

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівництво

(повне найменування інституту, факультету)

Технології машинобудування

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

другий (магістрський)

(ступінь вищої освіти)

на тему Особливості токарської оптимізації у
адитивному виробництві за допомогою
спеціального професійного забезпечення

Виконав: студент(ка) II курсу, групи М118М

Спеціальності 131.Трикладна механіка
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Технології машинобудування

(прізвище та ініціали)

Керівник Височинська Е.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Масленов В.О.

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Машинобудівний
 Кафедра Технології машинобудування
 Ступінь вищої освіти Магістр
 Спеціальність 131 Трикітна механіка
 (код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Технології машинобудування
 (назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Т.М.Б.
Дедес.І
 « 06 » 12 2019 року

ЗАВДАННЯ
 НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Муренко Татjana Тетянівна
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Особливості технологічної оптимізації улаштування верстатів до розробки спеціального креслення зовнішнього

керівник проекту (роботи) Величківський С.В.
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 26 » 11 20 19 року № 417

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) креслення деталі «Кронтетін»

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз проблематики внаслідок теорії та практики технологічної оптимізації; 2. Практичне застосування результатів технологічної оптимізації; 3. Методологічне забезпечення технологічної оптимізації; 4. Розробка особливостей виготовлення деталі «Кронтетін» оптимізованої конструкції.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Дир. розділу	Величкаєвський Є. В.		
Дир. праці	Шмигко В. І.		
Мет. консул.	Козісов О. Б.		

7. Дата видачі завдання « 10 » 09 20 19 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Аналіз предметної області теорії та практики технологічної оптимізації.	21.10.19	
2.	Практичне застосування результатів технологічної оптимізації.	31.10.19	
3.	Методологічне забезпечення технологічної оптимізації.	15.11.19	
4.	Дослідження особливостей використання деталі «Кронштейн» оптимізованої конструкції.	29.11.19	

Студент(ка)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Національний університет "Запорізька політехніка"

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ ДИПЛОМНОГО(Ї) ПРОЕКТУ (РОБОТИ)

Направляється студент Жученко Г.Г. до захисту дипломного проекту (роботи)
(прізвище та ініціали)
за напрямом підготовки 131 Прикладна механіка
спеціальністю 131-1 технології машинобудування
(шифр і назва спеціальності)
на тему: Особливості топологічної оптимізації у адитивному виробництві за допомогою спеціального програмного забезпечення
(назва теми)

Дипломний проект (робота) і рецензія додаються.
Директор інституту, декан факультету

(підпис)

Довідка про успішність

Жученко Г.Г.

(прізвище та ініціали студента)

за період навчання в інституті, на факультеті, у відділенні

Машинобудівний з 20 18 року до 2019 року повністю
виконав навчальний план за напрямом підготовки, спеціальністю з таким розподілом
оцінок за:
національною шкалою: відмінно 83,33 %, добре 8,33 %, задовільно 0 %;
100-бальною шкалою
шкалою ECTS: A 83,33 %; B 0 %; C 8,33 %; D 0 %; E 0 %.

Секретар інституту, факультету (відділення)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Висновок керівника дипломного проекту (роботи)

Студент (ка) Жученко Г.Г. виконав дипломну роботу в
повному обсязі, в установлені терміни. Дипломний
проект відповідає діючим вимогам ГОСТ, ЕСТД,
ДСТУ та іншим нормативним документам.
Студент виконав всі необхідні розрахунки, зміни
висновки. В цілому дипломний проект задовільно
оцінка "відмінно" Жученко Г.Г. Г.Г. Г.Г. Г.Г.
присвоєння кваліфікації "інженер-механік" 36
спеціальності "Технології машинобудування"

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

" 12 "

12

20 19

року

Висновок кафедри про дипломний проект (роботу)

Дипломний проект (робота) розглянуто (а): Студент (ка) Жученко Г.Г.
(прізвище та ініціали)
допускається до захисту даного (ї) проекту (роботи) в експертній комісії.
Завідувач кафедри

(назва)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

" " 20 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

РЕЦЕНЗІЯ
на дипломний проект (роботу)

Особливості технологічної оптимізації в адекватному виробництві
(вказати тему дипломного проекту (роботи))
за функціонально-оптимізаційного програмного забезпечення
Студент (ка) Мурченко Тарас Геннадійович

Спеціальність 131 Прикладна механіка
(код, найменування спеціальності)

Обсяг проекту 113-112С. презентація 10с.

Кількість аркушів креслень

Кількість сторінок пояснювальної записки 112С

а) короткий зміст проекту (роботи) та прийнятих рішень в магістерській роботі проведено аналіз літературних джерел та програмного забезпечення яке дозволяє оптимізувати конструкційні деталі, була проведена технологічна оптимізація деталі "кронштейн".

б) висновок про відповідність проекту (роботи) завданню Відповідає

в) характеристика виконання кожного розділу дипломного проекту (роботи), рівень відповідності останнім досягненням науки та техніки і передовим методам роботи

Робота виконана на високому науково-технічному рівні.

г) негативні особливості виконання проекту (роботи) суттєвих зрушень немає.

д) позитивні особливості робота присвячена актуальній темі, використано сучасне програмне забезпечення

е) оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки до проекту (роботи)

робота виконана у відповідності до ГОСТ, ЄСТД, ІСТУ

є) відгук про проект (роботу) загалом виконана на високому науково-технічному рівні

ж) інші зауваження «Було б доцільно розглянути вплив розширення даних даних на платформу з урахуванням її характеристик».

з) оцінка проекту (роботи) робота заслужує оцінки «відмінно».

Рецензію склав доц.кадр. Т.М.Б. Н.У. «Закарпатська політехніка» Логвинів Р.О.

(посада, місце роботи, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

« 12 » листопада 20 19 р.

[15:43:17] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №682 [3] (200044 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[15:43:26] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №687 [3] (200039 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[15:43:43] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №692 [3] (200028 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[15:44:29] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №697 [3] (200033 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[15:44:46] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №702 [3] (200043 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[15:44:53] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №707 [3] (200043 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[15:45:31] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №712 [3] (200033 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[15:45:51] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №717 [3] (200073 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[15:46:05] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №722 [3] (200053 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[15:46:12] Возникла ошибка при загрузке поисковой страницы №727 [3] (200056 миллисек.): Yandex (Время ожидания операции истекло)

[15:46:14] Тип проверки: *Стандартная*

[15:46:14] **ВНИМАНИЕ! Уникальность может быть определена некорректно! (Обнаружено ошибок: 30%)**

[15:46:14] **Уникальность текста 88%[©] (Проигнорировано подстановок: 0%)**

Перевірку на плагіат програмою AntiPlagiarism.NET, магістерської роботи Жученко Г.Г., провів зав. навч. лаб. каф. ТМБ Паміров В.М.

12.12.2019р.



РЕФЕРАТ

ПЗ: 112 с., 63 рис., 2 табл., 19 джерел.

Об'єкт дослідження –топологічна оптимізація в адитивному виробництві з використанням спеціального програмного забезпечення.

Метод дослідження – науково-дослідний.

Мета роботи – зменшення об'єму використовуваного матеріалу для виготовлення деталі «кронштейн» методом адитивного виробництва з використанням топологічної оптимізації за допомогою програмного забезпечення NX Topology Optimization.

В магістерській роботі було проведено літературний огляд джерел, в яких вже описувалися оптимізації різних видів, таких як, оптимізація форми, розмірів та топологічна. Були розглянуті одні з найбільш використовуваних методів топологічної оптимізації, їх суть та принципи роботи. Була проведена топологічна оптимізація деталі «кронштейн» з наведенням всіх параметрів та експериментальних результатів. В результаті було роздруковано деталь після проведення оптимізації. Розраховано вартість матеріалу для виготовлення однієї деталі за допомогою адитивного виробництва. Також було проведено аналіз потенційних небезпек при роботі з ПК та 3D-принтером та запропоновано заходи з охорони праці, які направлені на зменшення або часткового усунення дії шкідливих факторів.

ПРОЕКТУВАННЯ, ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ, АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ESO, BESO, SIMP, LEVEL-SET, МОДЕЛЬ, КОНСТРУКЦІЯ, SLM, DLMD, EBM, SGC, ІТЕРАЦІЯ, КРОНШТЕЙН.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВСТУП

1	АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ В ГАЛУЗІ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	9
1.1	Дослідження особливостей застосування топологічної оптимізації в машинобудуванні.....	9
1.2	Принципи топологічної оптимізації відповідальних деталей машинобудування.....	12
1.3	Методи топологічної оптимізації.....	17
1.4	Приклади успішного застосування топологічної оптимізації при проектуванні деталей машинобудування.....	23
2	ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	32
2.1	Використання адитивного виробництва для виготовлення деталей отриманих за допомогою топологічної оптимізації.....	32
2.2	Технології адитивного виробництва.....	34
2.3	Обмеження при використанні адитивного виробництва.....	36
3	МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	40
3.1	Загальне формулювання завдання топологічної оптимізації.....	40
3.2	Методика топологічної оптимізації в програмному забезпеченні NX Topology Optimization.....	48
3.3	Комп'ютерне забезпечення адитивного виробництва в модулі additive manufacturing.....	59
4	ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ «КРОНШТЕЙН» ОПТИМІЗОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ.....	63

4.1	Топологічна оптимізація існуючої деталі «кронштейн» в модулі NX Topology Optimization.....	63
4.2	Топологічна оптимізація деталі «кронштейн» спрощеної конструкції виходячи з обмежень, що прикладаються до вихідної деталі.....	84
4.3	Особливості виготовлення деталі «кронштейн» оптимізованої форми на 3D –принтері.....	87
5	ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ НОВОГО ПРИНЦИПУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ «КРОНШТЕЙН» МЕТОДОМ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	90
6	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	91
6.1	Аналіз потенційних небезпек.....	91
6.2	Заходи по забезпеченню техніки безпеки.....	93
6.3	Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці.....	96
6.4	Заходи з пожежної безпеки.....	98
6.5	Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	105
	ВИСНОВКИ.....	109
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	110

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

ТО	Топологічна оптимізація
AB	Адитивне виробництво
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalty
ESO	Evolutionary Structural Optimization
BESO	Bi-directional Evolutionary Structural Optimization
SLM	Selective laser melting
DLMD	Direct laser metal deposition
EBM	Selective electron beam melting
SGC	Solid ground curing
ПК	Персональний комп'ютер
ВДТ	Відеодисплейні термінали
МТП	Матеріально-технічне постачання
ЗЧ	Запасні частини
ТОіР	Технічне обслуговування і ремонт

ВСТУП

Сучасна промисловість вимагає виробництва більш складних і легких деталей (наприклад, аерокосмічна промисловість). Полегшення складних деталей вимагає, як правило, великої кількості робочої сили. На допомогу людині з'явилася топологічна оптимізація. Топологічна оптимізація - це оптимізація деталі, яка значно зменшує вагу деталі, зберігаючи її технічні характеристики. Топологічна оптимізація в основному використовується в адитивному виробництві. За допомогою адитивного виробництва, можна виготовити топологічно оптимізовану деталь будь-якої складності.

Оптимізація топології є особливо важливою для покращення винахідливих та запропонованих рішень, які спочатку не були зрозумілі інженеру. Цей метод унікальний, оскільки виробляє оптимальні рішення для заданих навантажень, граничних умов та заданих проектних реакцій.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМАТИКИ В ГАЛУЗІ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

1.1 Дослідження особливостей застосування топологічної оптимізації в машинобудуванні

Сучасні технології виробництва відкривають широкі можливості для промисловості. Одним з найбільш перспективних напрямків, на сьогоднішній день, є адитивне виробництво. Воно дозволяє виробляти унікальні за своїми характеристиками вироби і конструкції, які знаходять застосування в різних галузях машинобудування. Але разом з цим з'являється нове завдання, пов'язане з моделюванням органічних форм для адитивного виробництва.

Адитивне виробництво дозволяє значно зменшити вагу розроблюваних виробів. Авіаційна промисловість є однією з найбільш залежних галузей від ваги використовуваних виробів.

Зниження ваги конструкції літального апарату є ключовим завданням, від успішного виконання якого залежать його льотно-технічні та експлуатаційні характеристики. Для них, теорія раціонального проектування, в цілому, побудована. І тут практикою доведено ефективність безлічі типових рішень, принаймні для літаків традиційних компоновок. Однак місця прикладання великих зосереджених сил, наприклад, вузли навішування механізації крила, вузли шасі і тощо, відрізняються великою різноманітністю форм і силових схем. Останнє пояснюється відсутністю універсальної проектною методики для таких вузлів і значною часткою інтуїції, досвіду та інших евристичних чинників при їх створенні. Ефективність конструкцій з точки зору витрат матеріалу, яку може забезпечити традиційний підхід, має певну межу, яку в даний час досягнуто. Подальше підвищення їх «вагової досконалості» має ґрунтуватися на використанні принципово нової технології проектування - топологічної оптимізації - коли раціональна передача зусиль у конструкції закладається вже на етапі синтезу силової

схеми. У комплексі з останніми досягненнями в сфері «цифрового» виробництва, вона дозволить отримати вироби з унікальними характеристиками [1].

Ресурси, які людина використовує в своїй творчій діяльності, завжди обмежені, тому надзвичайно важливо використовувати їх з максимальною ефективністю. В цьому відношенні, оптимізація, яку спрощено можна визначити як процес пошуку найкращого варіанту при заданих обмеженнях, є досить цінним інструментом.

Традиційно, проектування здійснюється методом «проб і помилок». Початковий етап базується на «креативності», досвіді, інтуїції і знаннях інженера. Потім слідує перевірочний розрахунок, за результатами якого приймається рішення про введення поправок, модифікацій і створення нової конструкції. Процес «вихідний варіант-розрахунок-новий варіант» відбувався доти, поки будь-яких поліпшень зробити не вдається.

Досягнення комп'ютерних технологій і відносна вартість обчислювальних потужностей призвело до революційного прориву в підході до проектування. Можна впевнено констатувати, що в області розробки силових конструкцій «оптимізація» міцно увійшла в побут, витіснивши евристичний метод проб.

Використання топологічної оптимізації дозволяє створювати конструкції з кращими характеристиками (наприклад, з меншою вагою), істотно скорочуючи тимчасові і матеріальні витрати.

В даний час топологічна оптимізація є однією з основних тем в області оптимізації конструкцій. Кількість статей за цією темою, що публікуються в одному з провідних світових наукових видавництв Springer, з року в рік неухильно зростає (за даними видавництва Springer).

Для цього є об'єктивні причини:

По-перше, зниження маси, підвищення жорсткості конструкції і тощо, яку може дати топологічна оптимізація при грамотному її використанні,

часто перевершує аналогічні показники для інших методів (наприклад, оптимізації форми).

По-друге, набирає хід і впроваджуються в промисловість нові технології виробництва (наприклад 3D-друк), які дозволяють виготовляти деталі практично необмеженої за складністю форми. Це дозволяє максимально використовувати потенціал методу. Існує безліч програмних продуктів для топологічної оптимізації.

