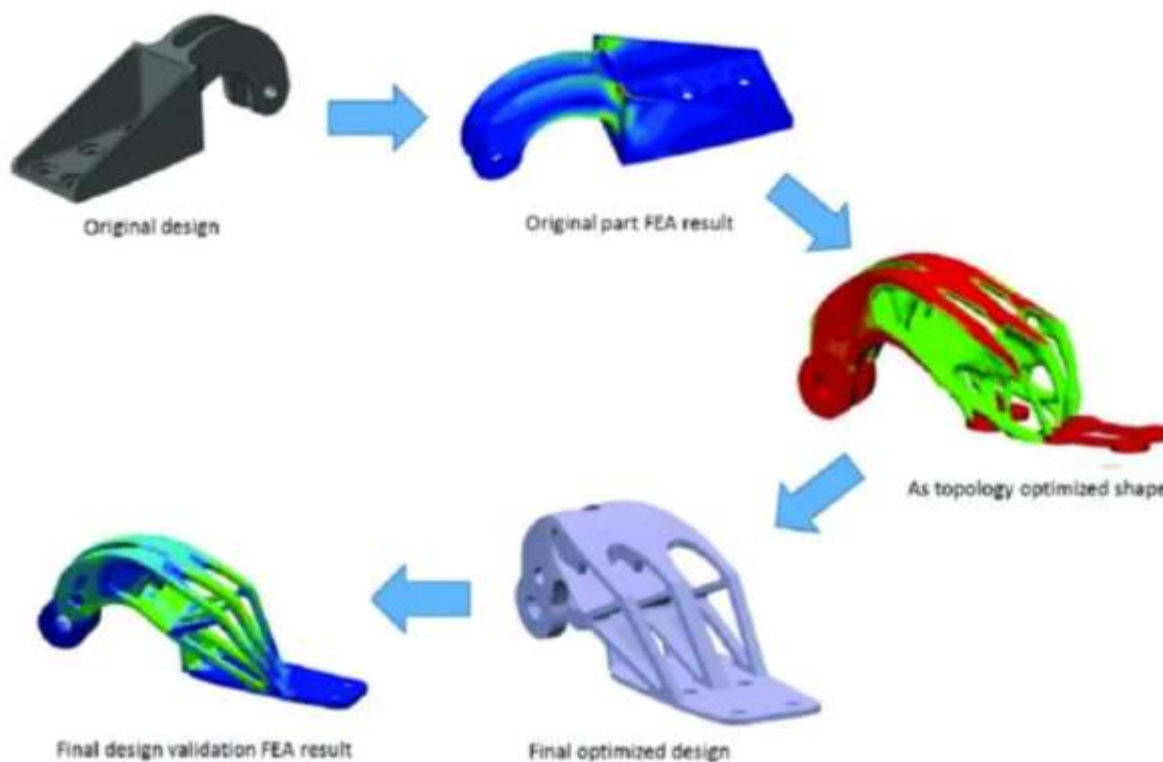


Рисунок 1.2 – Робочий процес оптимізації топології.

Найпоширенішим та найпрактичнішим методом оптимізації топології є метод скінченних елементів (МСЕ). Спочатку МСЕ враховує геометричний дизайн для мінімально дозволеного простору, а також інші фактори, і розбиває дизайн на частини. Потім він перевіряє кожен скінченний елемент на

жорсткість, відповідність та надлишковий матеріал. Нарешті, МСЕ з'єднає частини разом, щоб завершити повний дизайн.

Перевірка дизайну включає визначення порогового значення для поля щільності елементів між значеннями від 0 до 1. Значення 0 позбавляє матеріалу в визначеній області конструкції, тоді як значення 1 встановлює визначену область як суцільний матеріал. Потім проектувальник може позбавити модель усього непотрібного матеріалу та завершити частину проекту, присвячену оптимізації топології.

До появи адитивного виробництва проектувальники відкидали багато складних форм, створених за допомогою оптимізації топології, оскільки їх було неможливо виготовити, а її потенціал залишався нереалізованим.

Переваги топологічної оптимізації

Інженерам потрібна вагома причина, щоб відмовитися від класичних методів проектування та виробництва. Якщо інноваційний дизайн не коштує менше, не працює краще або не економить час, виробник не бачитиме особливих причин для змін. Розглянемо переваги топологічної оптимізації.

Економія коштів

Багато складних геометрій, що виникають в результаті оптимізації топології, зробили б виробничі витрати нездійсненними за традиційних виробничих практик. Але в поєднанні з 3D-друком ця складність не супроводжується додатковими витратами.

Виробництво 3D-друкованих деталей все ще може бути дорожчим, ніж їхні неоптимізовані, традиційно виготовлені аналоги, але ці легкі конструкції можуть запропонувати виробникам більшу економію коштів іншими способами:

- Краща паливна ефективність, оскільки для руху деталей потрібно менше енергії завдяки меншому тертю (літаки, автомобілі)
- Менші витрати на упаковку та транспортування

- Менше важкої техніки, необхідної для складальних ліній

Вирішення проблем проектування

Оптимізація топології може вирішити поширені проблеми в процесі проектування, такі як:

- Резонанс виникає, коли сила, дозволена формою в системі, переважає систему. Це може призвести до механічної деформації, зменшення механічної структури та викидів забруднюючих речовин.

- Термічне напруження – це будь-яка зміна температури матеріалу – через тертя або інші фактори – що призводить до термічної втоми та деформації в системі.

Іноді оптимізація проекту включає конкуруючі цільові функції, такі як оптимізація розміру та ваги. Наприклад, аерокосмічні деталі виграють від своєї легкої ваги, але також повинні витримувати величезні крутні моменти, напруження та тепло. Алгоритм може збалансувати проект, враховуючи кожен з цих цільових функцій та знаходячи оптимальний варіант.

Економія часу

Хоча робота з програмним забезпеченням для оптимізації топології все ще вимагає значних знань, інструменти топологічної оптимізації можуть швидко створювати високопродуктивні проекти, які інженер не міг би створити вручну. Це означає менше часу та енергії, витрачених на проектування в САПР, та надійні кінцеві результати з меншою кількістю ітерацій проекту.

Коли справа доходить до виготовлення деталей, адитивні виробничі процеси також можуть швидко виготовляти готові деталі, оскільки вони не потребують оснащення, яке може зайняти тижні або місяці для традиційних методів виробництва.

Зменшення впливу на навколишнє середовище

Створення менших за розміром і легких виробів зменшує загальний вуглецевий слід виробника, оскільки для цього потрібно менше будівельних матеріалів. Порівняно з традиційними інструментами субтрактивного виробництва, деталі, виготовлені за допомогою адитивних процесів, також зазвичай потребують менше сировини та утворюють менше відходів.

Часто найбільша економія досягається протягом усього терміну служби деталей. Наприклад, легкі деталі для літаків зменшують свій вплив на навколишнє середовище, потребуючи менше палива.

Усунення помилок

По суті, оптимізація топології полягає у виключенні помилок. Проводячи стрес-тестування, процес враховує широкий спектр змінних та уникає ризикованих припущень, які можуть призвести до дефектних продуктів.

Застосування оптимізації топології

Високопродуктивні, ефективні та легкі конструкції, можливі завдяки методам оптимізації топології, застосовуються в широкому спектрі галузей.

Аерокосмічна галузь

Через важливість зниження ваги, оптимізація топології є природним поєднанням аерокосмічної інженерії та аеронавтики. Топологічна оптимізація (ТО) використовується, наприклад, для покращення компоновки конструкцій планера, таких як ребра жорсткості (рис. 1.3) або кронштейни для літаків.

Окрім забезпечення полегшення конструкції, оптимізація топології може допомогти розкрити потенціал передових виробничих технологій, таких як адитивне виробництво або композитні матеріали, які стають дедалі популярнішими в цьому секторі.

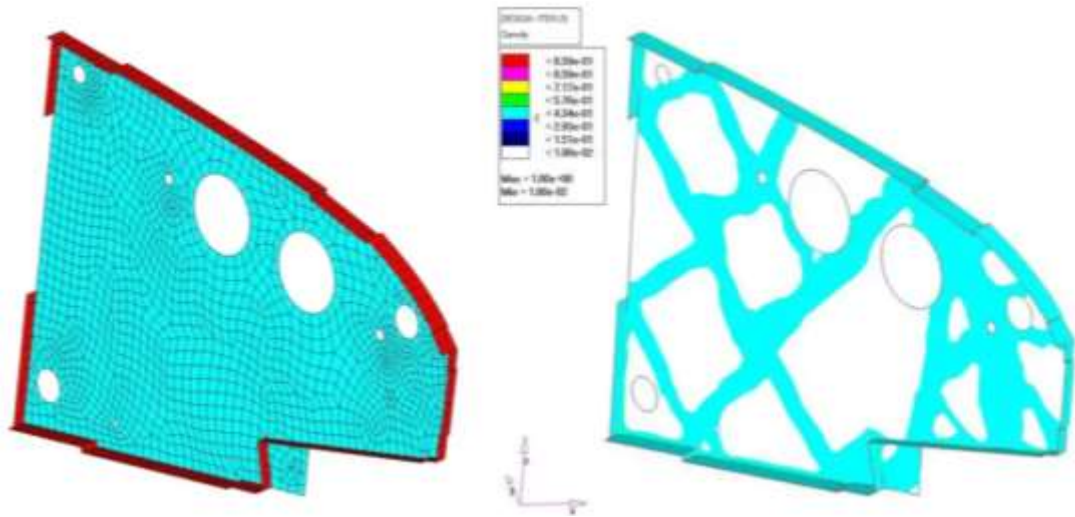


Рисунок 1.3 – Оптимізація топології компонента крайнього ребра Airbus A380.

Автомобільна промисловість

В автомобільній промисловості оптимізація топології поєднує бажаність легких деталей (рис. 1.4) для економії палива та потужності зі стабільністю та міцністю кузова, здатного витримувати крутний момент та удар.

Окрім економії маси, оптимізація топології також може покращити безпеку пасажирів, визначаючи спосіб руйнування конструкції під час аварії.



Рисунок 1.4 – Легка рама мотоцикла з оптимізованою топологією, виготовлена за допомогою 3D-друку металом.

Медицина

Аддитивне виробництво ідеально підходить для створення медичних імплантів, оскільки воно дозволяє медичним працівникам створювати форми та поверхні вільної форми, а також пористі структури. Завдяки оптимізації топології, конструкції можуть мати ґратчасті структури, які є легшими, забезпечують покращену остеоінтеграцію та служать довше, ніж інші імпланти.

Інструменти топологічного виробництва також можуть оптимізувати конструкції біорозкладних каркасів (рис. 1.5) для тканинної інженерії, пористих імплантів та легкої ортопедії. Нанотехнологічні застосування, такі як маніпуляції клітинами, хірургія, мікрорідини та оптичні системи, також використовують оптимізацію топології.



Рисунок 1.5 – Черепний імплантат, виготовлений за допомогою металоаддитивного виробництва.

Програмне забезпечення для оптимізації топології

Розробники дедалі більше усвідомлюють універсальність, швидкість та надійні можливості використання оптимізації топології. Компанії-розробники програмного забезпечення реагують, надаючи необхідні інструменти, або в рамках своїх існуючих пропозицій, або через нові програмні рішення.

Нижче наведено деякі приклади програмного забезпечення для оптимізації топології:

- nTopology пропонує «унікальний набір інструментів генеративного проектування та можливостей автоматизації», що пришвидшує процес проектування, поєднуючи розширену геометрію, симуляції та експериментальні дані. Його геометричний механізм застосовується в різних сферах застосування, від аерокосмічної та автомобільної промисловості до проектування футбольних шоломів та пристроїв для пацієнтів у медичній галузі.

- SOLIDWORKS Simulation Solutions пропонує оптимізацію топології серед своїх інструментів структурного аналізу та пропонує кілька методів повернення цих оптимізованих проектів у середовище САПР.

- Хмарна САПР-платформа Autodesk Fusion 360 пропонує оптимізацію форми та розширені функції для підтримки перевірки проекту для виробництва як за допомогою традиційних, так і цифрових інструментів виготовлення, таких як 3D-друк.

- Програмне забезпечення для генеративного проектування Creo 7.0 включає розширення Generative Topology Optimization, яке дозволяє користувачам враховувати обмеження та вимоги до продукту та «швидко досліджувати інноваційні варіанти проектування, щоб скоротити час і витрати на розробку».

- Altair OptiStruct інтегрує структурну оптимізацію та аналіз. Спеціалізуючись на легкій вазі та структурній ефективності, він має власний метод оптимізації топології для проектування ґратчастих структур. Його інтегроване мультифізичне середовище, що включає теплообмін, вібрації та акустику, динаміку ротора, а також жорсткість і стійкість, допомагає в проектуванні в таких галузях, як побутова електроніка, аеромодельовання та медичні технології.

- Tosca Structure працює в рамках програмного забезпечення FEA та може похвалитися реалістичними симуляційними моделями з можливістю швидкої та надійної зміни геометрії. Його можливості морфування дозволяють оптимізувати форму на існуючому комплексі скінченних

елементів, минаючи проміжні кроки, і це особливо важливо для проектувальників механічних конструкцій.

1.2 Поняття генеративного проектування деталі

Для того щоб добре розібратися в питанні про генеративне моделювання варто ознайомитися і проаналізувати матеріал викладений в джерелі [2].