Без топологічної оптимізації вага кожної деталі в збірці буде вище, ніж вона могла би бути. Зайва вага - це нераціональне використання матеріалу, збільшення навантаження на рухомі деталі, зниження ефективності споживання електроенергії та підвищення витрат на транспортування. Тепер завдяки топологічній оптимізації з використанням таких інструментів як модуль NX Topology Optimization можна створювати міцні, але полегшені конструкції для різних галузей застосування. Цей підхід забезпечує просту постановку завдань, а також дозволяє контролювати дотримання технологічних вимог, задавати мінімальну товщину матеріалу і видаляти ділянки геометрії.

Традиційні методи проектування не використовують таких переваг нових технологій, як адитивне виробництво, яке дозволяє зняти конструктивні обмеження і відкриває нові можливості. Як правило, оптимальна конструкція деталі передбачає складну, «органічну» геометрію, для створення якої потрібний альтернативний підхід. За допомогою інструментів топологічної оптимізації можна задавати розташування опор і розподіл навантажень по матеріалу для забезпечення оптимальної форми деталі. Даний алгоритм також дозволяє зменшувати вагу конструкції, імпортувати CAD-геометрію і виконувати перевірочні розрахунки оптимізованої конструкції. Підвищується точність просторового моделювання деталей з композиційних матеріалів, деталей, надрукованих на 3D-принтері, а також кісток і тканин.

1.2 Принципи топологічної оптимізації відповідальних деталей машинобудування

Метою ТО є визначення оптимального розподілу матеріалу в області проектування при заданих навантаженнях із задоволенням критеріїв і обмежень оптимізації [5]. У цьому випадку для підрахунку використовується метод кінцевих елементів, в якому кожному кінцевому елементу приписується умовна щільність, керуюча внеском кінцевого елемента в глобальну матрицю жорсткості. Рішенням задачі ТО в даній постановці є розподіл умовної щільності в області проектування. В якості критеріїв і обмежень при топологічній оптимізації можуть виступати різні функції (і їх поєднання), такі як, наприклад, податливість або потенційна енергія деформації, обсяг, переміщення, характеристики.

Процес ТО можна поділити на кілька етапів-завдань:

- формулювання вимог до конструкції;
- розробка концепції конструкції
- структурна топологічна оптимізація (пошук раціональної конструктивно-силової схеми під дією зовнішніх навантажень і граничних умов) в рамках заданої області проектування;
- інженерний аналіз отриманої конструкції з урахуванням функціональних та технологічних умов, тому що часто отримані в результаті оптимізації конструкції хоча і є оптимальними, але можуть бути занадто дорогі або складні у виробництві. Ця проблема може бути вирішена за допомогою введення в модель додаткових обмежень на отримані рішення;
- остаточне доведення методом кінцевих елементів - оптимізації форми в підгрупі допустимих форм, які мають фіксовані топологічні властивості, такі як, наприклад, фіксоване число отворів в них. Тому ТО використовується для створення концепції, а оптимізація форми використовується для точного налаштування обраної конструкції топології, тобто створення нової

конструкції з урахуванням функціональних вимог і можливостей виробництва;

- аналіз остаточної оптимальної конструкції.

З огляду на те, що в будь-якій точці допустимої геометричної області з урахуванням дискретності використовуваних математичних моделей реалізується одне з двох можливих «крайніх» станів: конструкційний матеріал або міститься, або відсутній, то це може призвести до погіршення збіжності процесу оптимізації. Для подолання цієї проблеми в більшості програмних пакетів застосовується алгоритм, заснований на використанні проміжної щільності. Найбільш поширеним і використовуваним в даній роботі методом є метод пеналізації для твердого ізотропного тіла SIMP (Solid Isotropic Material with Penalty). У цьому методі модуль пружності матеріалу в елементі пов'язаний степеневим законом з щільністю матеріалу елемента [2].

Для деталей авіаційних двигунів завданням ТО може бути як мінімізація обсягу / маси при міцностних обмеженнях, так і оптимізація інших параметрів з обмеженнями за обсягом. Для демонстрації принципу топологічної оптимізації на рис. 1.1 показаний приклад визначення оптимальної конструкції опори, навантаженої розподіленним навантаженням, з мінімальною масою. На рис. 1.1 а, показані граничні умови, навантаження, а також області проектування і незмінних частин моделі. На рис. 1.1 б, наведено розподіл умовної щільності, відповідної мінімальної потенційної енергії деформування, де темним кольором виділені зони, умовна щільність яких відповідає 1, світлим - зі значеннями умовної щільності близькими до 0 (ця величина завжди позитивна). На рис. 1.1, в продемонстрована отримана підсумкова модель.

Останнім часом з'явилися роботи, в яких вирішується завдання оптимізації реальних конструкцій, в тому числі з урахуванням можливостей адитивних технологій. Але в основному в них розглядаються такі деталі, як кронштейни, скоби та інші.

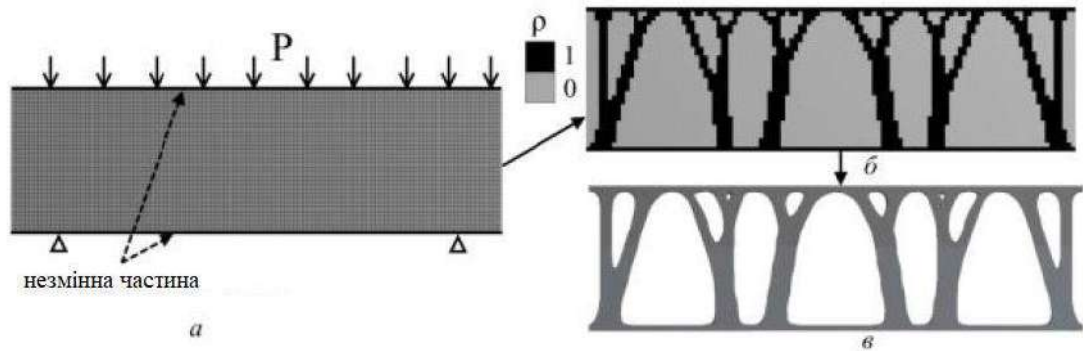


Рисунок 1.1 - Постановка завдання топологічної оптимізації (а), розподіл умовної щільності (б) і отримана твердотільна модель (в).

Деталі авіаційних двигунів, зокрема деталі турбін, працюють в умовах високих навантажень, нерівномірного нагрівання, мають складну форму. Оптимізація топології таких деталей, якими є лопатки турбін, являє собою складну задачу.

ТО - це підхід до оптимізації конструкції, котрий шукає оптимальний розподіл матеріалу в заданій області для заданих навантажень і граничних умов. Застосування топологічної оптимізації на етапі проектування допомагає знайти варіант дизайну конструкції з найбільш раціональним розподілом матеріалу і пустот в обсязі, таким чином помітно знизивши його масу (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Схематичний приклад топологічної оптимізації.

Але чи дійсно так просто відшукати бажану форму деталі? Складність, як і час пошуку можна помітно знизити, якщо правильно використовувати модуль NX Topology Optimization або інший продукт, що дозволяє проводити складну топологічну оптимізацію. Основні помилки, які виникають у користувачів, які вперше зіткнулися з топологічною оптимізацією.

1. Вибір некоректної області для оптимізації

Процес топологічної оптимізації починається з вибору області, в рамках якої оптимізатор проводить пошук. В ідеалі, звичайно, можна вказати в якості цієї області весь вільний обсяг, проте робити так зазвичай можливості немає. Мабуть, одним з найбільш значущих чинників при виборі області для оптимізації є облік взаємодії деталі у вузлі.

Використання геометричної моделі вже існуючої деталі - поганий варіант, так як вона вже має (швидше за все) неоптимальний розподіл матеріалу. Топологічний оптимізатор ж «не вміє» додавати матеріал, він шукає оптимальний варіант конструкції шляхом видалення ділянок геометрії із заданої області.

На прикладі рис. 1.3 порівнюючи результати оптимізації, можна відзначити, що вони дуже чутливі до того наскільки вільно алгоритм пошуку розподілу матеріалу міг розпоряджатися об'ємом.

В тому і в іншому випадках пошук оптимального розподілу матеріалу здійснювався всередині відповідної області, але в першому випадку частина отворів в цій області вже існувала. Таким чином в першому випадку NX Topology Optimization, маючи можливість лише видаляти «надлишки» матеріалу, не може додати його там, де у вихідній геометрії є отвори. В результаті при однаковій масі, другий варіант дизайну вийшов на 25% жорсткішим.

2. Визначення областей для обов'язкового збереження

Після вибору області для оптимізації (в рамках якої програма буде шукати результат) важливо також визначити ті області, які точно потрібно зберегти. Найчастіше це ділянки, через які компоненти контактують один з

одним або просто частини, без яких нормальне функціонування деталі неможливе.

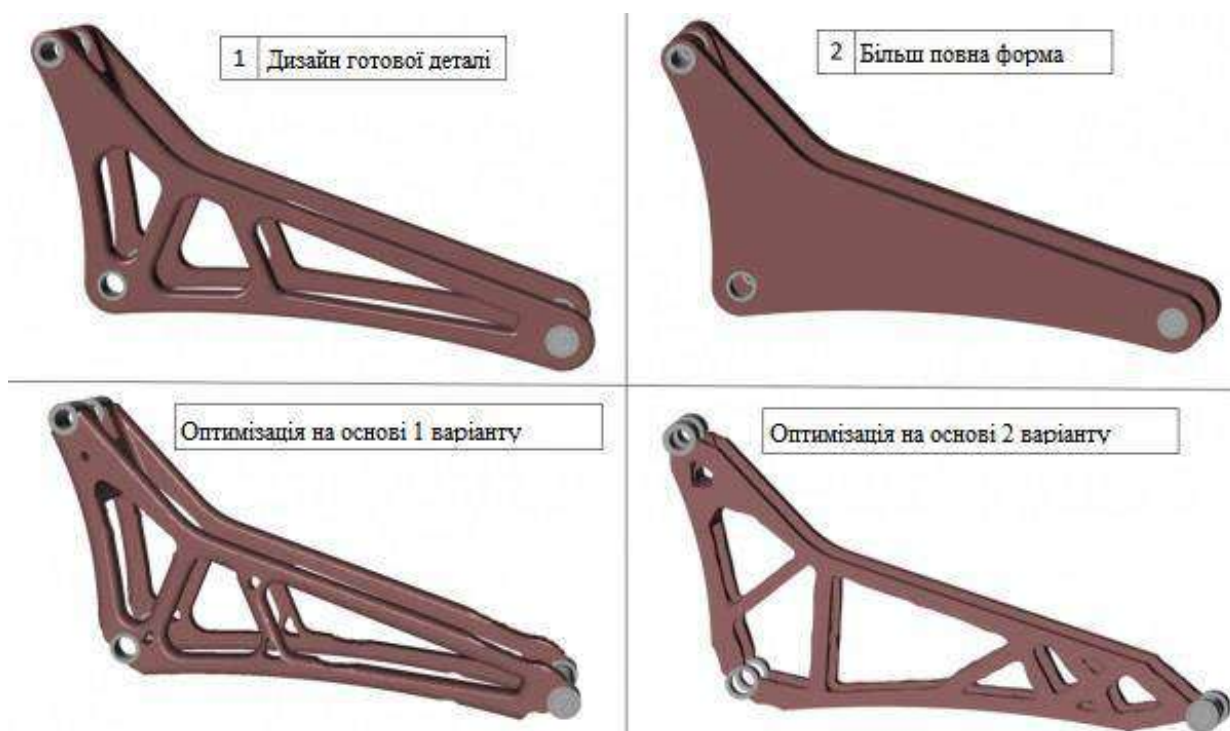


Рисунок 1.3 - Приклад вибору області для топологічної оптимізації

3. Щільність сітки

Результати топологічної оптимізації чутливі до кінцево-елементної сітки, тобто отримана форма конструкції може відрізнятися при розрахунках з різними сітками. У зв'язку з цим використання недостатньо дрібної сітки може призводити до незадовільних результатів. З подрібненням сітки деякі ділянки оптимізованої області стають все складніші і починають складатися з все більш дрібних елементів. Хоча в модулі NX Topology Optimization розмір кінцевих елементів підібрати не можна тому, що він підбирає його максимально сприятливим для кожної деталі.

4. Невірна оцінка часу оптимізації та проектування

Мабуть, головна помилка при використанні топологічної оптимізації полягає в тому, що після натискання кнопки «Вирішити» ви отримуєте готовий кінцевий дизайн або форму деталі. Насправді все трохи не так. Результати оптимізації лише показують в яких областях матеріал необхідний,

а в яких - ні з точки зору тих обмежень і цільової функції, які були використані.

У рідкісних випадках результати оптимізації можна відразу або після мінімальної обробки використовувати в якості кінцевої форми деталі. Найчастіше, час обробки результатів чи не більше, ніж час розрахунків, на підставі яких ці результати отримані. Для обліку кінцевої форми деталі зазвичай необхідно взяти до уваги всі особливості виготовлення. В якості ілюстрації вищесказаного на приклад деталі, показано оптимізацію яку виконували інженери Volkswagen рис. 1.4.

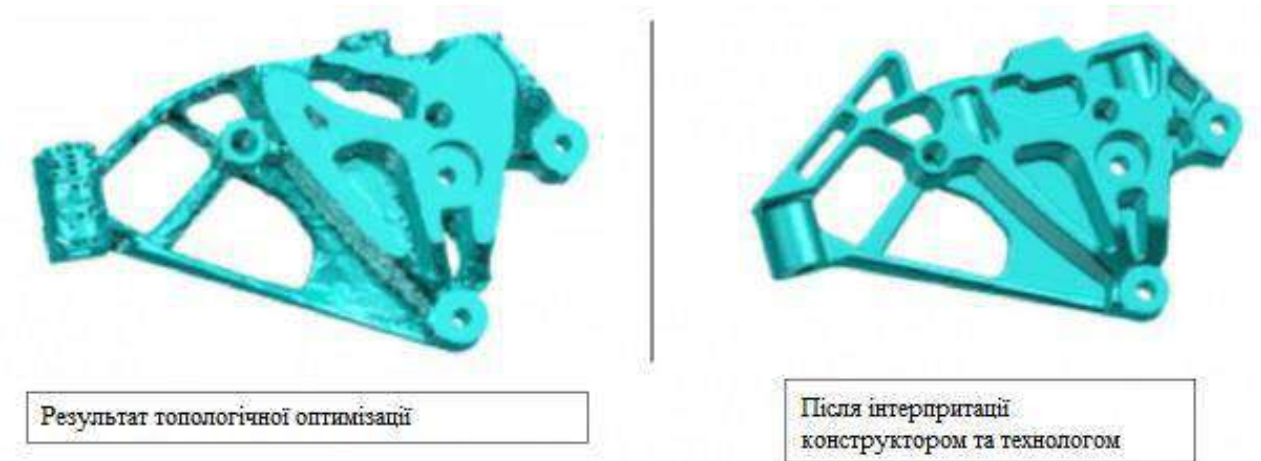


Рисунок 1.4 - Топологічна оптимізація деталі і подальша обробка результатів

Також важливо, що частина часу (іноді значна) обов'язково піде на обробку дизайну. Таким чином, процес знаходження форми деталі помітно збільшується.

1.3 Методи топологічної оптимізації

1.3.1 ESO/BESO-метод

Методи еволюційної оптимізації конструкцій (Evolutionary Structural Optimization - ESO) і двобічної еволюційної оптимізації конструкцій (Bi-

directional Evolutionary Structural Optimization - BESO) інтенсивно вивчаються і розвиваються в останні роки. Найбільш ефективним є застосування цих методів при оптимізації топології безперервних структур, тобто при знаходженні найкращого розміщення і геометрії порожнин всередині області моделювання. Крім того, цей тип оптимізації може застосовуватися не тільки для оптимізації натурних досить великогабаритних конструкцій, але і для оптимальної конструкції матеріалів на мікро- і нанорівні.

Метод ESO заснований на визначенні рівня напружень в довільній частині конструкції методом кінцевих елементів. Індикатором неефективного використання матеріалу є низький рівень напруги (або деформацій) в тій чи іншій частині конструкції. В ідеалі рівень напружень в конструкції повинен бути однаковим, близьким до граничного, але безпечного значенням [7].

З цієї концепції слідує принцип видалення матеріалу, згідно з яким недостатньо навантажений матеріал може бути видалений, що призводить до видалення окремих елементів кінцево-елементної моделі.

Рівень напруженості кожного елемента визначається порівнянням, наприклад напружень Мізеса цього елемента σ_e^{vm} з критичним або максимальним значенням напруг Мізеса в конструкції σ_{max}^{vm} . Якщо в результаті кінцево-елементного аналізу елемент задовольняє умові:

$$\frac{\sigma_e^{vm}}{\sigma_{max}^{vm}} < R_{Ri}, \quad (1.1)$$

де R_{Ri} - граничне значення (коефіцієнт відбракування), при якому об'єкт був видалений.

Цикл аналізу кінцевих елементів і їх видалення повторюється для декількох ітерацій з використанням одного і того ж порогового відношення до досягнення стійкого стану, тобто відсутність елементів, що задовольняють цьому порогу видалення. Потім коефіцієнт відбракування може бути збільшений відповідно до визначеного коефіцієнта еволюції H_i :

$$R_{R(i+1)} = R_{Ri} + H_i \quad (1.2)$$

Далі зі збільшеним коефіцієнтом відбраковування цикл проводиться до досягнення нового стаціонарного стану. Ітераційний процес продовжується, поки не буде досягнуто бажаного результату (наприклад, поки весь матеріал з тих областей, де рівень напруженості не перевищує 25% від максимального, не буде видалений) [8].

Математична основа методу ESO досить проста і зрозуміла, а його програмна реалізація не вимагає складних прийомів програмування, він в рівній мірі має своє застосування в 2D- і 3D-завданнях [9]. Видалення елемента проводиться присвоєнням його модулю нульового значення, що призводить до його ігнорування при наступних ітераціях (при подальшому обчисленні глобальної матриці жорсткості). У міру віддалення елементів в ітераційному процесі число рівнянь зменшується, знижуючи обчислювальну трудомісткість завдання, що особливо важливо для 3D-задач.

Однак віддалений на ранніх ітераціях матеріал може бути корисний на наступних, але метод ESO не дозволяє відновити його. Таким чином, в ряді випадків він не дозволяє отримати оптимального рішення. Ці недоліки в значній мірі усуваються в методі BESO.

Метод BESO (або метод двобічної еволюційної оптимізації конструкцій) дозволяє одночасно видаляти і додавати матеріал в області проектування. Принципова відмінність даного методу від ESO полягає в тому, що індекс чутливості порожніх елементів визначається шляхом лінійної екстраполяції поля зсувів, одержуваного в результаті кінцево-елементного аналізу [10]. Після цього заповнені елементи з мінімальними значеннями індексу чутливості видаляються зі структури, а порожні елементи з найбільшими значеннями чутливості заповнюються матеріалом. Кількість елементів що, видаляються і додаються на кожній ітерації визначені двома незалежними один від одного параметрами: відношенням видалення R_R і відношенням включення R_I [11].

Незважаючи на те, що методи ESO / BESO досить прості в реалізації, практично відсутня реалізація методу ESO для вирішення завдань оптимізації топології, орієнтованих на виробництво.

1.3.2 SIMP-метод

SIMP-метод (Solid Isotropic Material with Penalization), або метод пеналізації для твердого ізотропного тіла, - це метод ТО, основна ідея якого полягає в створенні поля віртуальної щільності, що представляє аналог деякої реальної характеристики об'єкта. Призначення методу полягає в зменшенні податливості конструкції внаслідок перерозподілу матеріалу в області простору, що розглядається при невідомих граничних умовах. Результатом його використання є отримання рівноміщнісного об'єкта в рамках даної задачі. Широке застосування SIMP отримав в адитивних технологіях (технологіях 3D-друку), здатних створювати об'єкти необхідної форми.

На сьогоднішній день SIMP-метод широко застосовується в усьому світі. В якості розрахункової змінної розглядається щільність матеріалу. Оптимальна структурна топологія отримана шляхом перерозподілу матеріалу всередині області на основі критеріїв оптимальності або методу математичного програмування [12].

У методі SIMP область проектування Ω дискретизується за допомогою кінцевих елементів. Властивості матеріалу постійні в кожному з цих елементів і залежать від відносної щільності x_i . Відносна щільність повинна дорівнювати 1 або 0 в розрахунковій області Ω після оптимізації. Для обмеження проміжної відносної щільності використовується фактор відбраковування p .

Відношення між модулем пружності і відносною щільністю записується як [13]:

$$E(x_i) = E_{min} + (x_i)^p E_o - E_{min} \quad (1.3)$$

де E_o - модуль пружності матеріалу. Для чисельної стійкості E_{min} приймається за $E_o / 1000$, x_i - відносна щільність i -го елемента; p - фактор відбраковування.

1.3.3 Level-Set-метод

Основна ідея методу Level-Set (встановлення рівня або безлічі рівнів) полягає в тому, щоб виразити криву або поверхню в неявному вигляді. При цьому вони приймаються в якості встановленого нульового рівня багатовимірної функції [14]. Наприклад, в оптимізації топології структури, криві або поверхні, що зображують її межі, деформуються, щоб мінімізувати енергію пружної деформації. Для заданої області Ω з гладкою межею передбачається існування неявної функції $\varphi(x)$, яка задовольняє умовам:

$$\varphi(x) \begin{cases} > 0, & x \in \Omega^+ \text{ (матеріал)} \\ = 0, & x \in \partial\Omega \text{ (границя)} \\ < 0, & x \in \Omega^- \text{ (пустота)} \end{cases} \quad (1.4)$$

Двома найбільш часто використовуваними функціями в методі Level-Set являються функції Хевісайда $H(\varphi)$:

$$H(\varphi(x)) = \begin{cases} 0, & \varphi \leq 0, \\ 1, & \varphi > 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

і дельта-функція Дірака $\delta(\varphi)$, яка дорівнює 0 всюди, крім вузької смуги, що містить границю матеріалу:

$$\delta(\varphi(x)) = \frac{dH(\varphi(x))}{d\varphi} \quad (1.6)$$

З обчислювальної точки зору згладжена функція Хевісайда краще в процесі оптимізації.

Всі методи оптимізації мають схожі труднощі: проблему «шахової дошки», тобто пустот в тілі конструкції не пов'язаних об'ємами матеріалів, залежність від сіткового розбиття і проблему локального мінімуму [15,16]. Проблема «шахівниці» виражається в тому, що схема оптимізованої моделі має розриви суцільності і незв'язані «острівці» матеріалу.

Залежність від сіткового розбиття полягає в тому, що використання різних кінцевих елементів сіток призводить до різної топологічної оптимізації. Ця трудність в ряді робіт була подолана з використанням методу керованого периметра і схем фільтрації чутливості. Але в загалі проблема розбиття кінцевих елементів сіток до сих пір не вирішена [17].

Також слід зазначити, що згадані вище труднощі частково знайшли своє рішення в методі двобічної еволюційної оптимізації конструкцій - BESO, який передбачає аналізування на кожній ітерації напруженого стану кінцевих елементів. В результаті цього відбувається видалення менш навантажених елементів і додавання елементів, заповнених матеріалом, в області напружений стан яких, вище деякого значення.

1.4 Приклади успішного застосування топологічної оптимізації при проектуванні деталей машинобудування

Для типової неохолоджуваної лопатки турбіни низького тиску газотурбінного двигуна проведена топологічна оптимізація конструкції лопатки для забезпечення задоволення вимог нерезонансних частот коливань і отримання мінімальної маси [2]. В даній роботі використовується метод SIMP топологічної оптимізації. В результаті оптимізації отримана конструкція лопатки зменшеною більш ніж на 30% маси в порівнянні з прототипом при збереженні профілю лопатки. Результати перевірного розрахунку показали достатність значень запасів міцності підсумкової конструкції лопатки. Додатково описано технологічні обмеження різних класів адитивних технологій і вказано можливий спосіб виготовлення лопатки. Аналіз результатів, отриманих в роботі, показав можливість застосування топологічної оптимізації при проектуванні не охолоджуваних лопаток турбін з урахуванням їх виготовлення методами адитивних технологій з метою зменшення маси і контролю власних частот коливань. Об'єднання методів адитивних технологій і топологічної оптимізації дозволить використовувати весь потенціал обох технологій.

Одним з найбільш важливих моментів при проектуванні робочих лопаток турбін, особливо подовжених лопаток турбін низького тиску, є необхідність наладки нерезонансних частот.

На основі підходів ТО отримана модель лопатки з мінімальною масою з власними частотами коливань.

Для спрощення досліджень неохолоджувана робоча лопатка (рис. 1.5), що знаходиться під дією відцентрового навантаження і нерівномірного по висоті лопатки температурного поля, розглянута ізольовано. При цьому поперечні перерізи перебували під дією постійної температури. В якості граничних умов задана умова жорсткого закріплення за робочими гранями

хвостовика лопатки. Контактна взаємодія між бандажними полками не враховулася.



Рисунок 1.5 – Вихідна модель дослідної лопатки

Газодинамічні контури лопатки зафіксовані. Оптимізація маси здійснювалася усередині заданих обводів лопатки.

У програмі-оптимізаторі на кожній ітерації послідовно вирішувалися дві задачі: статична і динамічна. В рамках першої задачі визначалася податливість лопатки і її потенційна енергія деформування, у другій - значення перших шести власних частот коливань.

В результаті розв'язання задачі оптимізації з урахуванням прикладених навантажень і обмежень отримано розподіл умовної щільності, на основі якої виділено об'єм, що підлягає виключенню з моделі лопатки (рис. 1.6). Цей результат можна розглядати як попередню концептуальну модель.

В результаті конструкторського опрацювання попередньої концептуальної моделі, спрямованої в основному на згладжування отриманих поверхонь і видалення матеріалу з умовною щільністю менш 0,3, сформована твердотільна концептуальна модель лопатки (рис. 1.7), для якої

виграш в масі в порівнянні з вихідною моделлю суцільної лопатки склав 34%.



Рисунок 1.6 – Об'єм, що підлягає виключенню з моделі лопатки

Як недоліки використовуваного підходу до проектування неохолоджуваної робочої лопатки варто відзначити, що виграш в масі в порівнянні з вихідною моделлю суцільний лопатки склав 34%, що нижче виграшу в порівнянні з повністю порожнистою лопаткою (50%). Однак порожниста конструкція найчастіше недостатньо жорстка і міцна, що може привести до появи неприпустимих динамічних процесів в умовах експлуатації. Додатковою проблемою є зміна значень характеристик, в тому числі міцності, при згладжуванні конструкції і перетворенні попередньої в твердотільну концептуальну модель. Так, в даному прикладі при цьому перетворенні максимальна зміна значень власних частот коливань досягла 8%.

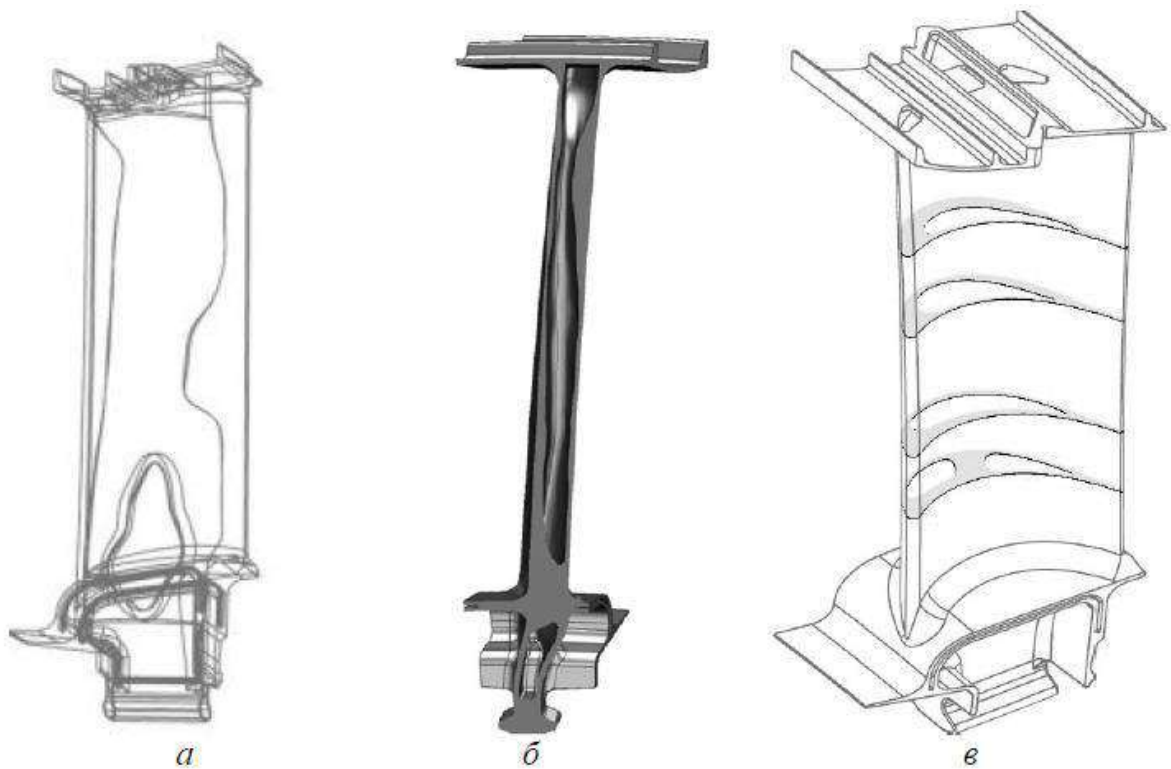


Рисунок 1.7 – Дротяна модель остаточної конструкції (а) і вид декількох перетинів: перпендикулярно осьовому (б) і радіальному (в) напрямку

Група дослідників з університету Дельфта (Delft University) і датського Технічного університету (Technical University of Denmark) реалізувала принципово новий підхід до справи конструювання крил літаків наступного покоління [3]. Дослідники використовували Level – set метод топологічної оптимізації для поліпшення характеристик правої консолі крила пасажирського лайнера Boeing 777 (рис. 1.8). За підсумками оптимізації дослідники прийшли до висновку, що такий метод дозволяє знизити масу конструкції крила щонайменше на 2-5 відсотків у порівнянні з традиційною конструкцією, використовуваної сьогодні.