Генеративне проектування – це ітеративний процес проектування з використанням спеціального програмного забезпечення. За допомогою програмного забезпечення можна генерувати низку проектів, які відповідають конкретним вимогам до деталі, яку необхідно виготовити. У програмному забезпеченні необхідно ввести параметри, обмеження, цільові результати, вимоги, матеріали та методи виробництва, такі як 3D-друк.

Щоб створити кілька проектів, програмне забезпечення досліджує всі можливі рішення та перестановки. В результаті можна створювати інноваційні структури, які ідеально оптимізовані відповідно до ваших вимог.

Топологічна оптимізація оптимізує набір проектів для задоволення таких вимог, як міцність, вага, охолодження або потік. Генеративне проектування – це радше дослідження кількох варіантів та можливостей. Використовуючи генеративне проектування, можна ефективно оцінити безліч результатів проектування.

Застосування генеративного проектування для 3D-друку

Коли інженери та дизайнери працюють над проектом клієнта, вони повинні враховувати кілька вимог. За допомогою процесу генеративного проектування не потрібно починати з нуля. Необхідно надати програмному забезпеченню, необхідну інформацію, встановити цілі та вказати параметри. Немає потреби в геометрії на початку.

Програмне забезпечення для генеративного проектування надасть сотні варіантів проектування. Але воно також зможе глибоко проаналізувати проектування та визначити, який з них є найефективнішим. Можна

використовувати цей метод для дослідження варіантів проектування, щоб отримати найкращу деталь.

Програмне забезпечення, що дозволяє використовувати варіанти генеративного проектування, використовує хмарні обчислення та машинне навчання для дослідження нових рішень. Програмне забезпечення тестує та навчається на всіх ітераціях, що працює, а що ні. Генеративне проектування доступне як частина деяких програмних засобів CAD на ринку. Одним із прикладів є функція Topology Study у SOLIDWORKS Simulation. Використовуючи Topology Study, можна починати з максимального простору проектування, і програмне забезпечення враховує всі прикладені навантаження, кріплення та виробничі обмеження. Потім програмне забезпечення шукає нове розташування та розподіл матеріалів у межах дозволеної геометрії.

Існує також TruForm SW, інтегроване програмне рішення для моделювання SOLIDWORKS. З TruForm SW можна отримувати потужний метод для зменшення маси та витрат на матеріали, виявлення та вирішення проблем проектування, а також оптимізації проектів для адитивного виробництва.

Часто, але не завжди, останнім кроком є виготовлення за допомогою 3D-принтера. Залежно від складності, матеріалу та властивостей, багато деталей (рис. 1.6), створених за допомогою генеративного проектування, можна виготовити лише за допомогою 3D-друку.

Переваги генеративного проектування

Ключові переваги використання генеративного проектування можна підсумувати трьома пунктами:

- Створення унікальних альтернатив проектування: За допомогою програмного забезпечення для генеративного проектування ви можете створювати геометрії, які виходять за рамки того, що люди можуть собі уявити, розширюючи можливості проектування людськими силами.

- Досягнення меншої ваги деталі або вузла: Інженери можуть використовувати генеративне проектування для створення легких деталей з найменшою кількістю матеріалу, дотримуючись при цьому інженерних обмежень.
- Об'єднання деталей: Підвузли можна об'єднати в одну деталь за допомогою генеративного проектування. Об'єднання деталей спрощує складання та обслуговування, а також знижує виробничі витрати.

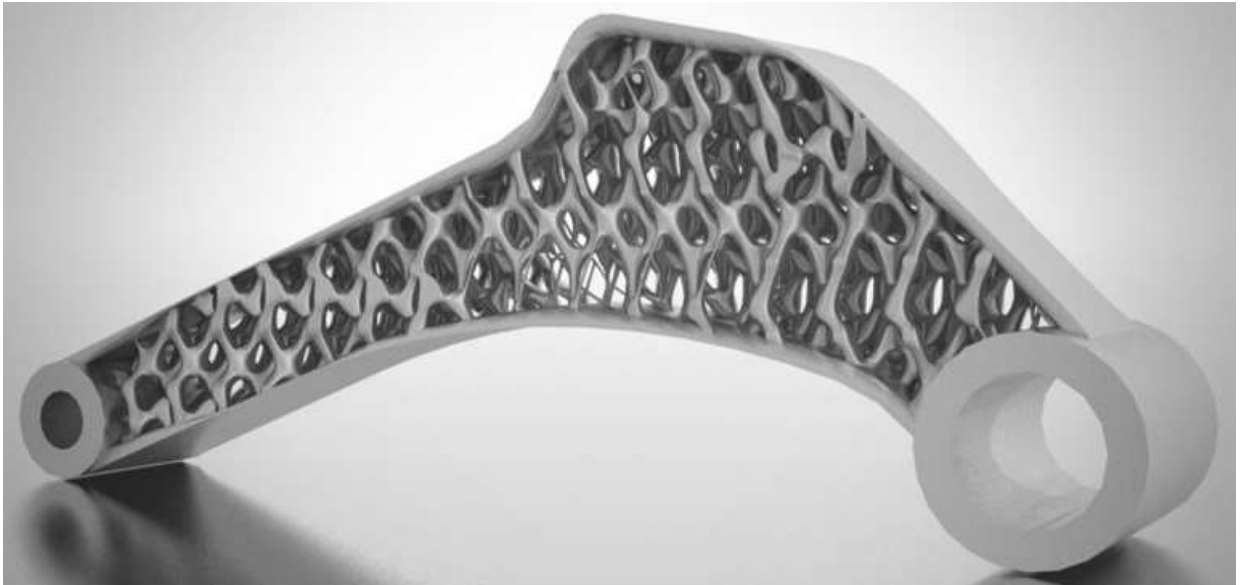


Рисунок 1.6 – Черепний імплантат, виготовлений за допомогою металоаддитивного виробництва.

Приклади генеративного дизайну та 3D-друку

Генеративний дизайн має широкий спектр застосування, особливо у високотехнологічних та складних проектах. Нижче наведено кілька прикладів того, як генеративний дизайн та адитивне виробництво можуть вам допомогти.

Оновлений мікроавтобус Volkswagen

Команда інженерів з Інноваційного та інженерного центру Volkswagen у Каліфорнії (ІЕСС) переосмислила та модернізувала класичний мікроавтобус VW 1962 року випуску, оснастивши його передовими технологіями, такими як електричний двигун та генеративне гальмування, які, як очікується, відіграватимуть значну роль у майбутньому автомобільної промисловості.

Команда зосередилася на збільшенні міцності та одночасному зменшенні ваги. Пошук можливостей для зниження ваги є одним з найважливіших компонентів створення електромобілів, оскільки чим легший автомобіль, тим менше енергії потрібно для його пересування по дорозі. Зменшення споживання енергії означає більший запас ходу на одному заряді, що є одним з найважливіших факторів для споживачів при виборі електромобіля. Завдяки генеративному дизайну команда змогла:

- Створити нові колеса (рис. 1.7) на 18% легші за стандартний комплект
- Переосмислити кермо, зовнішні бічні дзеркала та опорну конструкцію для сидіння
- Скоротити загальний час розробки до виробництва, скоротивши 1,5-річний цикл до кількох місяців



Рисунок 1.7 – Колесо автомобіля спроектоване генеративним моделюванням.

Оптимізовані імпланти NuVasive

Генеративне проектування може бути використане в медичній галузі для створення імплантів, що імітують пористу природу людської кістки. Титанові імпланти (рис. 1.8) створюються NuVasive, медичною компанією зі

Сполучених Штатів, використовуючи їхнє запатентоване програмне забезпечення для оптимізації дизайну та 3D-друк металу. Тільки адитивне виробництво дозволяє створювати ґратчасті, асиметричні, легкі конструкції, що можливо завдяки цьому програмному забезпеченню.



Рисунок 1.8 – Оптимізований титановий імплант NuVasive.

Modulus – це титановий імплантат, розроблений для зрощення кістки з відповідною пористістю. Порівняно з іншими матеріалами для імплантів, компанія стверджує про краще приростання та вrostання. Збільшена площа поверхні та здатність пористої поверхні до всмоктування покращують взаємодію крові з імплантатом. Modulus був створений, щоб спробувати якомога точніше відтворити модуль кістки.

Компанія досягла цього, розробивши алгоритми, які створюють власну структуру, що оптимізує роботу імплантату. Це критично важлива робота, яка може покращити існуючі методи та процедури. Водночас ці структури та алгоритми можуть бути запатентовані та захищені.

Легкий велосипедний рокер від Robot Bike

Американська компанія Robot Bike Co звернулася до GRM Consulting з проханням використати їхнє програмне забезпечення для оптимізації

топології SOLIDWORKS, TruForm SW. Вони обрали TruForm SW, щоб гарантувати, що їхні нові компоненти будуть максимально легкими та економічно ефективними, перш ніж створювати свій гірський велосипед R130.

Першим компонентом, який покращила Robot Bike Co, був рокер (рис. 1.9), встановлений на рамі, який забезпечує кращу підвіску. Robot Bike Co змогла зменшити масу рокера на 27%. Вони також змогли підвищити жорсткість на кручення та зменшити навантаження більш ніж на 50% за допомогою програмного забезпечення TruForm SW.



Рисунок 1.9 – Рокер встановлений на рамі велосипеда Robot Bike.

Генеративний дизайн сприяє сталому розвитку

Використання генеративного дизайну усуває ментальні бар'єри для людської творчості. Він генерує форми та геометрію. Це також фантастичний спосіб придумати нові дизайнерські ідеї. Цей метод також сприяє використанню меншої кількості матеріалів та енергії.

Завдяки можливості виробництва легких деталей, такі галузі промисловості, як автомобільна та аерокосмічна, можуть зробити транспортні засоби та літаки більш паливно-ефективними, а отже, більш сталими.

Оптимізуючи дизайн та зменшуючи кількість матеріалів, необхідних для виготовлення деталі. Консолідація не забувається в генеративному дизайні. Отримання міцної деталі, безсумнівно, буде перевагою, оскільки це заощадить загальні витрати на обслуговування та виробництво. Завдяки гнучкості дизайну, яку пропонують сучасні технології виробництва, цілі вузли можна замінити однією деталлю.

1.3 Висновки до розділу

Проаналізувавши інформацію в даному першому розділі, що стосується генеративного проектування та оптимізації топології деталі дійшли висновку що такий вид проектування є дуже продуктивний та ефективний з точки зору швидкості та коректності інженерного проекту. Тому варто зробити експеримент щодо такого проектування при створенні конкретної деталі. Відповідно перевірити на практиці такий вид проектування.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Побудова тестової деталі

В якості тестової деталі спроектуємо деталь типу кронштейн. Дана деталь може бути використана для переміщення важкого обладнання. Тобто використання її наступне:

- Кронштейн кріпиться на важке промислове обладнання
- В отвір вставляється гак
- Кран підіймає за даний кронштейн обладнання та відбувається переміщення.

Нижче приведемо послідовність побудови кронштейну так як би він проектувався людиною-інженером. Для моделювання можна застосувати будь яке CAD програмне забезпечення. В нашому випадку можна застосувати ПЗ SolidWorks.

Для початку необхідно спроектувати прямокутну основу розмірами (200мм x 130мм x 10мм) такими як показано на рисунку 2.1.

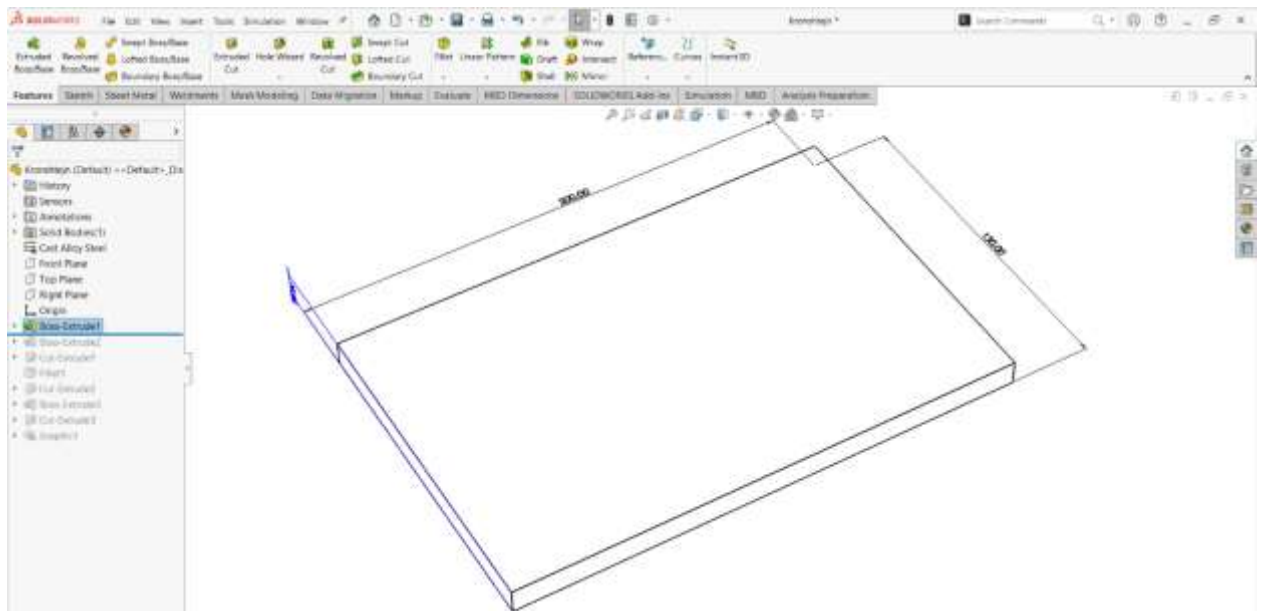


Рисунок 2.1 – Моделювання прямокутної основи.