Топологічна оптимізація являє собою спосіб поліпшення тієї чи іншої конструкції з точки зору розподілу матеріалу при збереженні загальних характеристик міцності незмінними. У загальних рисах такий метод автоматизованого або частково автоматизованого поліпшення дозволяє оптимізувати конструкцію, раціонально розподіливши матеріал і порожнечі в

обсязі та знизивши її масу. Результат топологічної оптимізації зовні зазвичай нагадує щось, створене природою.

Для свого експерименту дослідники використовували програмне забезпечення топологічної оптимізації, запущене на французькому суперкомп'ютері Curie. Для представлення тривимірних об'єктів використовуються так звані вокселі (Voxels), які представляють собою ділянки тривимірного простору мінімального розміру. Подібно до того, як кількість традиційних пікселів визначає роздільну здатність екрана, так і кількість вокселів визначає роздільну здатність тривимірної моделі якогось об'єкта. Нове програмне забезпечення тривимірного моделювання та конструювання працює з роздільною здатністю понад мільярд вокселів. Для оптимізації вчені взяли внутрішню конструкцію правої консолі крила пасажирського лайнера Boeing 777 довжиною 27 метрів. Його тривимірну модель дослідники розбили на 1,1 мільярда вокселів. При оптимізації програма розраховувала навантаження спочатку для кожного вокселя окремо, а потім для їх сукупності.

Отримана після кожної оптимізації тривимірна модель подавалася на вхід програми кілька сотень разів. В результаті нова внутрішня структура крила вийшла плавною та зовні нагадує судинну сітку. Для демонстрації ефективності роботи топологічної оптимізації датські дослідники зробили розрахунок конструкції крила літака. Розрахунок, в якому було задіяно 8 тисяч процесорів суперкомп'ютера, тривав кілька днів, а в його результаті на світ з'явилася конструкція з такими незвичними елементами, створити які не прийшло б і в голову дуже досвідченій і творчій людині-конструктору. Як уже згадувалося раніше, вага нового крила на 2-5 відсотків нижче, ніж вага традиційних крил. У реальному світі це дозволило б скоротити вагу авіалайнера Boeing 777 на 200-500 кілограм. Це, начебто і не дуже багато, але таке зниження ваги призведе до економії від 40 до 200 тонн палива щорічно кожним таким літаком.

Одна консоль крила лайнера Boeing 777 має три лонжерона (поздовжні силові елементи) і більше 30 нервюр (перпендикулярні ребра). При оптимізації програмне забезпечення зменшило кількість лонжеронів до двох, а число нервюр - до трьох, причому останні розташувалися ближче до кореня крила. Замість безлічі нервюр тривимірна модель внутрішньої конструкції крила літака отримала структурні утворення, на зразок гілок. Слід зазначити, що програма врахувала необхідність вільного простору для паливних баків і механізації.

Топологічна оптимізація зазвичай використовується для поліпшення конструкції окремих невеликих елементів. За твердженням датських вчених, такий метод був застосований до конструкції такого масштабу вперше.

Сьогодні авіарозробники не розглядають радикальну зміну конструкції крила в якості методу підвищення економічності літаків. Внутрішню структуру крила в доступній для огляду перспективі серйозно змінювати не планується, проте дослідники працюють над оптимізацією форми і зовнішніх елементів цього аеродинамічного елемента. Зокрема, в Євросоюзі розробляється проект ламінарного крила, два прототипи якого вперше були випробувані в кінці вересня поточного року.

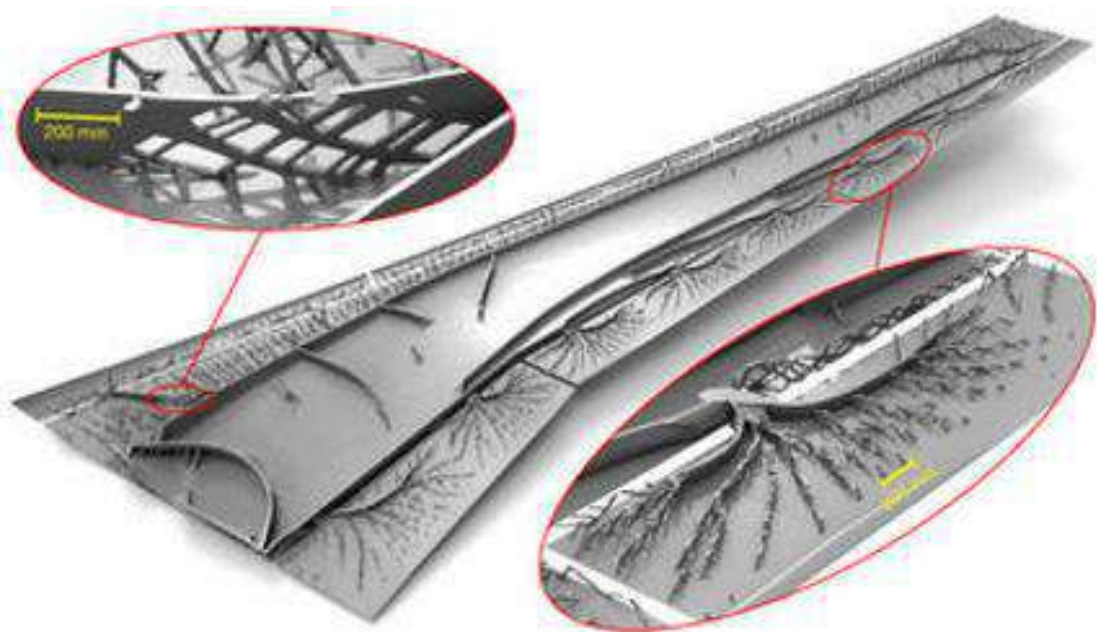


Рисунок 1.8 – Конструкція крила після оптимізації

Ламінарное крило повинно мати дуже гладку поверхню і невисокий профіль, щоб забезпечити ламінарний, незбурений повітряний потік на якомога більшій своїй площі. Для створення гладкого крила планується використовувати декілька технологій, включаючи більш щільну підгонку стандартних елементів конструкції один до одного. Передбачається, що ламінарное крило матиме на 50 відсотків менший лобовий опір у порівнянні зі стандартним. Це дасть змогу зменшити споживання палива літаком в польоті на п'ять відсотків.

Вчені одного з науково-дослідного технічного університету вдосконалили методику проектування і 3D-друку авіаційної деталі із застосуванням принципів топологічної оптимізації, яка базується на методі SIMP топологічної оптимізації [4]. Кронштейн (рис. 1.9, 1.10, 1.11) для авіадвигуна виконаний з титанового сплаву BT6 і має вагу на 20% менше традиційних аналогів.



Рисунок 1.9 – Зображення моделі оптимізованої деталі «Кронштейн»

В вихідному варіанті кронштейн являє собою об'ємний масивний моноліт, значна частина матеріалу якого не несе ніякого функціонального навантаження. Вдосконалений кронштейн спроектований із застосуванням топологічної оптимізації, за рахунок цього вдалося позбутися зайвого матеріалу і знизити масу виробу більш ніж на двадцять відсотків. Зниження ваги дозволяє підвищити паливну економію за рахунок чого збільшується дальність польоту і корисне навантаження, а також зниження викидів парникових газів.

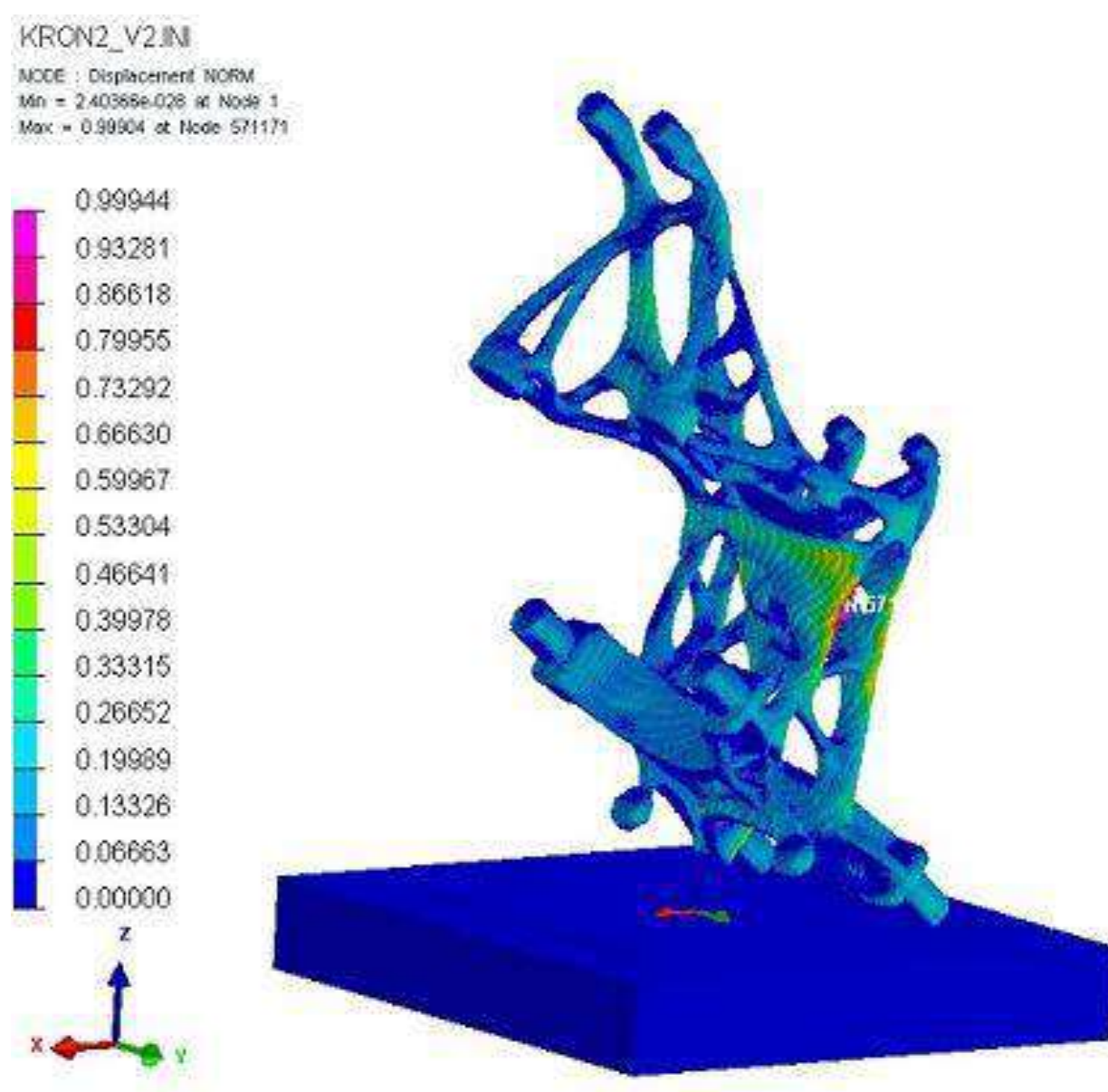


Рисунок 1.10 – Зображення моделі оптимізованої деталі «Кронштейн» з прикладеним навантаженням



Рисунок 1.11 – Зображення готової оптимізованої деталі «Кронштейн»

Зважаючи на складну геометричну форму виробництво кронштейнів традиційними методами являється неможливим. Деталь виготовлена методом 3D-друку за технологією селективного лазерного наплавлення металопорошкових композицій (рис. 1.12), як стверджують розробники, дозволяє скорочувати витрати порошку більш ніж в три рази, за допомогою технології 3D-друку з використанням топологічної оптимізації.

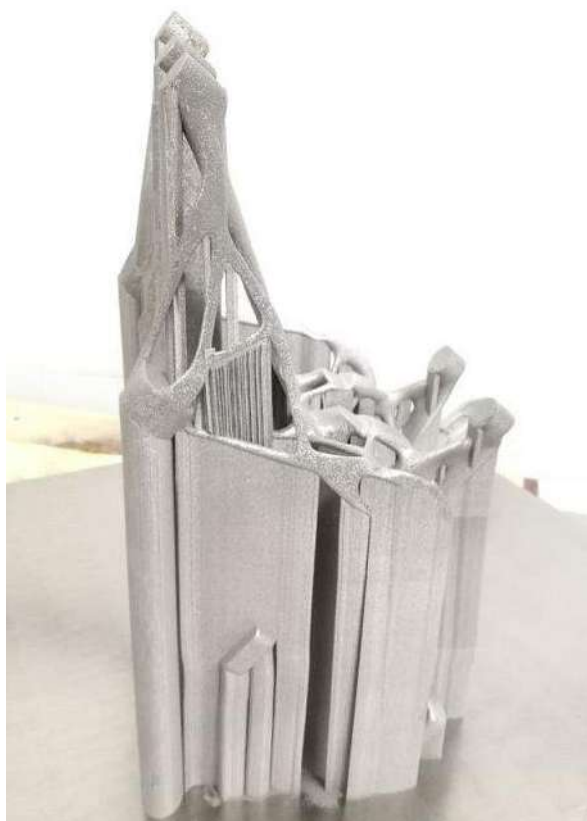


Рисунок 1.12 – Зображення деталі «Кронштейн» в процесі 3D-друку

2 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

2.1 Використання адитивного виробництва для виготовлення деталей отриманих за допомогою топологічної оптимізації

Терміном «адитивне виробництво» (АВ) прийнято називати групу технологічних способів швидкого прототипування, які дозволяють створювати цілісні, об'ємні вироби з різних матеріалів за допомогою тривимірної комп'ютерної моделі. Стандарт ASTM F2792-12A дає визначення терміну АВ як «спосіб з'єднання матеріалів, при якому відбувається пошарове створення об'єкта за заданою цифровою тривимірною моделлю». Перші способи АВ, що з'явилися на початку 1980-х років, в основному були спеціалізовані на виробництві виробів з полімерних пластиків і гуми. В даний час ці способи знайшли успішне і комерційне застосування в таких областях, як аерокосмічне виробництво, машинобудування, медицина, архітектура і дизайн, побутова електроніка, ювелірне виробництво, військова промисловість. Поряд з розвитком способів АВ, які використовують в якості сировини полімерні матеріали, розвивалися і способи, які використовують металеві сплави.

В останні два десятиліття топологічна оптимізація стала активним полем для досліджень. Це призвело до мультидисциплінарних зав'язків сучасних методів ТО і їх використанням при вирішенні задач механіки твердого тіла, гідродинаміки, теплодинаміки, біології і т.д.

На цей час ТО знаходить своє використання тільки в адитивному виробництві тому, що виготовлення деталей оптимізованої форми на основі створеної тривимірної моделі, звичайними металообробними верстатами є неможливим.

З точки зору реалізації програмного забезпечення оптимізація топології була вбудована в модуль більшості комерційних CAD / CAE-систем, таких як

OptiStruct від Altair HyperWorks, а також модуль SIMULIA Tosca, застосовуваний в Abaqus, модуль NX Topology Optimization від Siemens PLM Software, ANSYS і MSC Nastran.

В даний час відомі наступні основні методи ТО: SIMP (твердий ізотропний матеріал з пеналізацією), ESO (еволюційна структурна оптимізація) і Level-Set (метод встановлення рівня) і їх різні комбінації. Дані методи мають особливості, але в той же час тісно пов'язані між собою [6].

Використання адитивних технологій головним чином пов'язано з виготовленням деталей невеликого розміру, але з неймовірно високою роздільною здатністю і деталізацією, яку не забезпечить жоден інший спосіб виробництва, будь то лиття або обробка деталей. Системи управління і обробки матеріалів постійно збільшуються в габаритах без втрати точності, властивості адитивному виробництву. Наприклад, компанія ExOne випускає 3D-принтери, які друкують не самі деталі, а форми для лиття. Ці ливарні форми можуть мати розміри, порівняні з розмірами кузова пікапа. Розміри DMLS-машин, основним споживачем яких є аерокосмічна промисловість, все збільшуються і збільшуються, таким чином з'явилася можливість друкувати кілька варіантів однієї деталі одночасно, не втрачаючи точність, якість поверхні, властивості матеріалу і т.д. Цілком очевидно, що інженери справляються з проблемою збільшення розмірів 3D-принтерів досить швидко.

Прецизійні деталі (особливо з металу), створювані на сучасних 3D-принтерах - справжні шедеври, які можна потримати в руках, покрутити, встановити в автомобілі. Але на сам процес друку може піти до восьми годин. Швидкість друку залежить від двох основних чинників: товщини шару і швидкості пересування лазерного променя. Високотехнологічні компанії використовують різні підходи до вирішення цього питання. Так, ефективний спосіб збільшення продуктивності - використання в принтері кількох лазерів з різними механізмами управління. У міру збільшення темпів

адитивного виробництва зростає і кількість надрукованих деталей, які використовуються нарівні з заводськими.

2.2 Технології адитивного виробництва

Найбільш затребуваними технологіями в даний час є: селективне лазерне плавлення (Selective laser melting, SLM); селективне електронно-променеве плавлення (Selective electron beam melting, EBM) і пряме лазерне нанесення металу (Direct laser metal deposition, DLMD) (табл. 2.1).

Вибіркова лазерна плавлення (SLM) - метод адитивного виробництва, що використовує лазери високої потужності для створення тривимірних фізичних об'єктів за рахунок плавлення металевих порошків.

Виробничий цикл складається з нанесення тонкого шару порошку на робочу поверхню - як правило, металевий стіл, здатний пересуватися у вертикальному напрямку. Процес друку протікає у робочій камері, яка заповнюється інертними газами (наприклад, аргоном). Відсутність кисню дозволяє уникати оксидації витратного матеріалу, що робить можливим друк такими матеріалами, як наприклад титан. Кожен шар моделі сплавляється, повторюючи контури шарів цифрової моделі. Плавлення проводиться за допомогою лазерного променя, що направляється за осями X та Y двома дзеркалами з високою швидкістю відхилення. Потужність лазерного випромінювача досить висока для того щоб частинки порошку плавилися в гомогенний матеріал.

Електронно-променева плавлення («Electron Beam Melting» або EBM). Дана технологія часто класифікується як метод швидкого виробництва. Електронно-променева плавлення (EBM) схожа з вибіркоким лазерним плавленням (SLM), головна відмінність полягає у використанні електронних випромінювачів, так званих електронних гармат, замість лазерів в якості

джерел енергії для плавлення. В основі технології лежить використання електронних пучків високої потужності для сплавлення металевого порошку у вакуумній камері з утворенням послідовних шарів, які повторюють контури цифрової моделі. На відміну від технологій спікання, електронно-променеве плавлення дозволяє створювати деталі особливо високої щільності і міцності.

Цей метод виробництва деталей довільних форм дозволяє створювати металеві моделі високої щільності з металевого порошку. Готові вироби практично не відрізняються від литих деталей за механічними властивостями. Пристрій зчитує дані з файлу, що містить тривимірну цифрову модель, і завдає послідовні шари порошкового матеріалу. Контури шарів моделі викреслюються електронним пучком, таким чином що порошок плавиться в місцях зіткнення. Плавлення проводиться в вакуумних робочих камерах, що дозволяє працювати з матеріалами, чутливими до оксидації - наприклад, з чистим титаном.

Direct laser metal deposition (DLMD) - технологія прямого лазерного нанесення металу заснована на застосуванні лазерного випромінювання і співвісною з ним (або бічною) подачею порошку на підкладку, при цьому потік порошку і лазерне випромінювання сфокусовані в одну точку.

Маскована стереолітографія (SGC) - метод адитивного виробництва, багато в чому схожий з технологією друку методом цифрової світлодіодним проекції (DLP).

Технологія заснована на нанесенні тонких шарів фотополімерної смоли з подальшим опроміненням матеріалу ультрафіолетовим світлом. Опромінення відбувається з фізичного фотошаблону або «масці» відповідного контуру. Опромінення призводить до полімеризації (затвердіння) матеріалу, після чого зайвий матеріал видаляється з робочої зони, а порожнини заповнюються легкоплавким воском. При необхідності проводиться механічна обробка поверхні, після чого виробничий цикл повторюється. По завершенні побудови моделі віск виплавляється, залишаючи готову модель, яка потребує додаткового опромінення в ультрафіолетовій печі для повної полімеризації.

Поява адитивних технологій, топологічної оптимізації і 3D-друку викликали помітні зміни у виробничій сфері і дозволили компаніям створювати деталі, геометрію яких практично неможливо отримати, використовуючи традиційні способи.

Деталі, створені за допомогою адитивних технологій, як правило, мають невеликі розміри. Завдяки виникненню 3D-принтерів надруковані деталі можуть мати геометричні елементи, які неможливо отримати за допомогою будь-якого іншого методу виробництва - ні з допомогою лиття, ні за допомогою механічної обробки. При появі 3D-друку металом на ринку ця технологія позиціонувалася як революційна, що підтверджувалося такими моделями-демонстраторами, як наприклад, металева ґратчаста конструкція.

2.3 Обмеження при використанні адитивного виробництва

Незважаючи на багато позитивних особливостей 3D-друку, впровадження даних технологій в усьому світі ще не досягло значного рівня. Це пояснюється наявністю зрозумілих проблем, як при створенні розробок, так і фізичними особливостями самої технології виробництва. Існує потреба в створенні та розробці методів контролю і загальній системі національних стандартів.

Наприклад розглянемо процес АВ з точки зору фізики і матеріалознавства. Шар металевого порошку поетапно нагрівається і охолоджується. Після розпилення нового шару попередній піддається повторному нагріванню, в результаті чого відбувається сплавлення двох шарів в єдине ціле. До моменту закінчення друку кожен шар піддається багаторазовій циклічній зміні температури, що приводить до виникнення в деталі залишкових деформацій. Нерівномірний розподіл порошку, а також циклічне теплове розширення і стиснення може спровокувати утворення

невеликого дефекту мікроструктури. На рівні макроструктури можливе утворення додаткових деформацій, обумовлених складною формою деталі та конструкцією опор. Це може стати причиною збоїв друку деформації і, як наслідок, виходу деталі за межі допусків, розтріскування або розлому деталі.

Широкому поширенню АВ перешкоджають такі технічні та економічні бар'єри:

- властивості матеріалу (деталі часто мають анізотропні властивості, що обумовлено пошаровою природою процесів АВ);
- вибір матеріалів для АВ вкрай обмежений;
- точність виготовлення і якість поверхонь деталей;
- швидкість виготовлення (обмежена дрібносерійним виробництвом);
- високі капітальні вкладення;
- висока вартість матеріалів і обслуговування;
- відмінності в геометрії і властивості між «ідентичними» деталями, виготовленими на різних установках;
- замкнута архітектура більшості установок АВ, що не дозволяє дослідникам і технологам варіювати умови обробки;
- обсяг створюваних деталей (розміри деталей, допустимі до 3D-друку);
- швидкість створення деталей. Немає можливості виготовляти деталі досить швидко для задоволення попиту;
- дефекти створюваних деталей: дефекти можуть бути викликані температурними деформаціями, порушенням у пресі підтримок, зіткненням механізму подачі порошку з деталлю через деформації і т.д;
- впевненість у властивостях матеріалу, створюваного під час друку. Не існує стовідсоткової вірогідності в тому, що деталь, створена за допомогою адитивних технологій, має постійні механічні властивості у всьому об'ємі деталі;
- підвищена вартість полімерних матеріалів;

- перебої друку, що виникають через температурні деформації, неправильне калібрування верстата, несправність механізму розпилення порошків і інших чинників;

- трудомісткість процесу на всіх етапах (точне відтворення всіх властивостей, що відповідають чіткому 3D друку, усунення похибок, складний процес відділення підтримуючих структур).

Нарешті, надзвичайно важливо здійснювати контроль деталей, формованих з використанням адитивних технологій, на наявність дефектів. В силу особливостей фізичних процесів, що відбуваються при формуванні таких виробів, в них можуть виникати не тільки дефекти, зазвичай властиві застосовуваних матеріалів, а й поля механічних напружень.

Адитивні технології - це відносно молодий напрямок виробництва, і на шляху до широкого їх розповсюдження все ще необхідно подолати деякі труднощі

Отже, технології адитивного виробництва часто відносять до технологій XXI століття і не без підстав. Адитивні технології мають величезний потенціал у справі зниження енергетичних витрат на створення найрізноманітніших видів продукції.

Таблиця 2.1 – Переваги та недоліки різних методів адитивного виробництва

Методи	Якість деталей	Багатофункціональність методу та обладнання	Переваги	Недоліки
SLM	Дуже якісні, значимої механічної обробки не потребується	Застосування широкої номенклатури матеріалів, використовується для гравіювання	Висока точність виробів, отримання тонких стінок (до 50 мкм)	Низька продуктивність, висока вірогідність виникнення тріщин
EBM		Використовується для зварювання	Більш висока продуктивність, зменшення вірогідності виникнення тріщин за рахунок зниження градієнта температур, можливість попереднього підігріву електронним променем	Необхідність вакууму, точність нижче, ніж при SLM (більший діаметр сфокусованої плями)
DLMD	Дуже якісні, потребується механічна обробка у більшості випадків	Застосування широкої гами матеріалів, використовується для різання, зварювання, гравіювання, ремонту	Більш висока продуктивність, ніж при SLM / EBM, більш контрольований процес	Відносно SLM / EBM – низька точність (більший діаметр сфокусованої плями), неможливість використовувати малі фракції порошків, висока вірогідність виникнення тріщин
SGC		Застосування широкої гами матеріалів, обмеженої їх твердістю, використовується для ремонту	Не відбувається змін фазового складу, термічні навантаження відсутні, висока продуктивність	Відносно SLM / SLM / EBM – низька точність (більший діаметр потоку робочого газу)

3 МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

3.1 Загальне формулювання завдання топологічної оптимізації

Використання оптимізації дозволяє створювати конструкції з кращими характеристиками (наприклад, з меншою масою), істотно скорочуючи тимчасові і матеріальні витрати. Процеси проектування з використанням оптимізації та без неї з спрощеннями показані на рис. 3.1, 3.2.



Рисунок 3.1 - Процес проектування без використання оптимізації

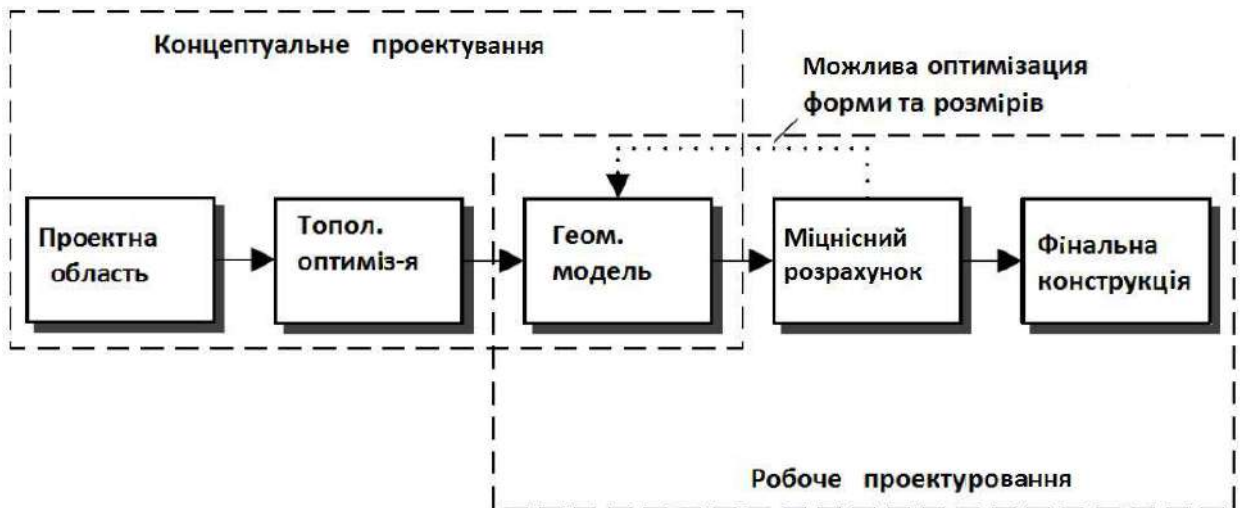


Рисунок 3.2 – Процес проектування, який включає топологічну оптимізацію

На другому рисунку операцій дещо більше, проте сумарний час і вартість проекту виявляється менше через зниження числа «проб та помилок».

При перевірочному розрахунку геометрія та розміри перетинів відомі, і мета аналізу полягає у визначенні «вихідних параметрів» конструкції: напружень, переміщень, власних частот і т. д. На противагу цьому, при оптимізації геометрія та характеристики жорсткості невідомі, і завдання полягає в їх визначенні таким чином, щоб максимізувати або мінімізувати якийсь критерій, задовольнивши всі обмеження. В якості такого критерію (цільової функції) може виступати маса або жорсткість конструкції, критична сила втрати стійкості і т.д. Обмеження можуть бути геометричними (наприклад, висота, ширина, площа перетину), і фізичними: напруження, переміщення та інші.

Для будь-якого процесу проектування характерна наявність трьох стадій. Перша - концептуальна стадія, на якій визначається силова схема конструкції. Приймаються рішення якісного характеру щодо генеральних шляхів передачі зусиль. Друга стадія - попереднє проектування, де вибирається форма конструктивних елементів. Нарешті, фінальна стадія - робочий (детальне) проектування.