Далі необхідно побудувати стінку/ребро товщиною 10мм в якому буде отвір для гаку. Результат моделювання представлено на рисунку 2.2.

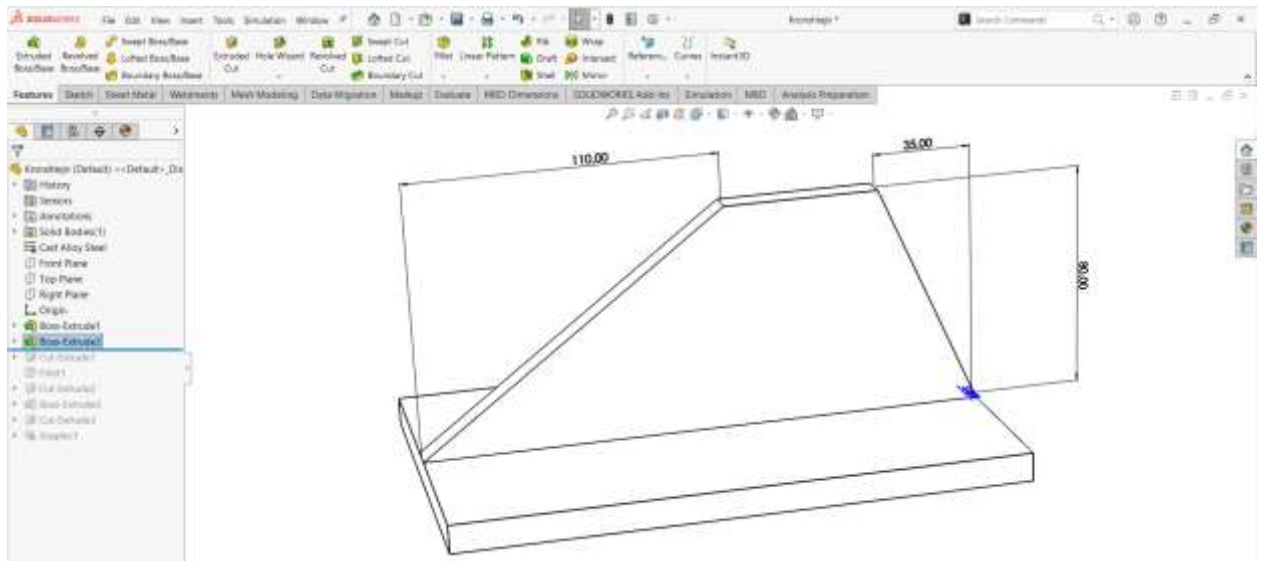


Рисунок 2.2 – Моделювання стінки/ребра товщиною 10мм.

Наступний етап у моделюванні – побудова наскрізного отвору діаметром 40 мм у ребрі (рис. 2.3).

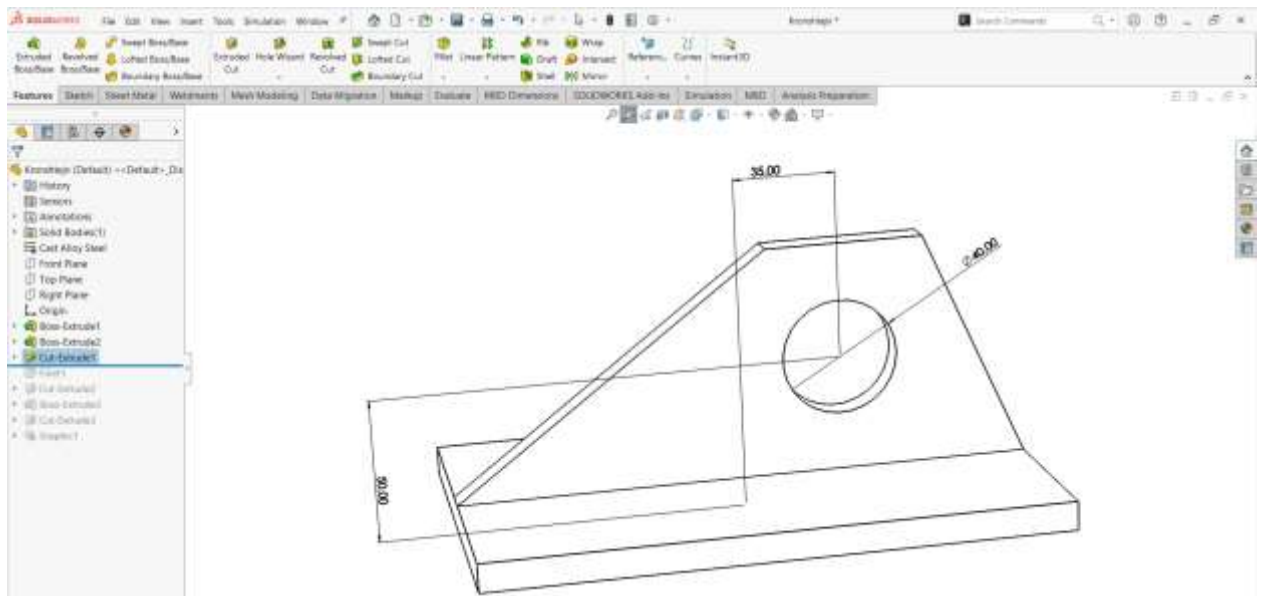


Рисунок 2.3 – Моделювання наскрізного отвору діаметром 40мм.

Потім необхідно побудувати скруглення ребра так щоб не було гострих кромки. Результат проведеної роботи наведено на рисунку 2.4.

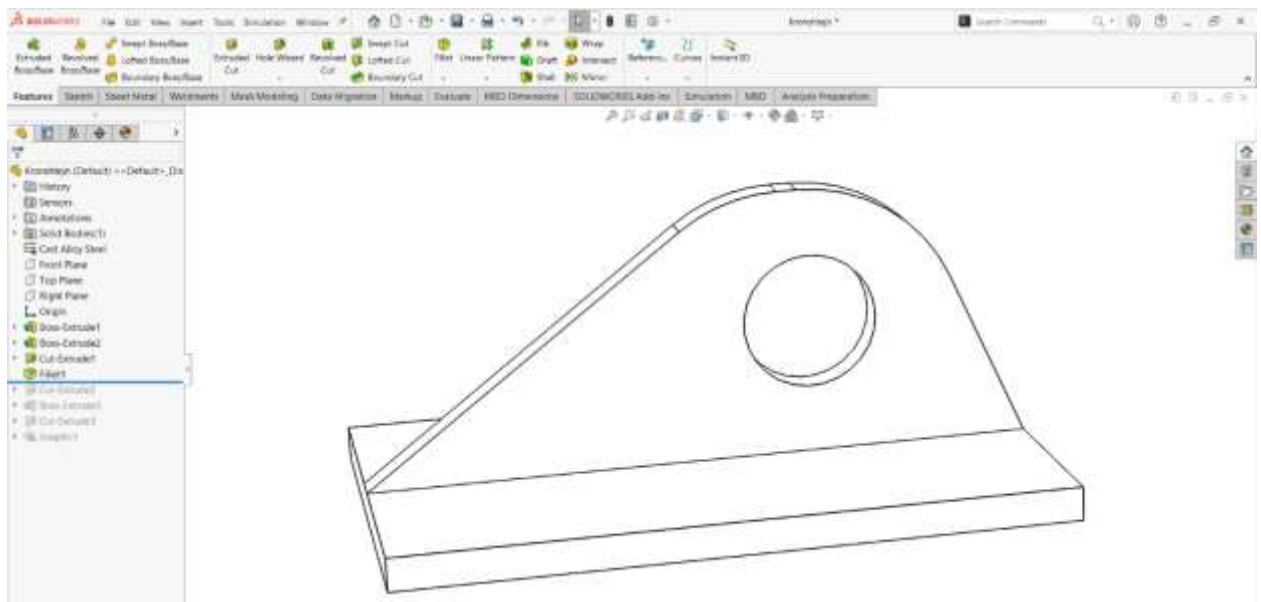


Рисунок 2.4 – Скруглення гострих кромek ребра.

Оскільки даний кронштейн буде прикручуватися за допомогою болтів до важкого обладнання, тому необхідно по кутках вирізати наскрізні отвори, це показано на рисунку 2.5.

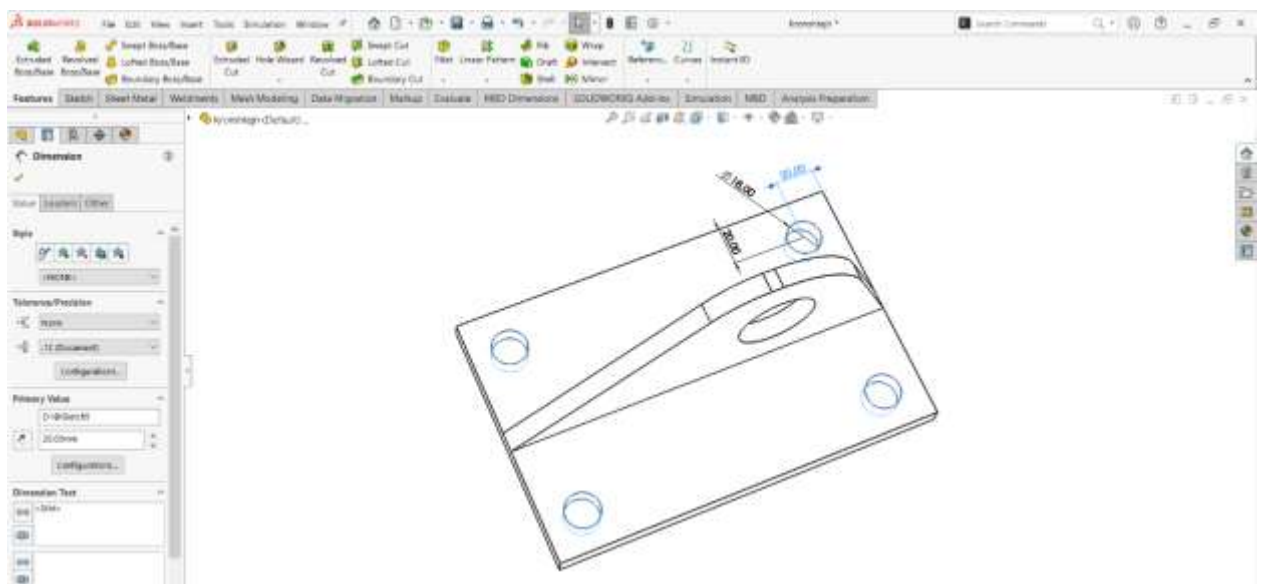


Рисунок 2.5 – Побудова отворів під болти.

Оскільки необхідно щоб шляпки болтів були в рівень з плоскою основою, тому необхідно вирізати заглиблення під них в місцях наскрізних отворів. Результат побудови можна побачити на рисунку 2.6.

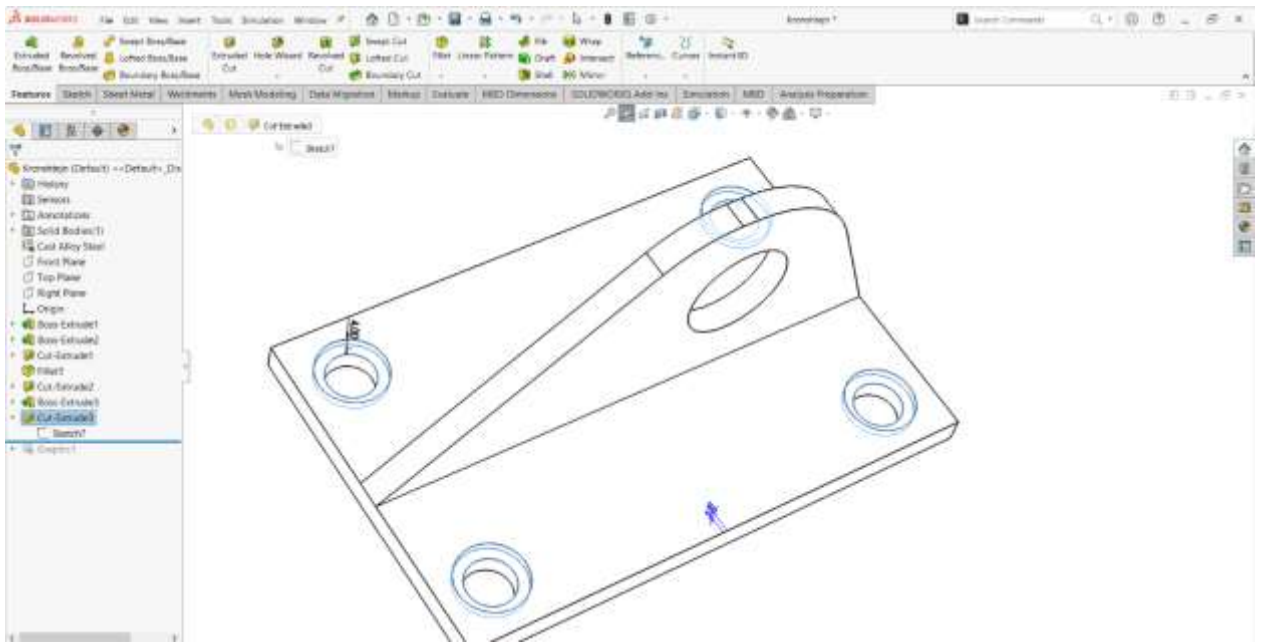


Рисунок 2.6 – Побудова заглиблень під шляпки болтів.