Можна виділити три основні класи задач оптимального проектування (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Загальна класифікація задач оптимізації конструкцій

Перші дослідження в області оптимізації конструкцій фокусувалися на оптимізації розмірів (рис. 3.4), яка розглядає, наприклад, пошук раціональних параметрів поперечних перерізів балок і товщини оболонок. Силова схема при цьому не змінюється. Такі завдання вирішуються на етапі робочого проектування.

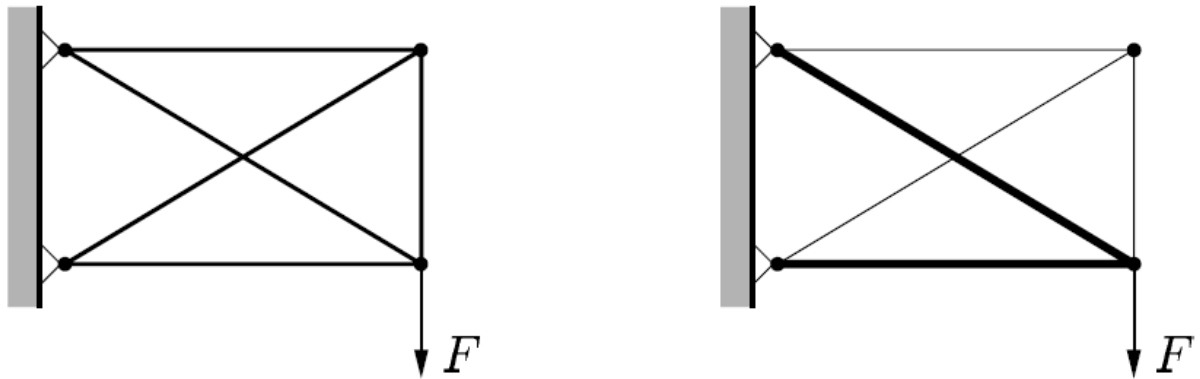


Рисунок 3.4 – Оптимізація перетинів форми

Оптимізація форми (рис. 3.5) передбачає пошук «зовнішніх кордонів» конструкції, наприклад, форми вирізу в пластині або форми балки. Силова схема також постійна. Оптимізація форми використовується на стадії попереднього проектування.

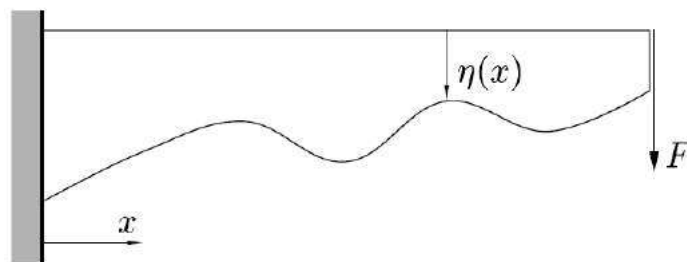


Рисунок 3.5 – Оптимізація форми балки: визначення функції $\eta(x)$

Оптимізація розмірів і форми може не привести до найкращого результату, якщо прийнята силова схема далека від ідеалу. Для вирішення

даної проблеми розроблено методи топологічної оптимізації (рис. 3.6). Мета її полягає у визначенні оптимального розподілу матеріалу в заданій області.

Оптимізація форми - це окремий випадок оптимізації топології, проте практична реалізація цих методів радикально відрізняється. Тому їх прийнято відносити до двох різних категорій. Співвідношення між топологічною оптимізацією і оптимізацією розмірів прямо протилежне: з фундаментальної точки зору вони далекі один від одного, але в частині імплементації схожі.

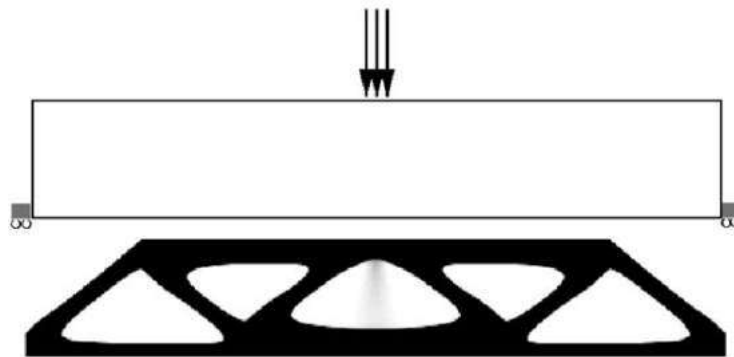


Рисунок 3.6 – Топологічна оптимізація двовимірного континууму

Конструкція - провідник сил. Її завдання - передати навантаження від місця прикладання до місць врівноваження (закріплення) без втрати несучої здатності. При цьому важливо, особливо в авіаційних конструкціях, затратити на передачу зусиль якомога менше матеріалу, щоб забезпечити найменшу вагу.

Ключовим фактором, що впливає на вагову ефективність конструкції, є вихідні передумови щодо взаємного розташування в просторі силових елементів: стрижнів, стінок і т.д. Більш точно ці «вихідні передумови» називати силовою схемою, визначивши останню як кількість, тип, спосіб з'єднання між собою і розташування в просторі силових елементів.

Визначення найвигіднішої силової схеми традиційно перебувало в сфері інтуїтивних компетенцій інженера. Перші спроби застосувати апарат математичного програмування наштовхувалися на «проблему вибору такого

простору проектних змінних, різним чисельним значенням яких відповідали б найрізноманітніші силові схеми». Проте, сьогодні можна констатувати, що зазначена проблема успішно вирішена. Розроблено безліч математичних моделей, що дозволяють використовувати методи нелінійної оптимізації для пошуку топології конструкції. Починаючи з роботи, в ужиток увійшов термін топологічна оптимізація.

Розглянемо загальну задачу топологічної оптимізації: знайти розподіл матеріалу, що мінімізує цільову функцію F , при обмеженнях $g_j \leq 0, j = 1 \dots M$. Розподіл матеріалу в області проектування описується щільністю як функцією координат $\rho(r)$, $r = (x, y, z)$, яка може приймати тільки два значення: 0 (порожнеча) і 1 (суцільний матеріал). В термінах нелінійного математичного програмування завдання формулюється в такий спосіб:

$$\begin{cases} \min F = F(u(\rho), \rho) \\ g_j(u(\rho), \rho) \leq 0, j = 1, \dots, M \\ \rho(r) = 0 \text{ або } 1, \forall r \in \Omega \end{cases} \quad (3.1)$$

Де поле переміщень задовольняє лінійному або нелінійному рівнянню рівноваги.

Існує два шляхи до розв'язку задачі (3.1). Перший підхід аналогічний знаходженню оптимальної форми конструкції, але має на увазі можливість виникнення нових «пустот», а другий заснований на використанні «тіл змінної щільності».

В останньому випадку задача топологічної оптимізації вирішується розбиттям області проектування Ω на достатньо велике число N кінцевих елементів та використанням в якості проектних змінних їх значення щільності. Отримуємо наступну проміжне формулювання:

$$\begin{cases} \min F = F(u(\rho), \rho) = \sum_i \int \Omega f(u(\rho_i), \rho_i) dV \\ g_j(u(\rho), \rho) \leq 0, j=1, \dots, M \\ \rho_i = 0 \text{ або } 1, i=1, \dots, M \end{cases} \quad (3.2)$$

де ρ означає вектор проектних змінних розмірністю N .

Відомо, що задача топологічної оптимізації (3.2) не має розв'язку в загальному вигляді. Для дискретного формулювання (3.2) характерна залежність результату від густоти сітки. Для вирішення вказаних проблем можна прибїгти до релаксації або додатковим обмеженням. Перший метод веде до гомогенізації, яку ввів в топологічну оптимізацію М. Bendsoe та N. Kikuchi. За допомогою ж накладення допоміжних обмежень вдається запобігти різкі осциляції в розподіленні щільності.

Значно ускладнює прямий розв'язок задачі (3.2) той факт, що проектні змінні дискретні та можуть приймати значення 0 або 1. Жоден із існуючих методів дискретної оптимізації не може «обхватити» практичні задачі з сотнями тисяч проектних змінних.

Введення в якості розподілу щільності безперервної функції дозволяє використовувати ефективні градієнтні алгоритми, які дозволяють досягнути збіжності за прийнятне число ітерацій (від 10 до 1000). Задача топологічної оптимізації в континуальній постановці запишеться, як

$$\begin{cases} \min F = F(u(\rho), \rho) = \sum_i \int \Omega f(u(\rho_i), \rho_i) dV \\ g_j(u(\rho), \rho) \leq 0, j=1, \dots, M \\ 0 \leq \rho_i \leq 1, i=1, \dots, M \end{cases} \quad (3.3)$$

Формулювання (3.3) складає основу для більшості сучасної літератури з топологічної оптимізації. Інтерполяція між щільністю і властивостями матеріалу зазвичай виражається у вигляді $f(u(\rho), \rho) = g(\rho) f_0(u)$, де $g(\rho)$ - інтерполююча функція щільності, а $f_0(u)$ - функція, що описує напружений стан суцільного середовища (наприклад, питома енергія деформації).

Витоки застосування тіл зі змінною за обсягом жорсткості (модулем пружності) для визначення силових схем сягають до А. А. Комарова, де проводилася оптимізація пластин за критерієм найбільш жорсткої конструкції. Подальший розвиток цієї ідеї отримали в роботах В. А. Комарова: на основі моделі тіла змінної щільності формулюється алгоритм отримання конструкцій мінімальної маси, запропоновано критерій ефективності КСС - силовий фактор. Цікавий додаток дана теорія отримала в області концептуального проектування літальних апаратів. З її допомогою стало можливим прогнозувати деформації крила літака на ранніх стадіях проектування, а також побудувати методику багатодисциплінарної оптимізації літальних апаратів.

На основі теорії гомогенізації М. Bendsoe і N. Kikuchi запропонували для топологічної оптимізації використовувати анізотропний матеріал з періодичною мікроструктурою (рис. 3.7).

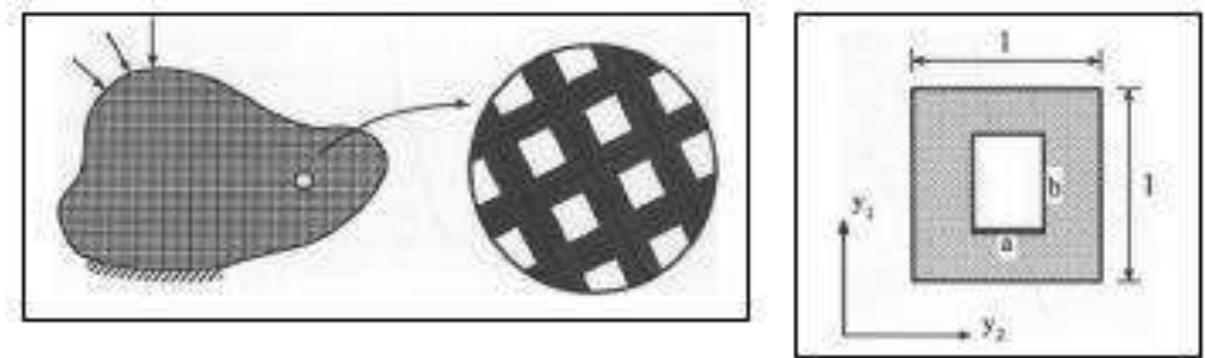


Рисунок 3.7 – Мікрокомірка з прямокутними порожнинами (зліва), параметризація мікрокомірки (праворуч)

Таким чином, задачу топологічної оптимізації вдалося звести до задачі оптимізації розмірів порожнин в мікрокомірках. Однак конструкції, отримані таким методом, складні з технологічної точки зору. До недавнього часу виготовляти пористі матеріали, суворо витримуючи геометрію мікрокомірок, не представлялося можливим. Сьогодні, у зв'язку з розвитком адитивних

технологій, топологічна оптимізація на основі гомогенізації переживає «друге народження» (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 - Гойдалка з пористої мікроструктури

З метою спрощення методу гомогенізації, розроблена так звана SIMP-модель матеріалу (Solid Isotropic Material with Penalization). Дана модель має на увазі пропорційний закон залежності модуля пружності від щільності:

$$E(\rho) = \rho^p E_0, \quad (3.4)$$

де E_0 - модуль пружності суцільного матеріалу, $p \geq 1$ - параметр, який можна назвати коефіцієнтом пеналізації (від англ. penalization - штраф).

SIMP - модель забезпечує збіжність рішення до топології «0-1», тобто розподіл матеріалу приймає бінарний характер. Тобто чим вище p , тим менше залишається областей з проміжною щільністю (між нулем та одиницею).

Модель «тіла змінної щільності» призводить до задачі з гладкими, диференційованими функціями, яка може бути ефективно вирішена при допомозі добре зарекомендованих собою градієнтних методів.

SIMP-модель реалізована в модулі топологічної оптимізації в ряді промислових систем інженерного аналізу.

3.2 Методика топологічної оптимізації в програмному забезпеченні NX Topology Optimization

В даній дослідницькій роботі був використаний модуль NX Topology Optimization. Нижче розглянуто сам інтерфейс модулю (рис.3.9) [18].



Рисунок 3.9 – Інтерфейс програмного модулю NX Topology Optimization

Розглянемо детальніше інтерфейс програмного модулю, тобто кожне позначення окремо.



«Управління тілами».

Саме за допомогою цієї команди ми задаємо основні параметри для оптимізації геометрії деталі. Ця команда дає змогу задати навантаження та обмеження для окремих зон моделі деталі, які в наступному будуть підлягати оптимізації.



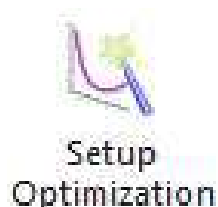
«Призначення матеріалу».

За допомогою цієї команди ми задаємо вже існуючий матеріал для деталі, або задаємо параметри та створюємо новий.



«Управління глобальними навантаженнями».

За допомогою цієї команди ми задаємо загальні параметри, які стосуються не лише окремих частин моделі деталі, а взагалі всієї деталі.



«Налаштування оптимізації».

За допомогою цієї команди ми задаємо параметри котрі безпосередньо стосуються самої оптимізації, а саме це приблизна кількість кінцевих елементів, та бажана вага деталі в кілограмах.



«Топологія».

За допомогою цієї команди ми маємо змогу розглянути модель оптимізованої деталі в повному обсязі. Тобто в кольорі заданого матеріалу та без вказування навантажень.



«Максимальне зміщення».

За допомогою цієї команди ми маємо визначену точну кількісну характеристику переміщення в міліметрах. Та отримуємо кольорове зображення, тим самим маючи розуміння в яких частинах деталі, значення переміщення найвище.



«Максимальне навантаження».

За допомогою цієї команди ми маємо визначене точне значення максимального навантаження. Та отримуємо кольорове зображення, тим самим маючи розуміння в яких частинах деталі, значення навантаження найвище.

«Легенда».



Legend

Загалом ця команда не дає суттєвого результату. Вона тільки викликає одну з команд («Максимальне зміщення» або «Максимальне навантаження»), яка була відкрита останньою.