В результаті побудов отримаємо 3D модель деталі типу кронштейн (рис. 2.7) такої конструкції яку б зробила людина-інженер.

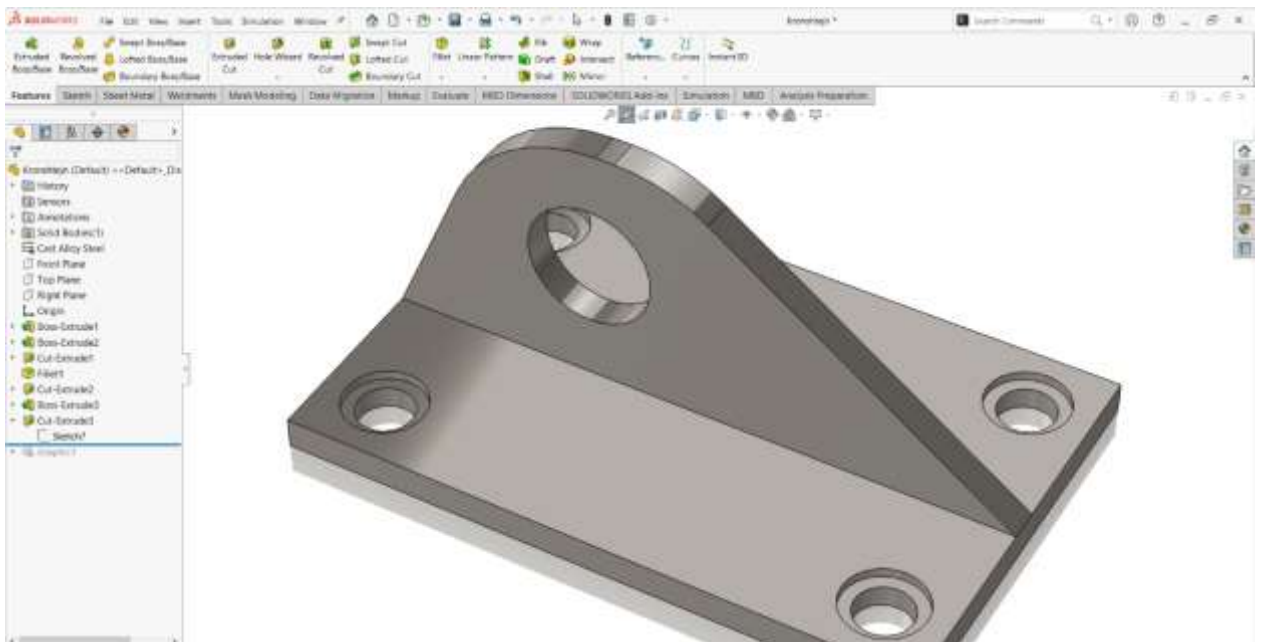


Рисунок 2.7 – Конструкція кронштейну з точки зору людини-інженера.

Варто відмітити, що за вухо даної деталі передбачається підіймати масу що не перевищує 1000 кг. Також матеріал конструкції – чавун.

2.2 Перевірка деталі віртуальним випробуванням на працездатність

Застосуємо програмне забезпечення SolidWorks Simulation для симуляції підйому важкого обладнання за допомогою гаку.

Отже перш за все необхідно вибрати ділянки на деталі які будуть закріплені нерухомо. В нашому випадку потрібно вибрати циліндричні поверхні отворів та плоску поверхню заглиблення під шляпки болтів (тобто по суті імітується закріплення болтами кронштейну до важкого обладнання). Вибір вище згаданих поверхонь на деталі представлено на рисунку 2.8.

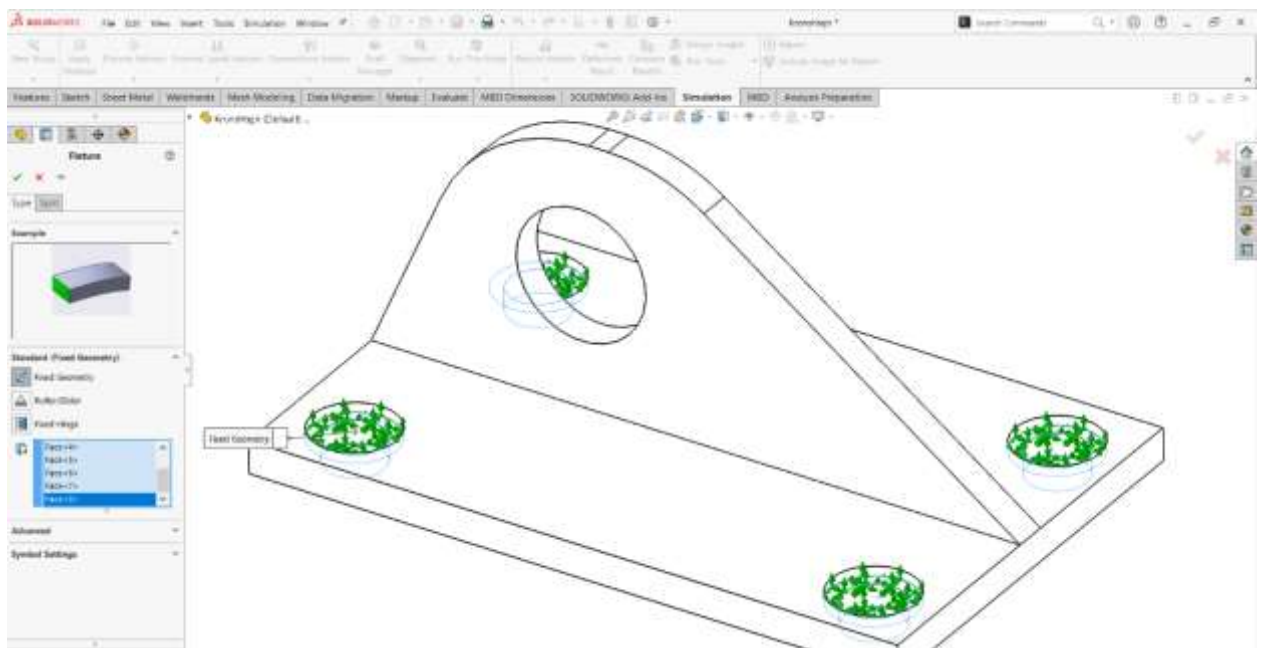


Рисунок 2.8 – Фіксація деталі до уявного важкого обладнання.

Тепер необхідно вибрати ділянку в отворі де буде контакт гаку з внутрішньою циліндричною поверхнею отвору на ребрі. Також до цієї ділянки необхідно прикласти навантаження в 1000 кг, або ж як необхідно програмі – 10000 Н. Вибір ділянки прикладання сили та встановлення цієї сили представлено на рисунку 2.9.

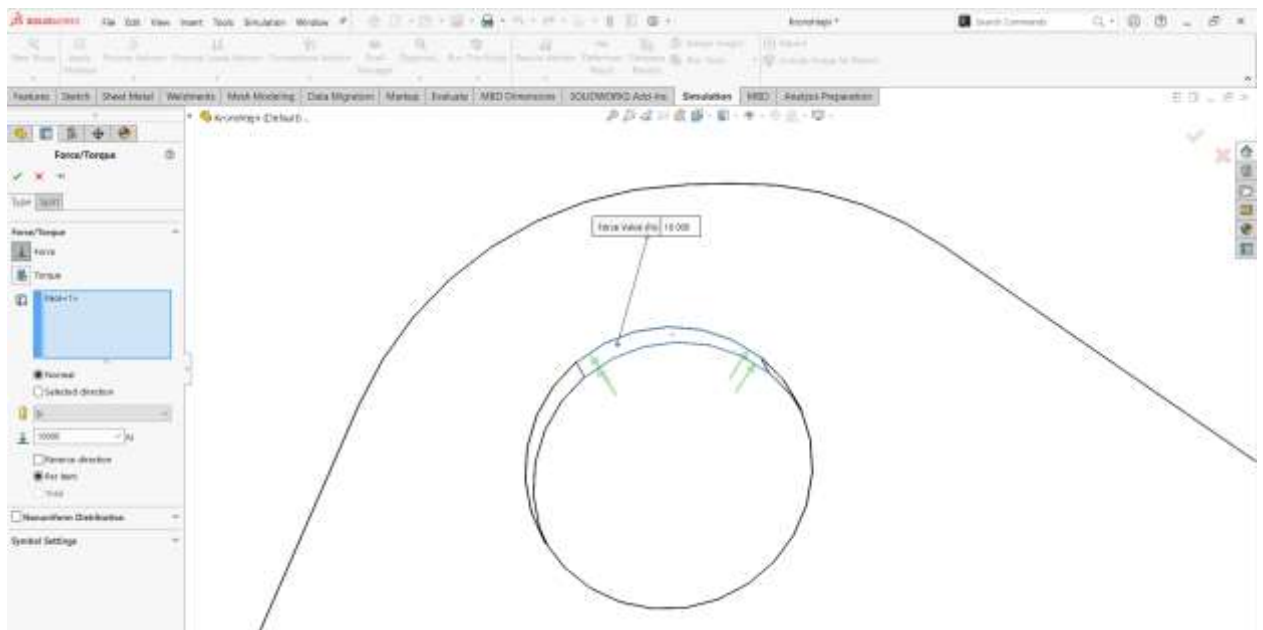


Рисунок 2.9 – Прикладання навантаження на ділянку отвору (симуляція гаку).

Для здійснення розрахунків методом скінченних елементів, попередньо необхідно створити сітчасту структуру самої деталі. Відповідно чим сітка має менші трикутники тим розрахунки будуть точнішими проте можуть тривати довго, тому необхідно обрати баланс кількості трикутників і часу на розрахунок. На рисунку 2.10 представлено сітчасту структуру деталі.

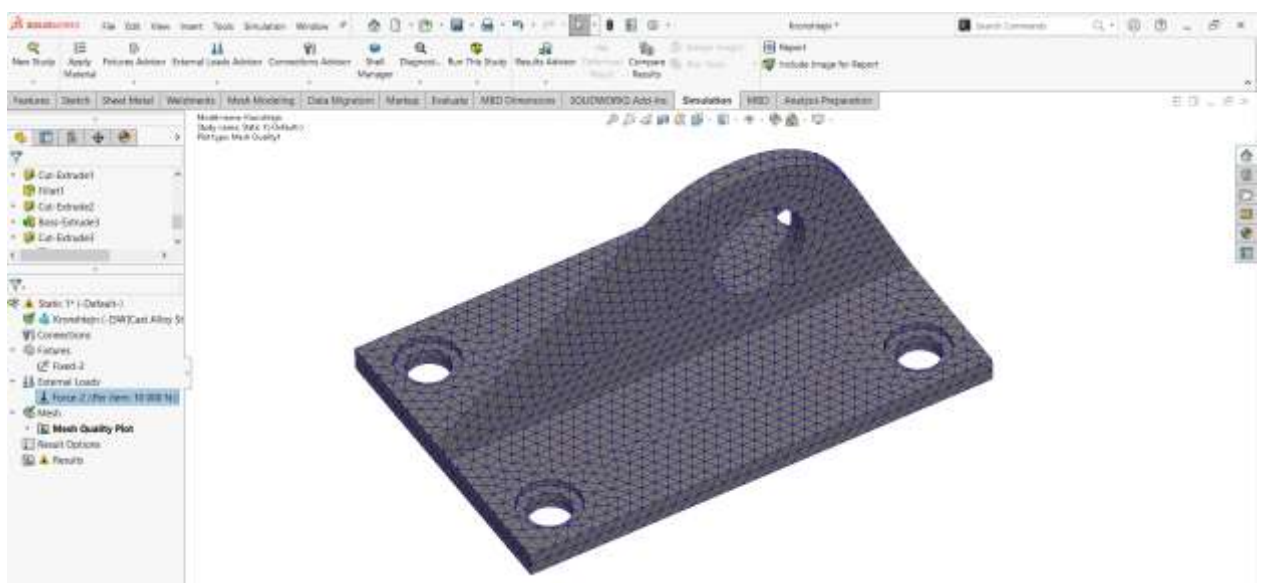


Рисунок 2.10 – Представлення деталі у вигляді сітчастої структури.

Можна запускати процес розрахунку. Як результат можна отримати модель деталі з кольоровим градієнтом за яким можна побачити ділянки на які будуть діяти напруження. Червоним кольором забарвлено максимальні напруження (рис. 2.11) (в отворі де гак буде підіймати обладнання, також ділянки кріплення болтами до обладнання, але лише ті які знаходяться ближче до великого отвору діаметром 40мм).

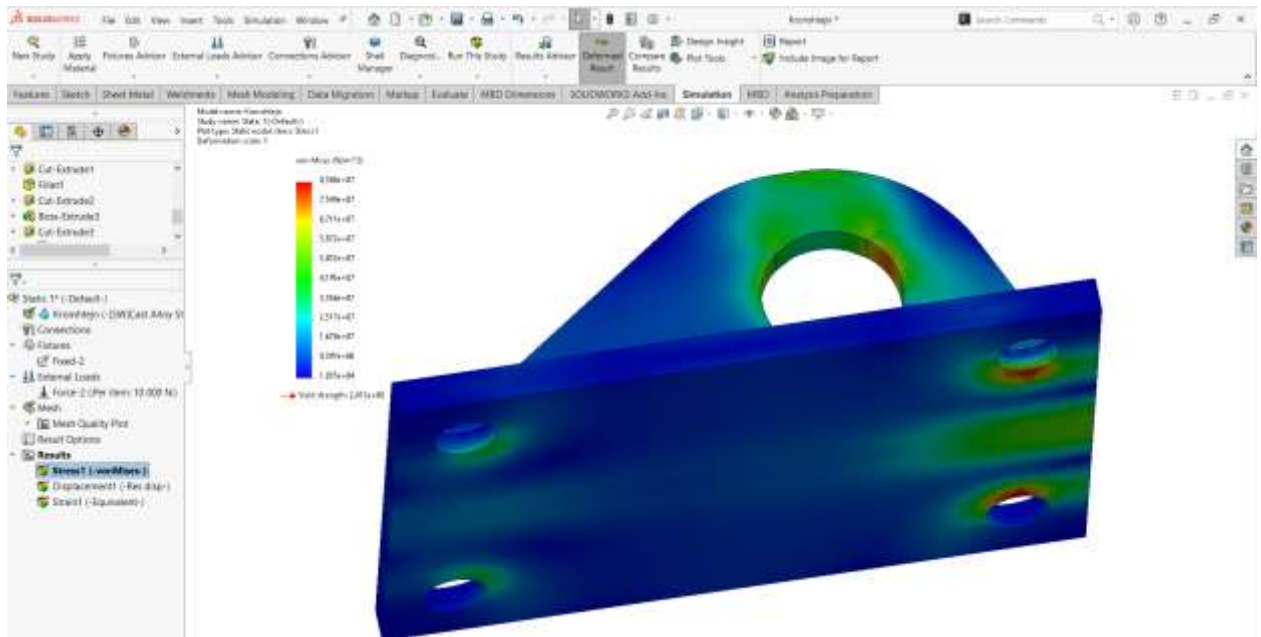


Рисунок 2.11 – Градієнт напружень, що діють на деталь.

Проте нас більше цікавить коефіцієнт запасу міцності даної конструкції деталі, тобто при навантаженні в 10000 Н чи вона витримає таке навантаження. В результаті маємо коефіцієнт 2,9, тобто деталь майже в 3 рази міцніша ніж необхідно (рис. 2.12). Тому на рисунку деталь повністю забарвлена синім кольором, що свідчить про її працездатність. А от коли б коефіцієнт запасу міцності був менше 1, то ми б спостерігали червоні ділянки які свідчать про місця з яких почнеться невідворотне руйнування і деталь буде непрацездатною.

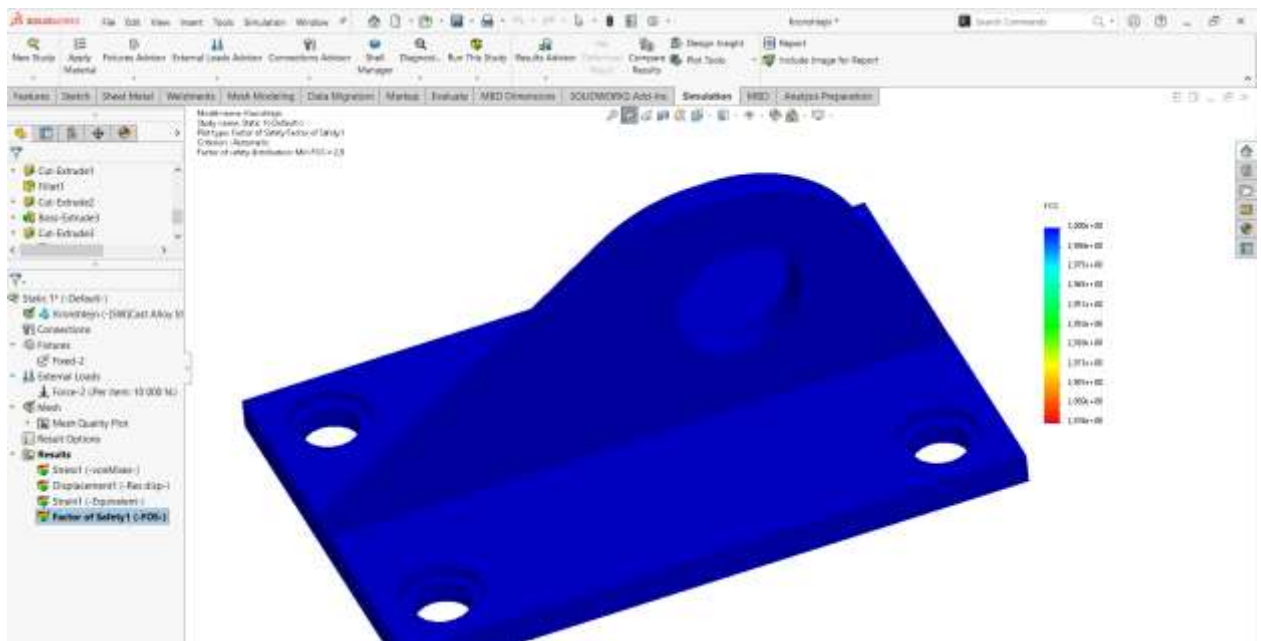


Рисунок 2.12 – Аналіз запасу міцності конструкції деталі при певному навантаженні.

З даного дослідження можна зробити висновок, що деталь надлишково міцна, тому її варто послабити.

2.3 Застосування методу оптимізації топології конструкції деталі

Для здійснення оптимізації форми деталі необхідно застосувати відповідне ПЗ. В нашому випадку можна продовжувати роботу з SolidWorks Simulation, але обрати дослідження типу Topology Optimization. Процес налагодження дослідження практично такий самий як було представлено раніше, тобто необхідно вибрати ділянки для фіксування, прикладання навантаження, величину навантаження. Причому все повинно збігатися з попереднім дослідженням. Результат роботи щодо налагодження представлено на рисунку 2.13.

Проте далі необхідно вказати конкретні параметри оптимізації. Оберемо режим «Найкраща жорсткість по відношенню до маси деталі», також оберемо режим при якому буде створюватися нова оптимізована форма деталі але на 50% легшою, тобто з меншою кількістю матеріалів (рис. 2.14).

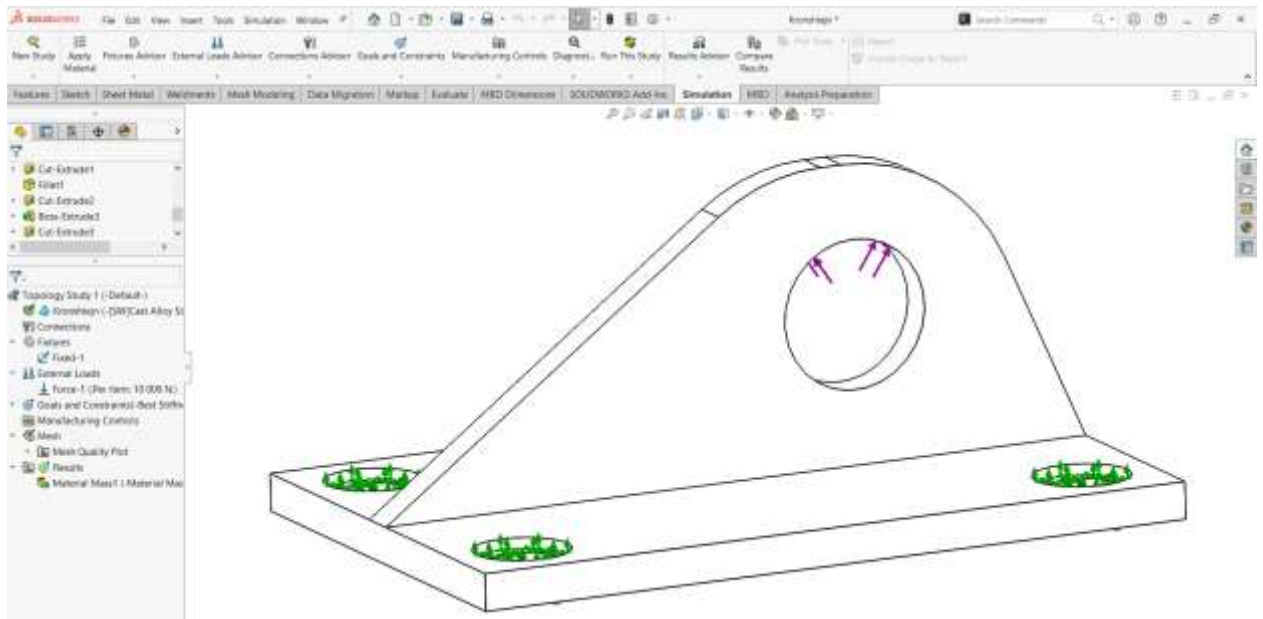


Рисунок 2.13 – Попередні налагодження процесу оптимізації топології деталі.

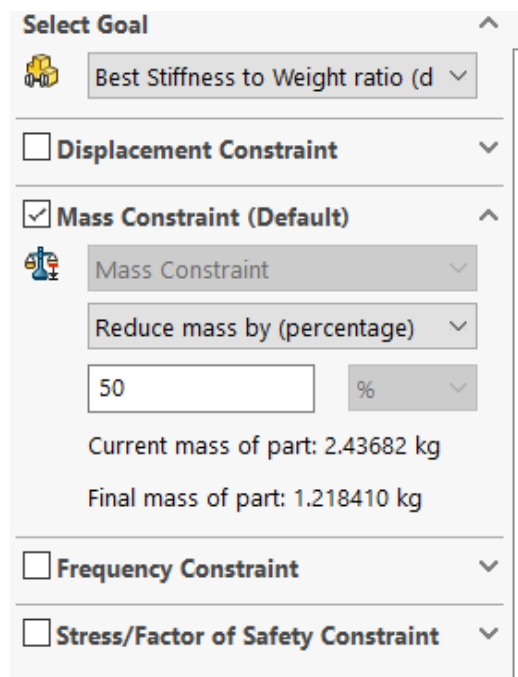


Рисунок 2.14 – Окреслення самої задачі оптимізації топології деталі.

Здійснивши усі необхідні налагодження можна вмикати розрахунки даної задачі. На рисунку 2.15 представлено нову запропоновану форму деталі типу кронштейн, яка буде на 50% легшою проте і буде витримувати навантаження в 10000Н.

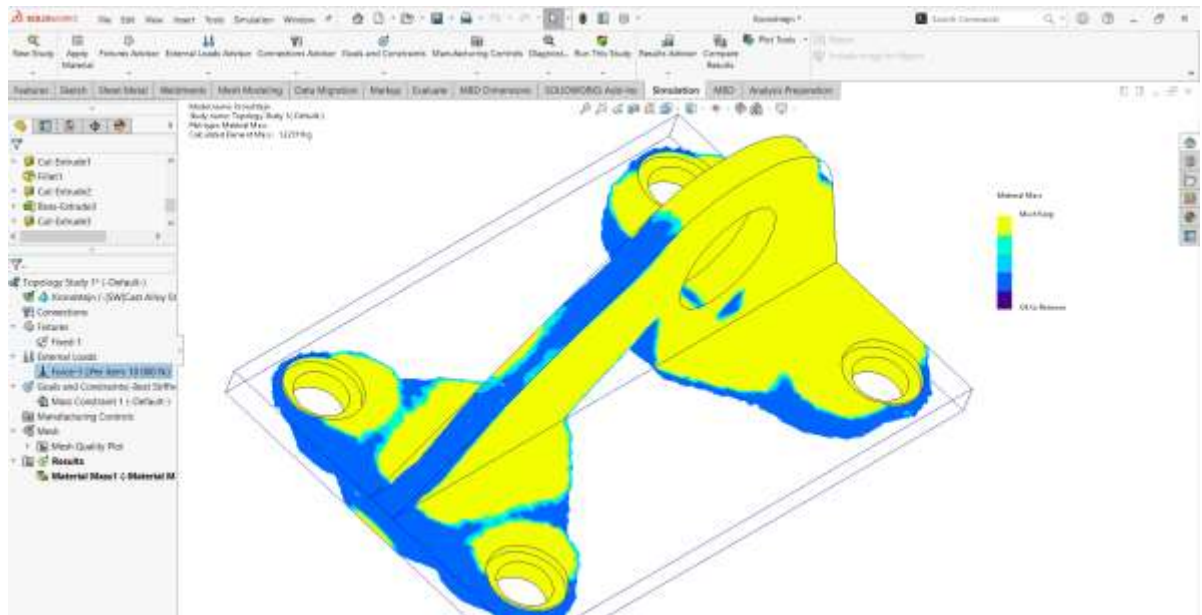


Рисунок 2.15 – Запропонована оптимізована геометрія деталі типу кронштейн.

Для перевірки працездатності даної форми над нею варто ще раз провести дослідження на навантаження, щоб дізнатися про новий коефіцієнт запасу міцності.

Тобто знову прикладаємо навантаження, фіксуємо необхідні поверхні уже на новій оптимізовані деталі (рис. 2.16).