Topology
Opt Help

«Допомога».

Ця команда викликає допоміжний файл з коротким описанням кожної з команд.

Після ознайомлення з інтерфейсом можна перейти безпосередньо до самої методики топологічної оптимізації в модулі NX Topology Optimization.

В першу чергу потрібно призначити деталі необхідний матеріал за допомогою команди «призначення матеріалу» (рис. 3.10).

Наступний крок це використання функції “Manage Bodies” (рис. 3.11).

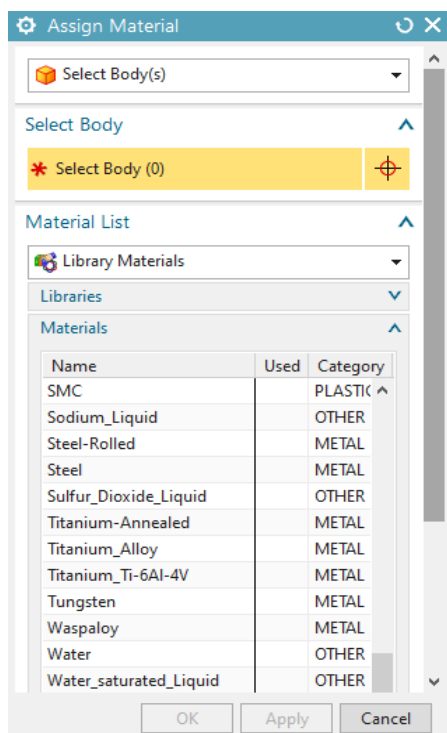


Рисунок 3.10 – Вікно вибору матеріалу

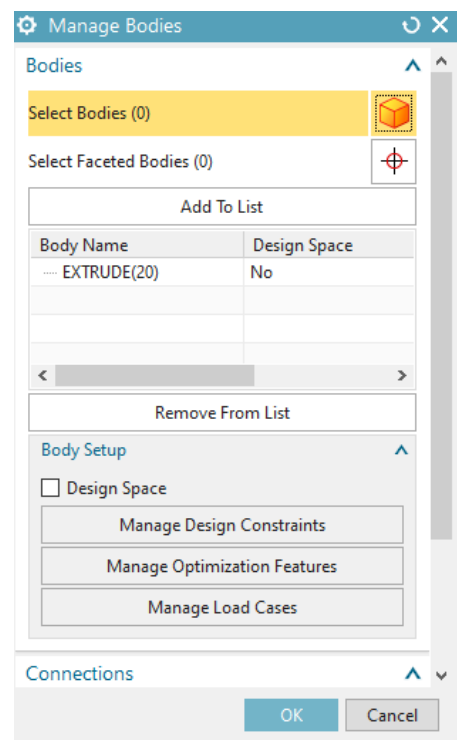


Рисунок 3.11 – Вікно “Manage Bodies” загального вигляду

Важливим кроком, без якого оптимізація неможлива, це встановлення галочки біля поля ☒ Design Space. Саме вона дає можливість обрати безпосередньо той об'єкт, який бути підлягати оптимізації. Також в цьому меню знаходяться головні функції, без яких виконання оптимізації являється неможливим. А саме “Manage Design Constraints” (управління обмеженнями по проектуванню), “Manage Optimization Features” (управління параметрами оптимізації), “Manage Load Cases” (управління випадками навантаження).

Розглянемо детальніше “Manage Design Constraints” (рис. 3.12).

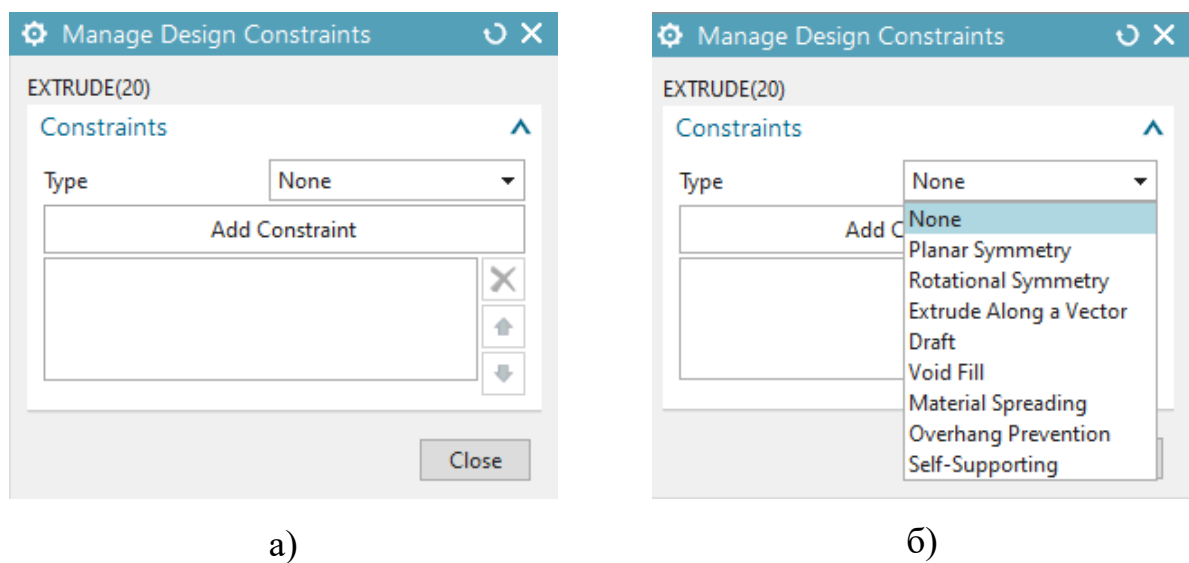


Рисунок 3.12 – Вікно управління обмеженнями по проектуванню а) в загальному вигляді, б) з усіма типами обмежень

Перелік видів обмежень:

1. Planar Symmetry (симетрія площині) потребує задання поверхні відносно якої буде будуватися симетрична частина деталі (рис. 3.13);
2. Rotational Symmetry (обертальна симетрія) потребує задання вектору навколо якого буде будуватися обертальна симетрична частина деталі та задання точки для обертання (рис. 3.14);
3. Extrude Along a Vector (витягування вздовж вектору) (рис. 3.13) потребує задання вектору вздовж якого буде витягуватися деталь, також можна витягнути її в дві сторони, якщо відмітити поле ☒ Bi-directional;

4. Draft (чернетка) при використанні обмеження чернетки оптимізатор створить топологію, яка підходить для формування, лиття або кування. Доступ до всіх поверхонь буде можливий за допомогою прямого інструменту для протягання під зазначеним кутом тяги або вище нього без будь-яких задирок.;

5. Void Fill (заповнення порожнечі) не потребує задання допоміжних параметрів, треба просто додати в перелік обмежень;

6. Material Spreading (розподіл матеріалу) (рис. 3.15) потребує задання відсоткового значення, виходячи з таких значень:

0% – Не діє

30% – Тенденція до утворення пустот в твердих областях.

60% – Конструкції близькі до тонкостінних елементів.

100% – Має тенденцію створювати конструкції, схожі на розпірки.;

7. Overhang Prevention (запобігання нависання) потребує тільки задання вектору вздовж якого нависання не повинно бути (рис. 3.13);

8. Self-Supporting (самопідтримка) потребує задання вектору та значення кута, для підтримки (рис. 3.16);

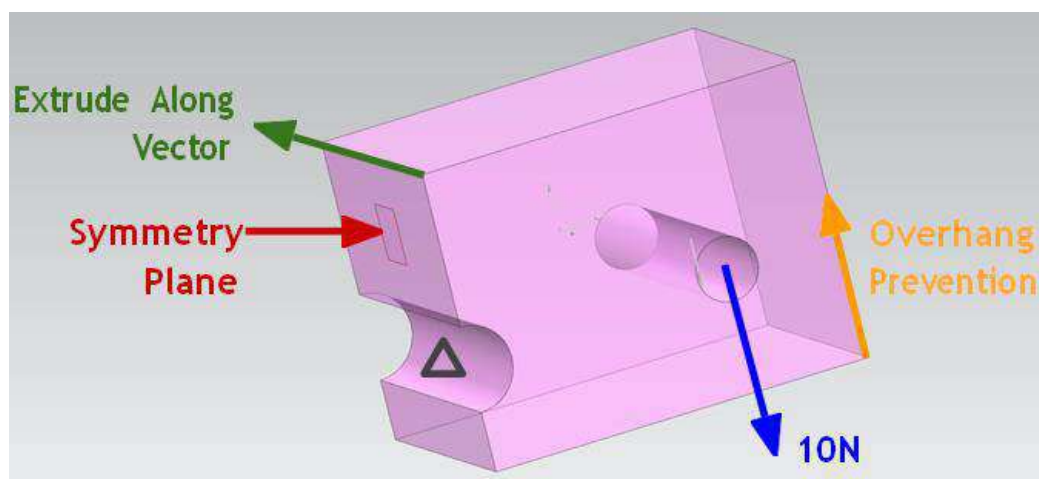


Рисунок 3.13 – Приклад зображення тіла, що буде підлягати оптимізації з заданими обмеженнями

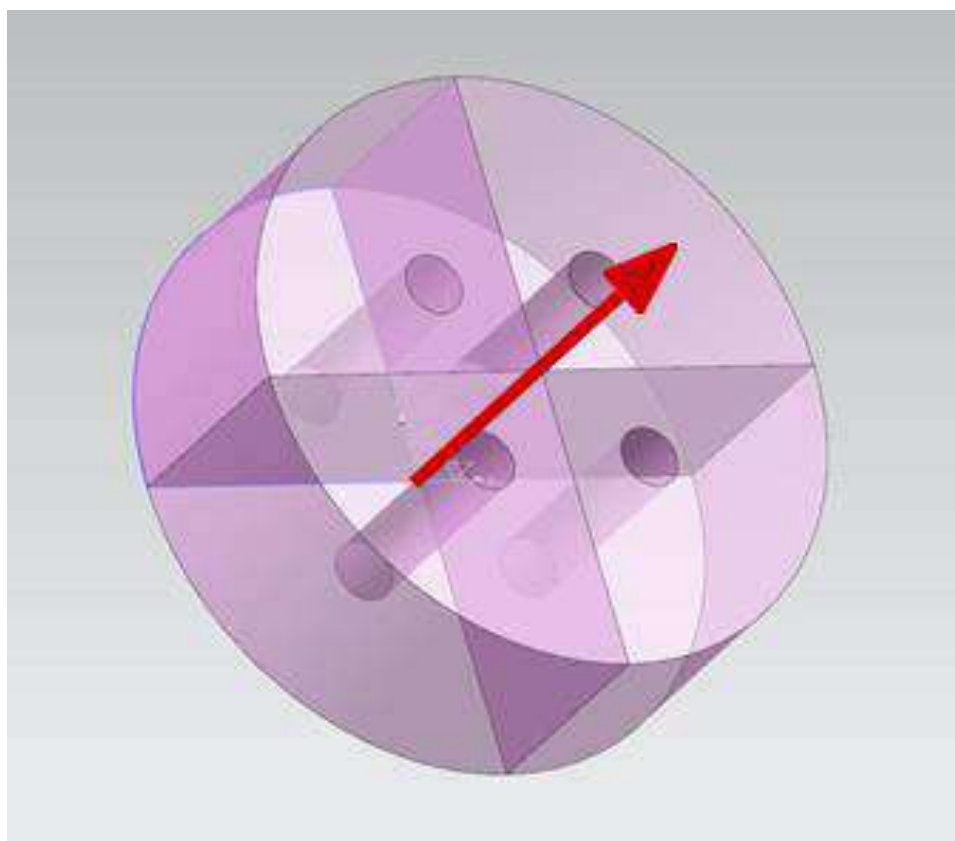


Рисунок 3.14 – Приклад зображення тіла, що буде підлягати оптимізації з обмеженням обертальної симетрії

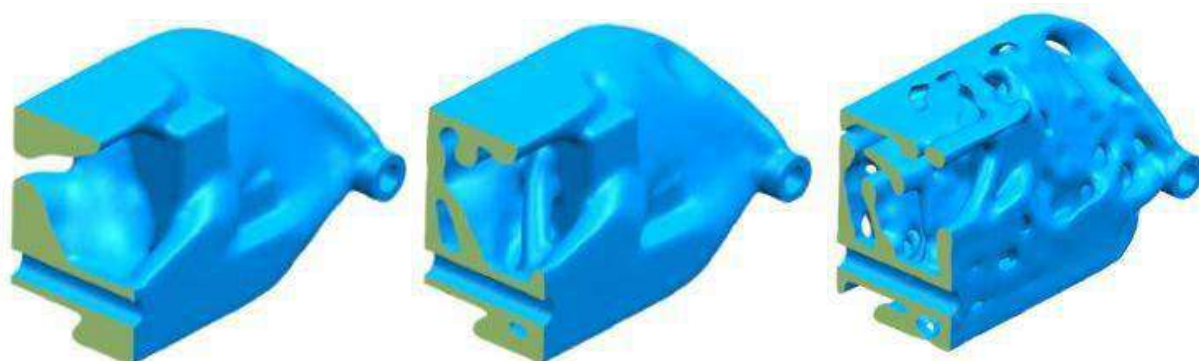


Рисунок 3.15 – Приклад зображення оптимізованого тіла з прикладеним обмеженням відповідно 0%, 30%, 100%

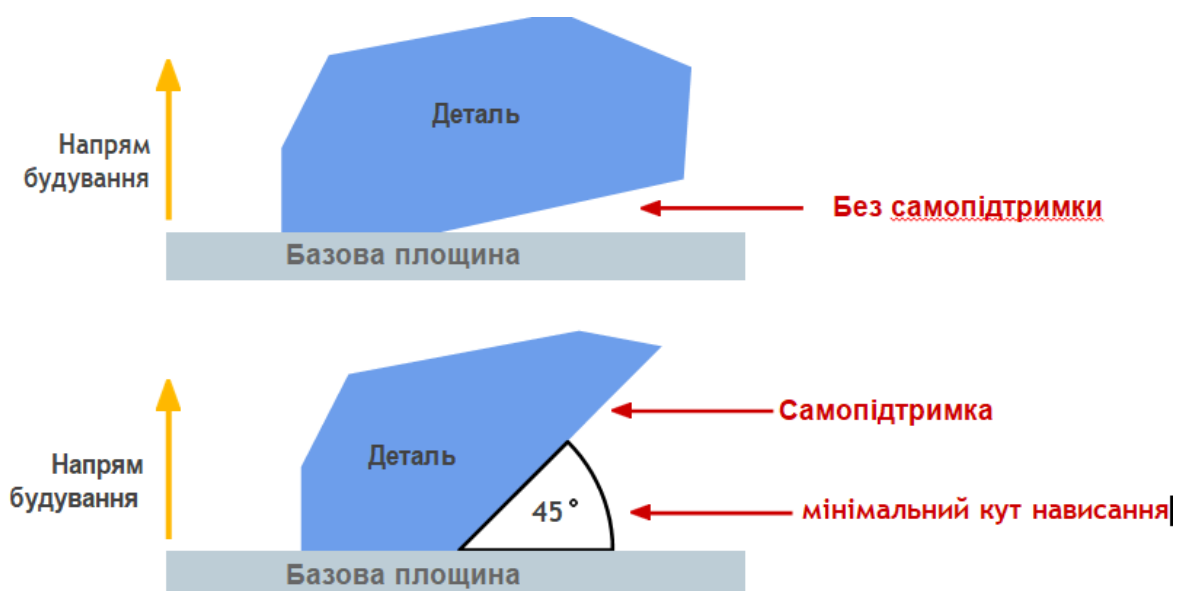


Рисунок 3.16 – Приклад-схема зображення самопідтримки

Далі після задання необхідних обмежень, можна перейти до “Manage Optimization Features” (рис. 3.17). По перше можна додати всі елементи, (а саме це елементи які вирізаються з тіла тобто отвори, кармани та інше) які підлягають застосуванню автоматично, якщо вибрати поле “Add All Auto Recognized Features”. Далі кожен елемент розглядається окремо, вибираємо в полі “Geometry”, як тримається цей елемент (наприклад якщо це отвір тримається він зсередини / keep in, з зовнішньої сторони / keep out, або це просто оболонка / shell). Обираємо “Offset Thickness” допустиму товщину зміщення при оптимізації в мм. В полі “Constraints To Ground” задаємо обмеження на основу, тобто фіксація/штифт/лінійне ковзання/площинне ковзання. Також можна вказати максимальне переміщення, на якому оптимізація відбуватися не буде, у полі “Maximum Displacement”.