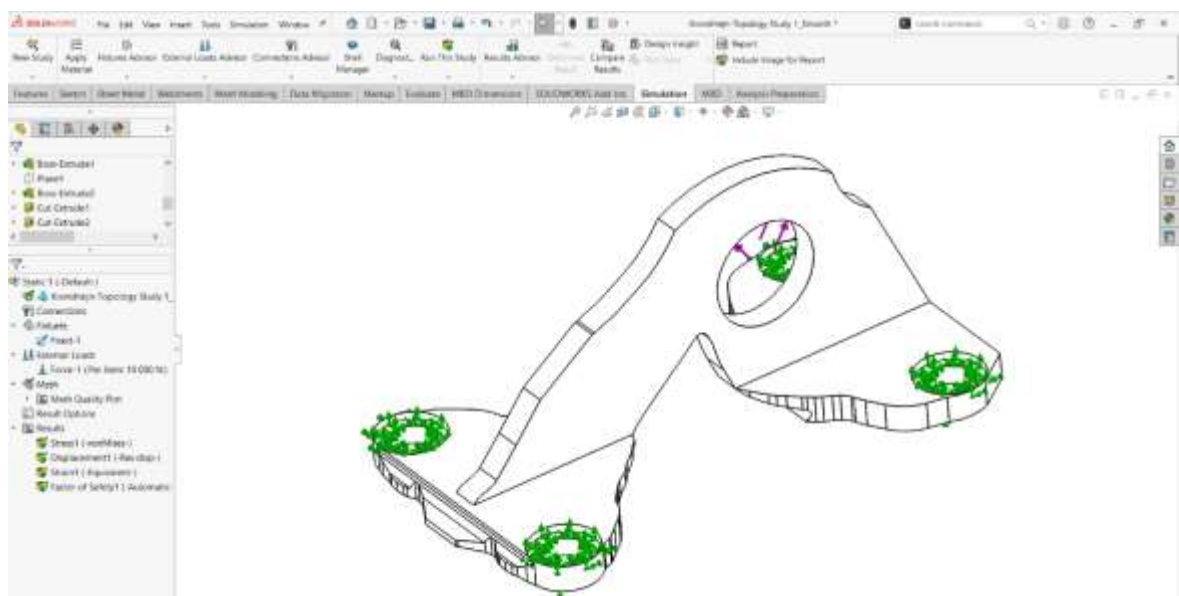


Рисунок 2.16 – Налаштування прикладання навантаження на оптимізовану деталь.

В результаті розрахунків бачимо (рис. 2.17), що деталь знову ж таки синього кольору, тобто без червоних ділянок і коефіцієнт запасу міцності вище одиниці, а саме 1,37.

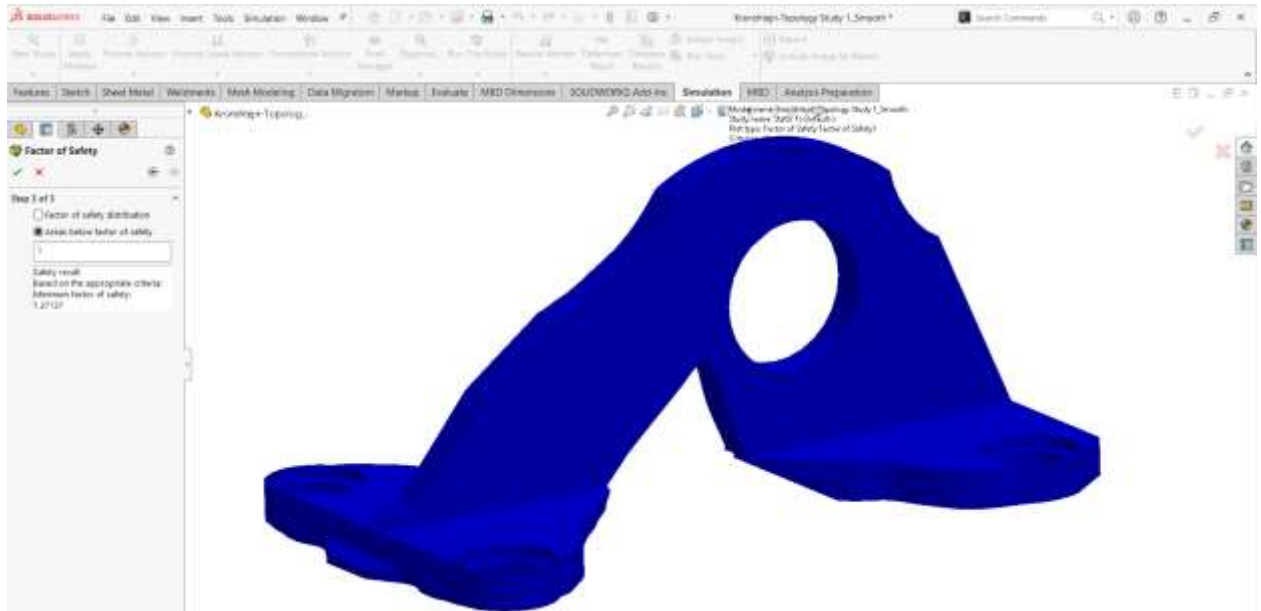


Рисунок 2.17 – Дослідження коефіцієнту запасу міцності деталі з оптимізованою топологією.

Алгоритми оптимізації топології деталі запропонували зменшення маси на 50%, проте деталь залишилася працездатно.

2.4 Висновки до розділу

В даному розділі здійснено дослідження віртуального прикладання навантаження, тобто тест на працездатність в реальних умовах якби вона була виготовлена. Після цього алгоритми оптимізації топології запропонували нову конструкцію деталі, яка буде на 50% легшою проте залишатися працездатною, а саме не руйнуватися при навантаженні в 10000Н.

Нова оптимізована деталь була повторно перевірена на прикладання навантаження, що в результаті підтвердило коректність оптимізації оскільки легша на 50% деталь все ще не руйнувалася, а працювала.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Підготовка керуючої програми виготовлення кронштейну на 3D принтері

Попередньо оптимізовану деталь варто тепер виготовити. Одним із перших варіантів – виготовлення деталі за допомогою адитивних технологій. Відповідно перед початком друку необхідно зробити усі попередні налагодження в спеціальному ПЗ. В нашому випадку будемо використовувати ПЗ Creality Slicer. Отже в дане ПЗ завантажуюмо оптимізовану форму кронштейна (рис. 3.1).

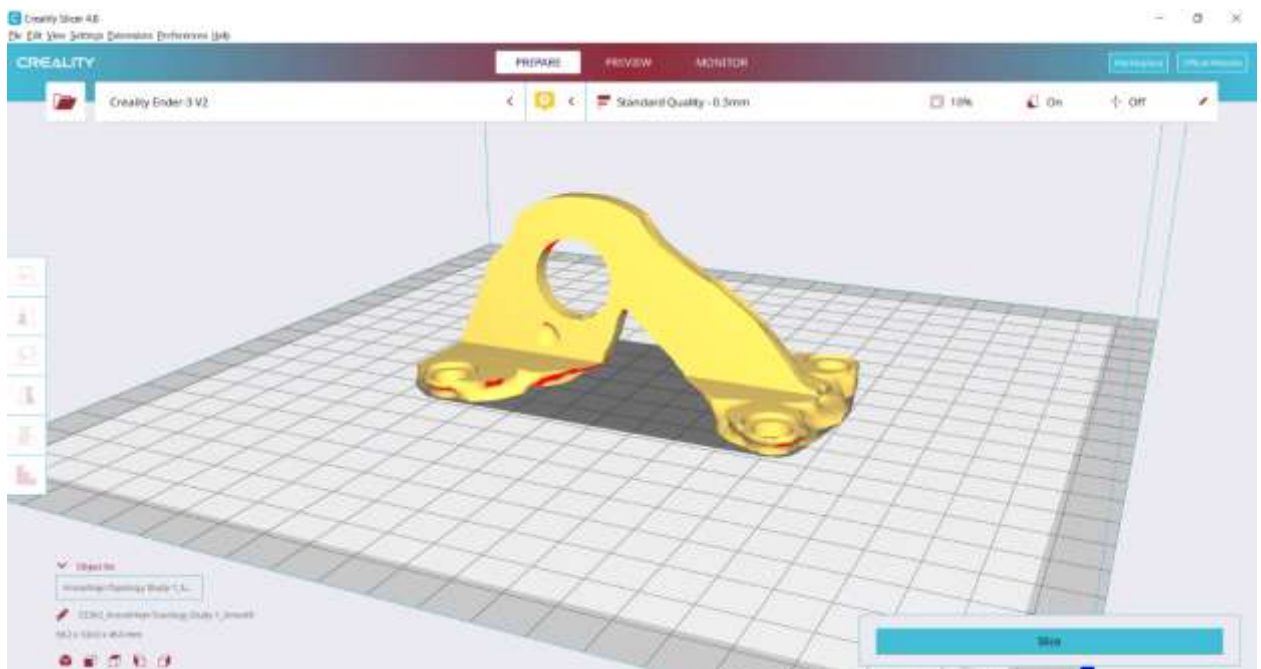


Рисунок 3.1 – Налагодження роботи виготовлення кронштейну для 3D друку.

Базові налагодження наступні:

- Матеріал пластику – PLA;
- Діаметр дроту пластику – 1,75мм;
- Підтримки нависаючих елементів – так;
- Відсоток заповнення об'єму – 10%;

- Товщина шару – 0,3 мм;
- Усі інші налагодження – рекомендовані ПЗ Creality Slicer.

Тепер варто згенерувати керуючу програму згідно якої буде формуватися деталь. Фрагмент наведено нижче

M140 S60

M105

M190 S60

M104 S200

M105

M109 S200

M82 ;absolute extrusion mode

G28 ;Home

G92 E0 ;Reset Extruder

G1 Z2.0 F3000 ;Move Z Axis up

G1 X10.1 Y20 Z0.28 F5000.0 ;Move to start position

G1 X10.1 Y200.0 Z0.28 F1500.0 E15 ;Draw the first line

G1 X10.4 Y200.0 Z0.28 F5000.0 ;Move to side a little

G1 X10.4 Y20 Z0.28 F1500.0 E30 ;Draw the second line

G92 E0 ;Reset Extruder

G1 Z2.0 F3000 ;Move Z Axis up

G92 E0

G92 E0

G1 F1500 E-4

;LAYER_COUNT:150

;LAYER:0

M107

G0 F6000 X74.844 Y59.646 Z0.2

;TYPE:SKIRT

G1 F1500 E0

G1 F1200 X75.181 Y59.239 E0.01758

G1 X75.279 Y59.126 E0.02255

G1 X75.547 Y58.827 E0.0359

G1 X75.687 Y58.677 E0.04273

G1 X75.977 Y58.378 E0.05658

G1 X76.272 Y58.085 E0.07041

G1 X77.038 Y57.393 E0.10475

G1 X77.336 Y57.148 E0.11758

G1 X78.085 Y56.584 E0.14876

G1 X78.604 Y56.248 E0.16933

G1 X78.77 Y56.147 E0.17579

G1 X79.464 Y55.758 E0.20225

G1 X79.762 Y55.605 E0.21339

G1 X80.332 Y55.333 E0.2344

G1 X80.402 Y55.302 E0.23694

G1 X80.965 Y55.071 E0.25718

G1 X82.065 Y54.655 E0.2963

G1 X84.441 Y53.718 E0.38125

G1 X87.078 Y52.588 E0.47667

G1 X87.278 Y52.504 E0.48388

G1 X87.621 Y52.365 E0.49619

G1 X88.126 Y52.175 E0.51414

G1 X88.421 Y52.072 E0.52453

G1 X89.657 Y51.72 E0.56728

G1 X89.931 Y51.659 E0.57661

G1 X90.364 Y51.572 E0.5913

G1 X90.635 Y51.523 E0.60046

G1 X91.181 Y51.438 E0.61884
G1 X92.186 Y51.309 E0.65254
G1 X93.134 Y51.199 E0.68428
G1 X95.616 Y50.841 E0.76769
G1 X98.092 Y50.413 E0.85126
G1 X100.525 Y49.921 E0.93382
G1 X101.938 Y49.586 E0.98212
G1 X103.276 Y49.286 E1.02773
G1 X104.199 Y49.121 E1.05891
G1 X105.469 Y49.022 E1.10128
G1 X106.496 Y49.002 E1.13545
G1 X106.71 Y49 E1.14257
G1 X113.73 Y49 E1.37605
G1 X114.588 Y49.011 E1.40459
G1 X115.524 Y49.064 E1.43577
G1 X116.896 Y49.29 E1.48202
G1 X119.479 Y49.884 E1.57017
G1 X121.975 Y50.385 E1.65485
G1 X124.462 Y50.812 E1.73878
G1 X127.297 Y51.211 E1.834
G1 X128.283 Y51.335 E1.86705
G1 X128.572 Y51.375 E1.87675
G1 X129.136 Y51.461 E1.89573
G1 X129.52 Y51.526 E1.90868
G1 X129.88 Y51.594 E1.92087
G1 X130.635 Y51.765 E1.94662
G1 X130.848 Y51.821 E1.95394
G1 X131.741 Y52.096 E1.98502
G1 X131.946 Y52.169 E1.99226
G1 X132.189 Y52.259 E2.00087

G1 X132.458 Y52.362 E2.01046
G1 X132.705 Y52.46 E2.01929
G1 X133.232 Y52.678 E2.03826
G1 X133.437 Y52.766 E2.04568
G1 X134.148 Y53.06 E2.07127
G1 X134.283 Y53.118 E2.07616
G1 X136.684 Y54.068 E2.16204
G1 X137.638 Y54.415 E2.1958
G1 X138.332 Y54.679 E2.2205
G1 X138.652 Y54.806 E2.23195
G1 X138.988 Y54.949 E2.2441
G1 X139.367 Y55.116 E2.25787
G1 X140.354 Y55.611 E2.2946
G1 X140.587 Y55.743 E2.3035
G1 X140.92 Y55.939 E2.31636
G1 X141.641 Y56.413 E2.34505
G1 X142.35 Y56.92 E2.37404
G1 X143.01 Y57.431 E2.40181
G1 X143.114 Y57.518 E2.40632
G1 X143.708 Y58.052 E2.43288
G1 X144.149 Y58.479 E2.4533
G1 X144.806 Y59.173 E2.48508
G1 X144.924 Y59.309 E2.49107
G1 X145.51 Y60.047 E2.52242
G1 X145.809 Y60.458 E2.53932
G1 X146.328 Y61.239 E2.57051

...

Також перед початком запуску варто переглянути симуляцію самого процесу друку (рис. 3.2) та переконатися, що всі елементи будуть сформовані так як планується.

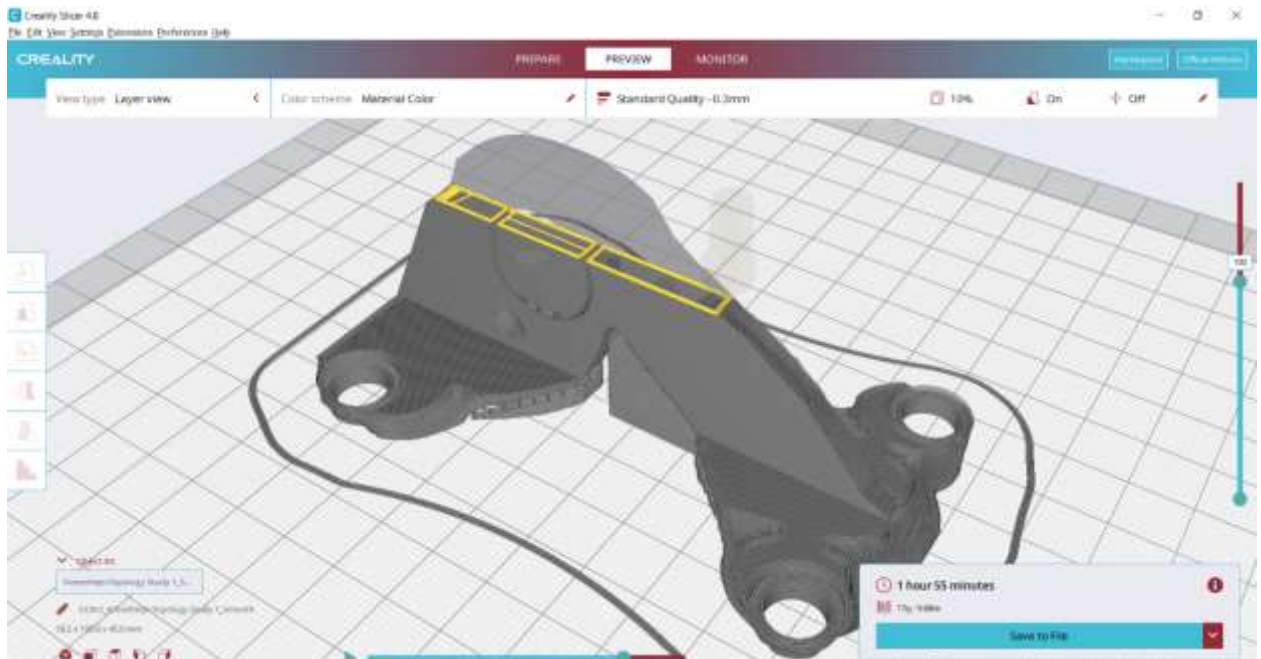


Рисунок 3.2 – Симуляція виготовлення деталі на 3D принтері.

Загалом друк згідно прогнозу програми буде тривати 1 год. 55 хв. витративши 5,68 м дроту.

3.2 Підготовка керуючої програми виготовлення кронштейну на фрезерному верстаті з ЧПК

В якості альтернативного виготовлення оптимізованої деталі варто застосувати фрезерування на фрезерному верстаті з ЧПК. В даному випадку варто застосувати ПЗ FeatureCAM (або будь яке інше САМ програмне забезпечення). Приведемо послідовність налагодження обробки:

- В простір ПЗ FeatureCAM завантажуюємо оптимізовану модель деталі кронштейн (рис. 3.3). Обираємо форму заготовки паралелепіпед з розміром який відповідає габариту деталі. Також обираємо початкову систему координат на поверхні по центру заготовки, тобто це нульове положення фрези.
- Обираємо інструмент (фреза кінцева діаметром 8мм) та необхідні режими різання (подачу, частота обертання фрези, глибина різання і т.д). Налагодження представлено на рисунку 3.4.

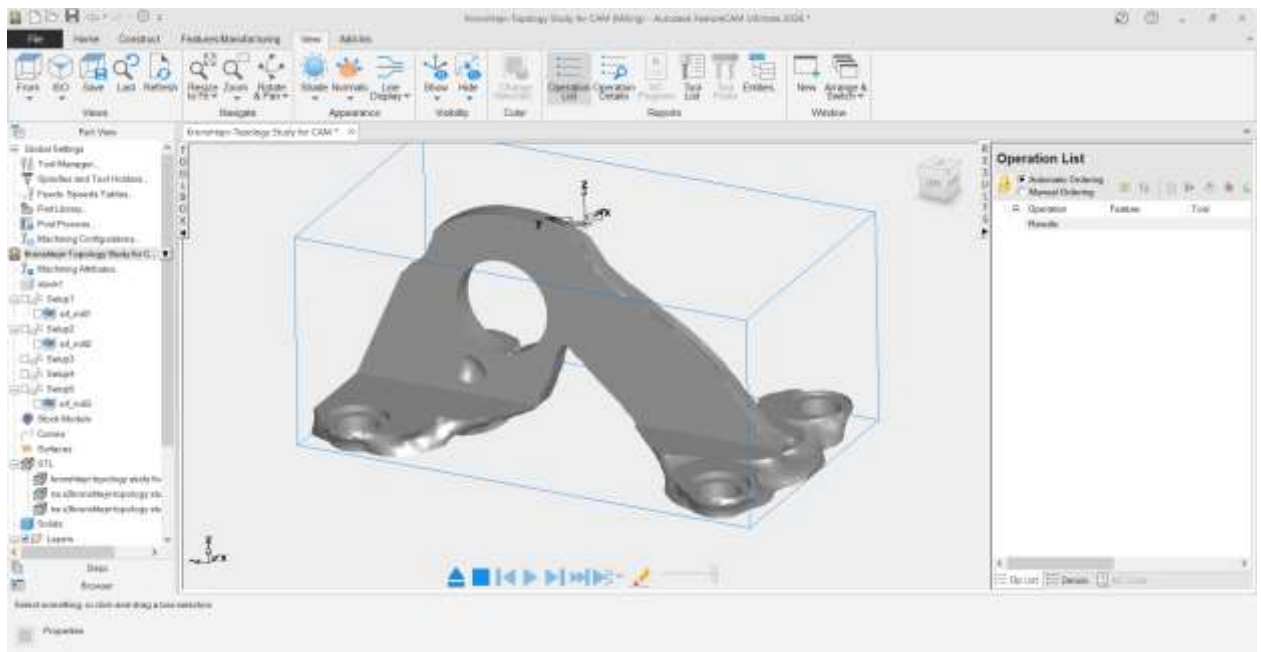


Рисунок 3.3 – Налаштування положення деталі та форми заготовки.

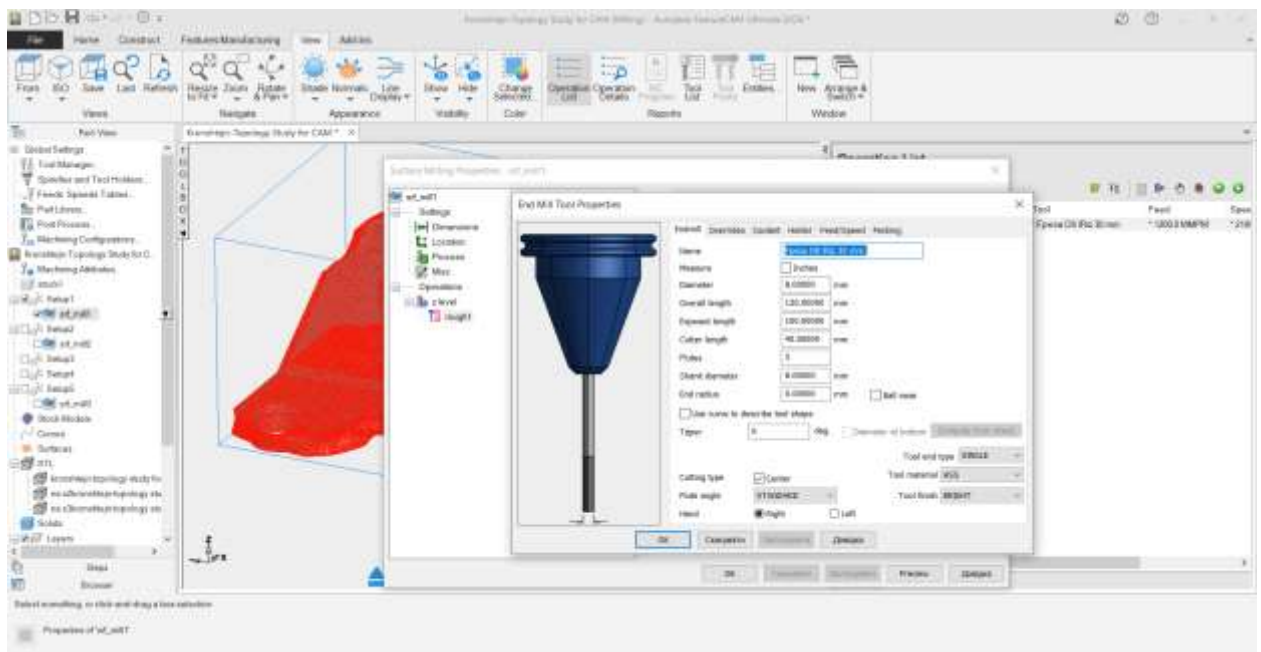


Рисунок 3.4 – Налаштування режимів різання.

- Далі необхідно згенерувати сам процес різання, щоб переконатися, що все проходить добре, оскільки якщо при симуляції обробки виникнуть якісь неточності, то їх ще можна виправити. Результат симуляції наведено на рисунку 3.5.

- Як видно з результату, то фреза не змогла обробити частину деталі тому необхідно створити ще один установ, щоб доробити деталь з іншого боку. Тому результат обробки уже з іншого установу буде виглядати так як показано на рисунку 3.6

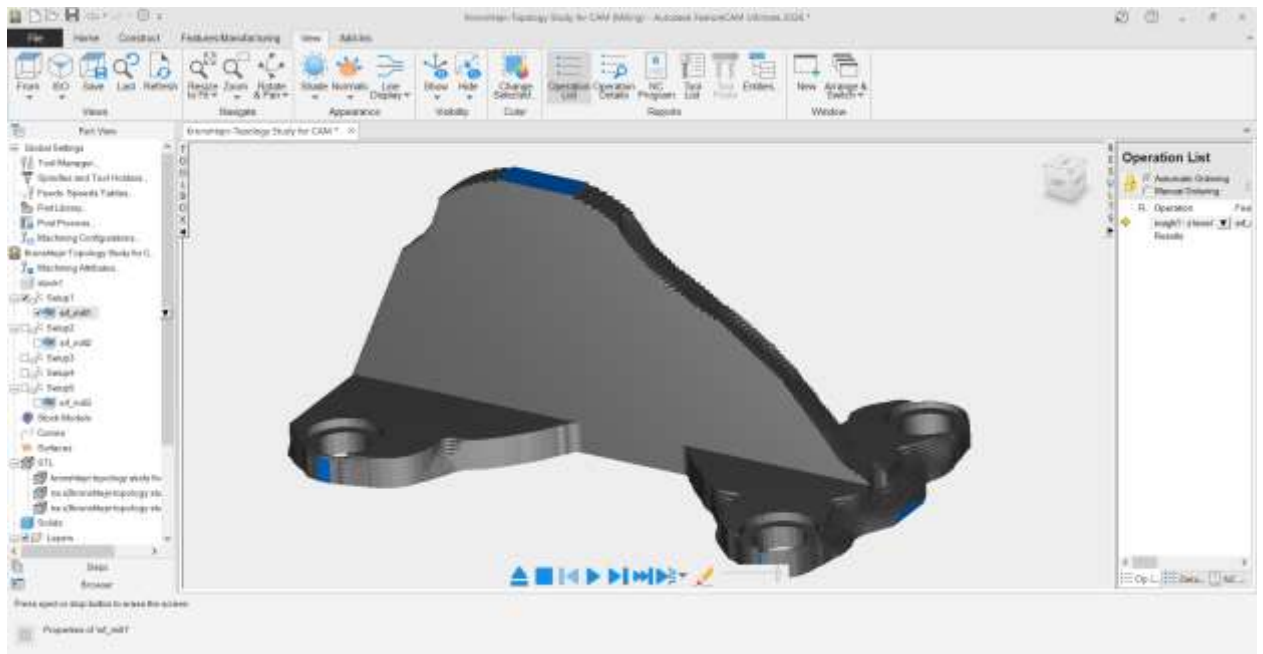


Рисунок 3.5 – Результат симуляції обробки.

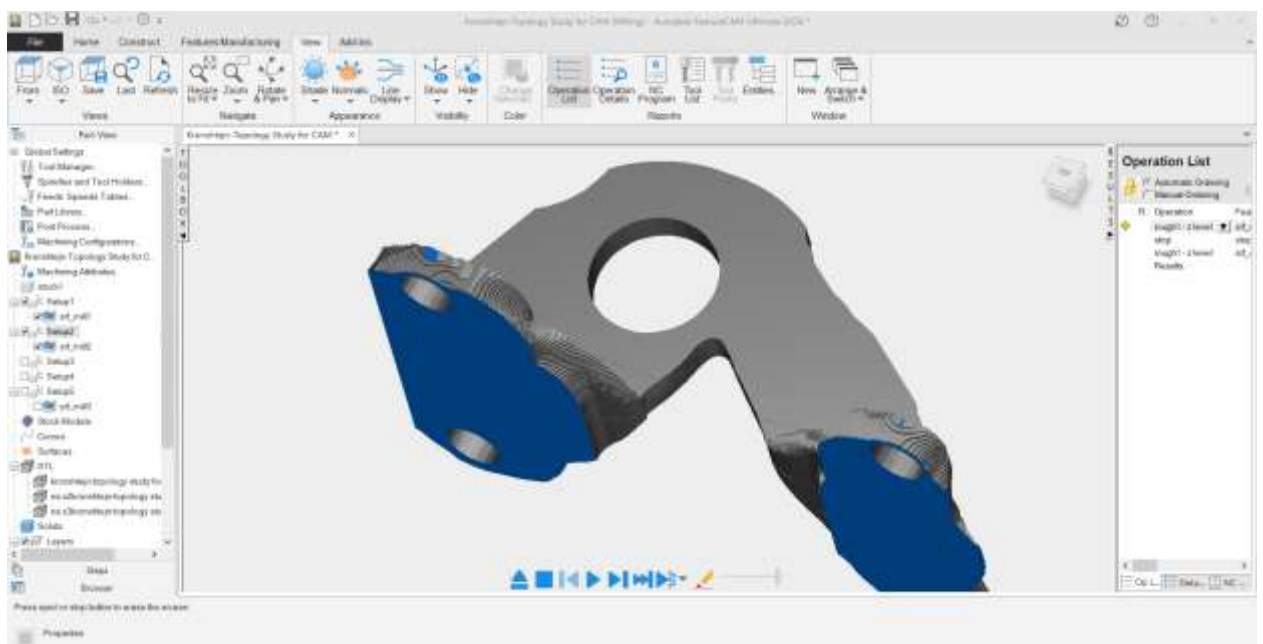


Рисунок 3.6 – Результат симуляції обробки включно з наступним установом.

- Також необхідно обробити і з протилежної сторони результат на симуляції, тобто уже готової деталі представлено на рисунку 3.7.

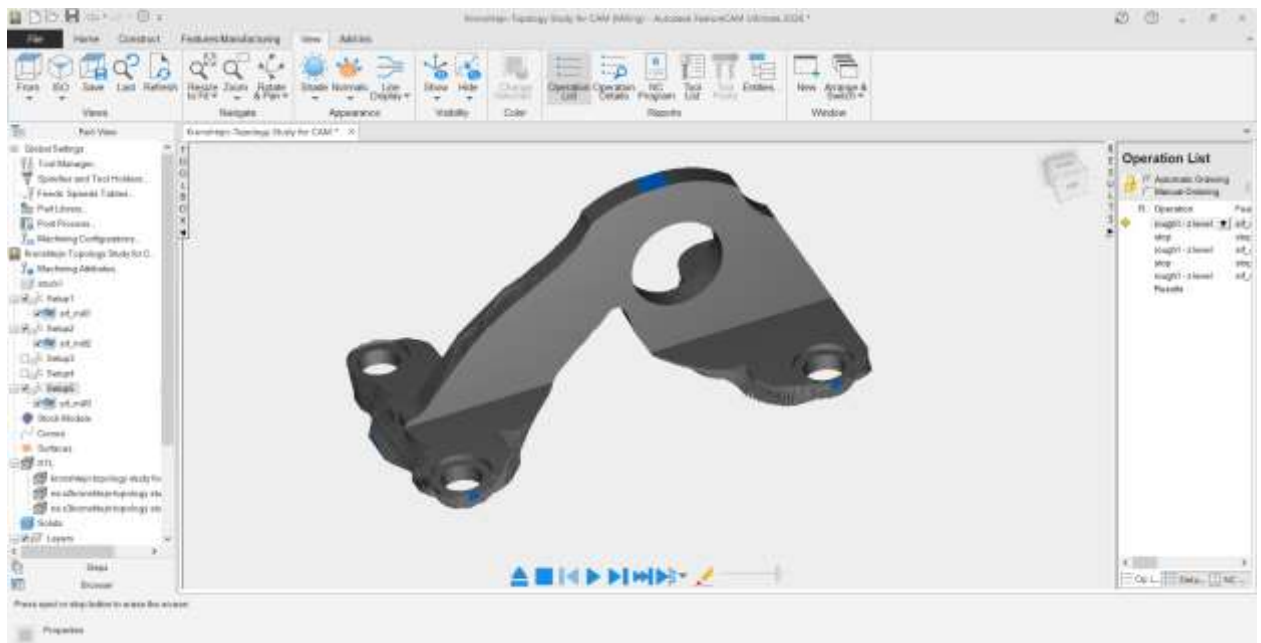


Рисунок 3.7 – Фінальний результат симуляції обробки кронштейну.

Варто відмітити, що в порівнянні з 3D друком при фрезеруванні необхідно обробляти деталь з різних сторін, що значно ускладнює виготовлення.

В результаті налагодження також отримуємо G-код за яким подібно до 3D друку деталь буде фрезеруватися на верстаті.

3.3 Висновки до розділу

В даному розділі представлено налагодження двох видів виготовлення деталі кронштейн. Перший спосіб – це 3D друк, а другий спосіб – фрезерування на фрезерному верстаті з ЧПК.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

4.1 Виготовлення оптимізованої деталі за допомогою адитивних технологій

Оскільки в попередньому розділі було здійснено налагодження роботи 3D принтера для виготовлення дослідної деталі, тому можна переходити до її безпосереднього виготовлення.

В якості обладнання для здійснення процесу адитивної технології скористаємося 3D принтером Creality Ender-3 V2 (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – 3D принтер Creality Ender-3 V2.

Для запуску роботи необхідно на карту пам'яті записати файл з G-кодом згенерованим раніше в ПЗ Creality Slicer. Отже необхідно це зробити. На принтері необхідно вибрати цей файл і запустити в роботу. Перед початком роботи принтер розігрівається до необхідних температур, а саме стіл підігрівається до 60°C, сопло з пластиком до 200°C. Такі температури найоптимальніші для друку PLA пластиком.

На рисунку 4.2 показано початковий етап друку.



Рисунок 4.2 – Початковий етап друку на 3D принтері.

Після деякого часу виготовлення можна спостерігати, що деталь успішно друкується і можна спостерігати за методом заповнення об'єму деталі типу кронштейн (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Тип заповнення об'єму деталі.

Проміжний етап друку представлено на рисунку 4.4.

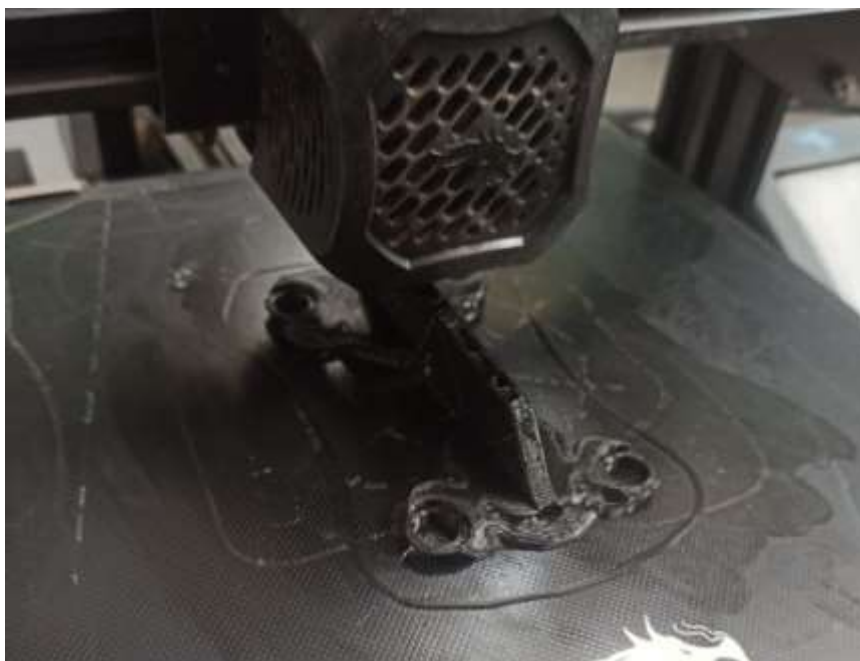


Рисунок 4.4 – Проміжний етап друку.

Загалом деталь успішно надрукувалася (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Фінал друку.

Далі необхідно видалити «підтримки» ділянок які «висять в повітрі». Зробивши дану процедуру на рисунку 4.6. представлено готовий виріб.



Рисунок 4.6 – Готовий виріб деталі типу кронштейн.

Загалом час обробки тривав так як було спрогнозовано ПЗ Creality Slicer, а саме 2 год. враховуючи час на прогрів столу та сопла.

Як і очікувалося отримали виріб який відповідає оптимізовані моделі деталі типу кронштейн. Усі специфічні форми відтворено так як у файлі. Порожнини які утворилися при оптимізації початкового файлу не є критичними для функціонування деталі.

4.2 Висновки до розділу

В даному розділі описано процес виготовлення дослідної деталі типу кронштейн, який був підданий процесу оптимізації топології для зменшення маси на 50% з умовою що нова форма не втратить основного свого функціоналу, а саме буде витримувати робоче навантаження.

ВИСНОВКИ

Проаналізувавши інформацію в першому розділі, що стосується генеративного проектування та оптимізації топології деталі дійшли висновку що такий вид проектування є дуже продуктивний та ефективний з точки зору швидкості та коректності інженерного проекту. Тому варто зробити експеримент щодо такого проектування при створенні конкретної деталі. Відповідно перевірити на практиці такий вид проектування.

В другому розділі здійснено дослідження віртуального прикладання навантаження, тобто тест на працездатність в реальних умовах якби вона була виготовлена. Після цього алгоритми оптимізації топології запропонували нову конструкцію деталі, яка буде на 50% легшою проте залишатися працездатною, а саме не руйнуватися при навантаженні в 10000Н.

Нова оптимізована деталь була повторно перевірена на прикладання навантаження, що в результаті підтвердило коректність оптимізації оскільки легша на 50% деталь все ще не руйнувалася, а працювала.

В третьому розділі представлено налагодження двох видів виготовлення деталі кронштейн. Перший спосіб – це 3D друк, а другий спосіб – фрезерування на фрезерному верстаті з ЧПК.

В четвертому розділі описано процес виготовлення дослідної деталі типу кронштейн, який був підданий процесу оптимізації топології для зменшення маси на 50% з умовою що нова форма не втратить основного свого функціоналу, а саме буде витримувати робоче навантаження.

Загалом результати представлені в роботі успішно підтвердили можливість застосування процесу оптимізації топології деталі при проектуванні конструкції деталей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матеріали за посиланням <https://formlabs.com/blog/topology-optimization/?srsltid=AfmBOoobqOLOIginK0mUQDPBHiWw2kIfUCC7HoByi1DAmqltCcKxfBDC>
2. Матеріали за посиланням <https://addinor.eu/articles/how-generative-design-and-3d-printing-fuels-innovation/>
3. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем. Навч. посібник / В.Я. Ворощук, Т.М. Вітенько. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2021. 164 с.
4. Божко Т. Є. Впровадження засобів САПР у навчальному процесі в Луцькому національному технічному університеті / Т. Є. Божко, Т. Н. Гальчук, В. А. Сичук // Наукові нотатки. - 2016. - Вип. 54. - С. 49-52. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_54_10.
5. A method of body parts force displacements calculation of metal-cutting machine tools using CAD and CAE technologies Chetverzhuk, T., Zabolotnyi, O., Sychuk, V., Polinkevych, R., Tkachuk, A. Annals of Emerging Technologies in Computing Open source preview, 2019, 3(4), pp. 37–47.
6. Ворощук В.Я., Вітенько. Т.М. Інжиніринг та 3D моделювання в середовищі Solidworks: навч. посібник. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. 164с.
7. Інноваційне обладнання автоматизованого виробництва. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології комп'ютерного конструювання верстатів, роботів та машин» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 158с.
8. Інженерна графіка в SolidWorks: Навчальний посібник/ С.І. Пустюльга, В.Р. Самостян, Ю.В. Клак – Луцьк: Вежа, 2018. – 172 с.

9. Довідкові матеріали програмного забезпечення FeatureCAM.
10. Довідкові матеріали програмного забезпечення Creality Slicer.
11. Довідкові матеріали програмного забезпечення Mach3.
12. Довідкові матеріали 3D принтера Creality Ender-3 V2.