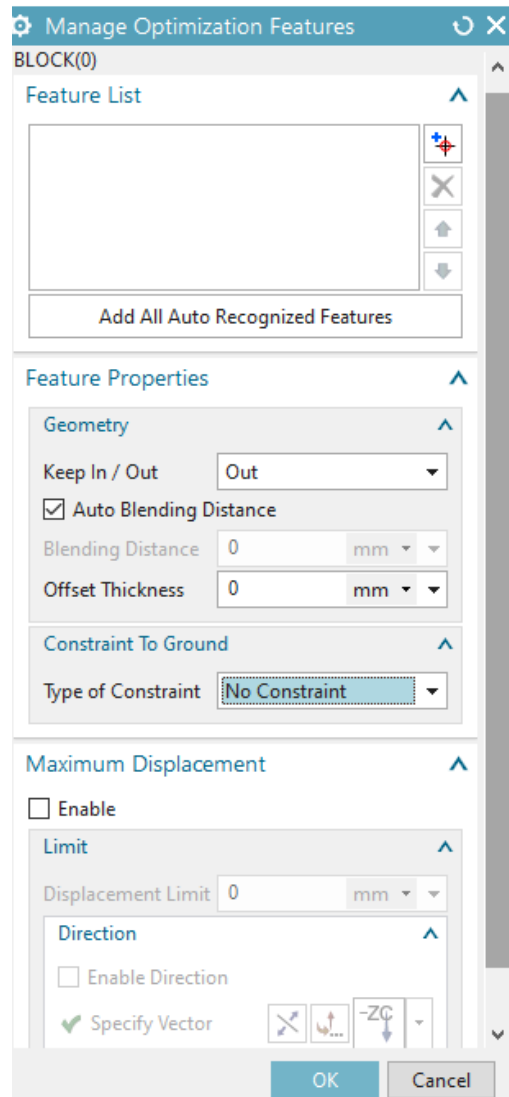


Рисунок 3.17 – Вікно “Manage Optimization Features” загального виду

Далі задаються випадки навантажень “Manage Load Cases” (рис. 3.18). Також можна додати всі елементи, (а саме це елементи які додавалися в “Manage Optimization Features”) які підлягають застосуванню автоматично за допомогою команди “Add All Auto Recognized Features”, що досить зручно, та дає змогу не додавати кожен елемент в ручному режимі. Далі обираємо тип навантаження, а саме сила/крутний момент/тиск/несуче навантаження. Після цього задаємо конкретне значення в потрібному полі, та якщо потрібно змінюємо величину виміру (Н/мН/кН/фунт-сила/кгс). Далі обираємо напрям вздовж якого буде діяти потрібна сила.

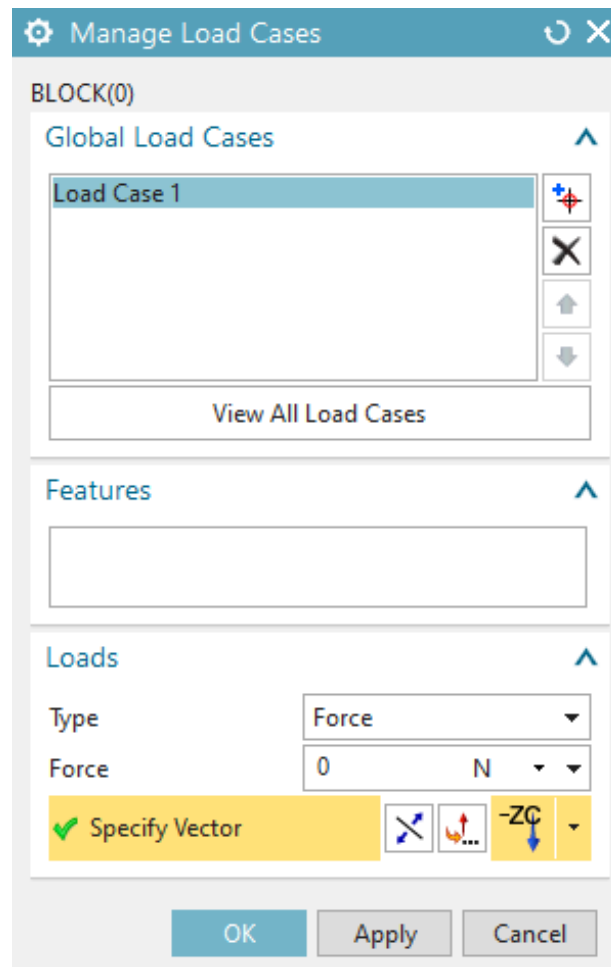


Рисунок 3.18 – Вікно “Manage Load Cases” загального виду

Також можна додати “Manage Global Load” (управління глобальними навантаженнями). Тобто задати швидкість прискорення та загальну температуру конструкції.

Після задання всіх необхідних навантажень та обмежень, наступним кроком є налаштування безпосередньо самої оптимізації у вікні “Setup Optimization” (рис. 3.19). А саме такі параметри:

- select global resolution (вибір глобального дозволу), тобто приблизний розмір кінцевих елементів. Переміщаючи повзунок вліво розмір кінцевих елементів більше та вправо відповідно менше. Від цього вибору також залежить швидкість виконання всієї оптимізації. Виявляється така залежність, чим менше розмір кінцевих елементів, тим довше буде

відбуватись сама симуляція оптимізації. Вона може тривати від трьох годин до навіть декількох днів;

- далі йде розрахунок оптимізаційних параметрів виходячи з усіх даних обмежень, навантажень та розміру кінцевих елементів. Розрахунок проводиться тільки після натискання “Estimate Optimization Parameters”;

- в полі “Design Space” знаходиться список з усіма тілами які будуть підлягати оптимізації, тобто параметри можуть бути обрані окремо для кожного;

- поле оптимізаційні параметри надається для відома про масу деталі, а саме “Approximate design space Mass” приблизна маса оптимізаційного тіла та “Minimum Mass Target” мінімальна бажана цільова маса об’єкту.

- також можна задати масу, якщо є конкретне значення, якою вона повинна бути в полі “Mass Target”.

- останнім кроком на шляху до оптимізації є натискання кнопки “Run Optimization”. Після натискання якої безпосередньо починається симуляція оптимізації.

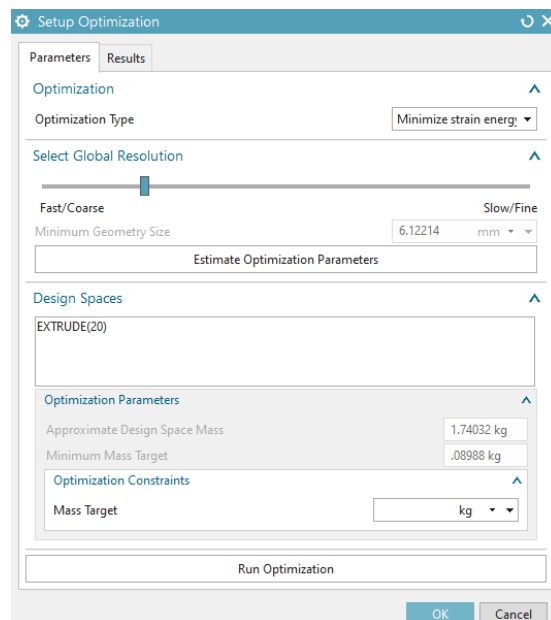


Рисунок 3.19 - Вікно “Setup Optimization” загального виду

Після оптимізації у вікні “Setup Optimization” в розділі результати можна побачити графічний та чисельні результати. Графічний це діаграма конвергенції (рис. 3.20), тобто графік ходу оптимізації. Кожна вертикальна смуга являє собою ітерацію в процесі проектування. Висота смуги відображає збіжність до оптимального дизайну, заснованого на зміні форми в порівнянні з попередніми ітераціями. Два етапи поступово підвищують чіткість результатів топології, створюючи більш тонкі деталі і більш точні кінцеві елементи з плином часу.

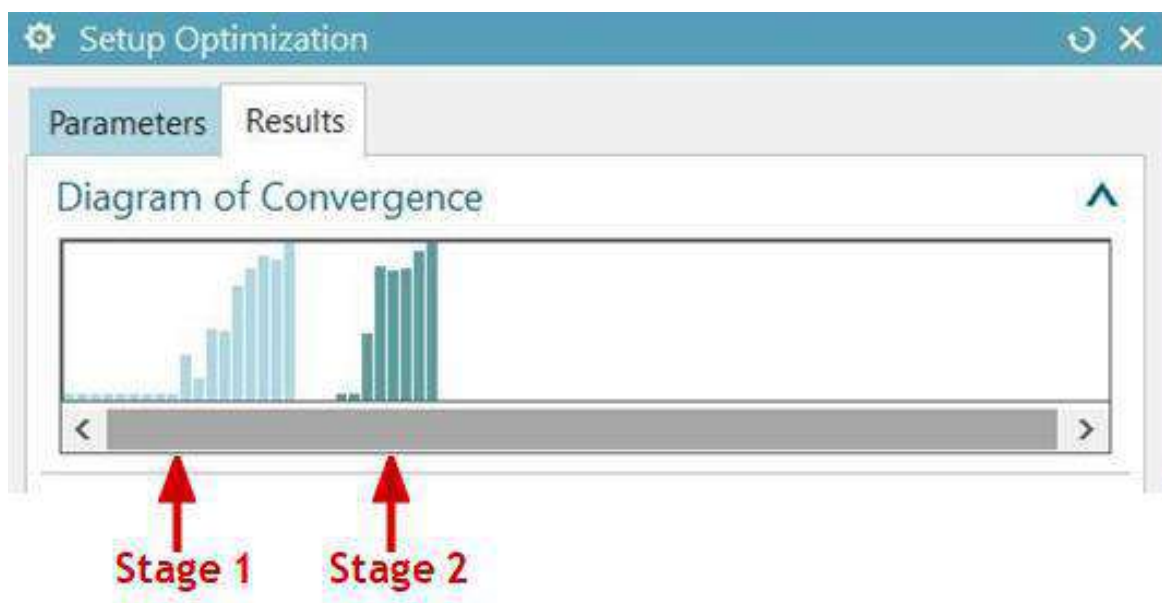


Рисунок 3.20 – Зображення діаграми конвергенції

Чисельні результати – це максимальні величини переміщення та напруження, вага деталі, відсоткове значення ваги деталі в порівнянні зі звичайною деталлю та кількість часу за який виконувалася топологічна оптимізація (рис. 3.21).

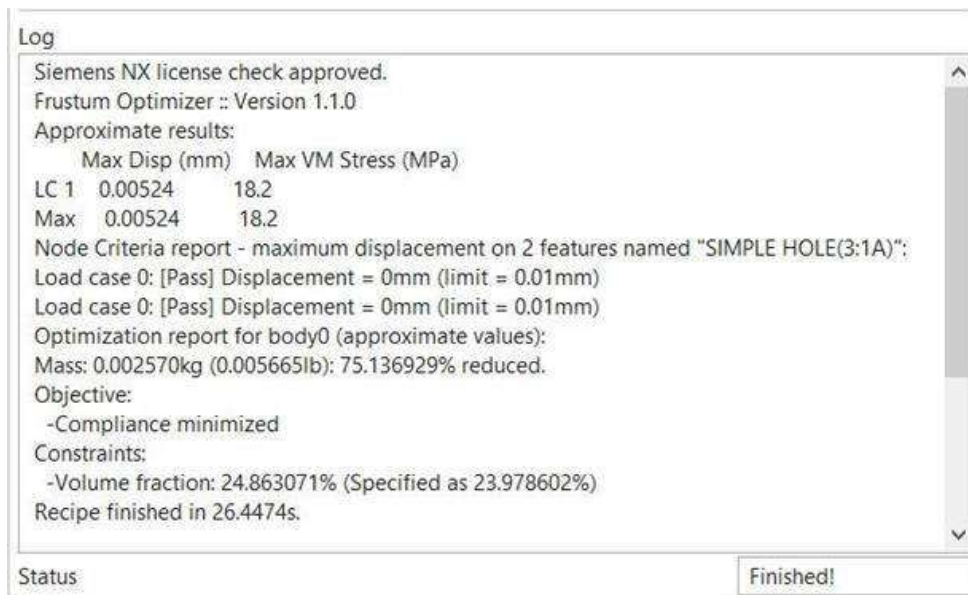


Рисунок 3.21 – Зображення чисельних результатів оптимізації

3.3 Комп'ютерне забезпечення адитивного виробництва в модулі additive manufacturing

В даній науково-дослідній роботі для 3D друку використовується модуль Prusa Slicer 2.1.0. Цей модуль відрізняється від інших міццю і універсальністю, хоча деякі функції дійсно складні у використанні. Засновники даного модулю на сьогоднішній день намагаються зробити інтерфейс користувача зрозумілим і простим у використанні. А саме було впроваджено декілька режимів для використання даного модулю:

- простий;
- розширений;
- експертний.

В роботі був використаний простий режим, який призначений для користувача, котрий не має досвіду в роботі з подібним програмним забезпеченням. Користувачеві відкритий тільки базовий набір параметрів в інтерфейсі (рис. 3.22).



Рисунок 3.22 – Інтерфейс програмного забезпечення для адитивного виробництва «Prusa Slicer 2.1.0» в простому режимі

Prusa Slicer дозволяє навіть починаючому користувачеві друкувати досить складну геометрію прямо з 3D моделі. Використовуючи автоматичну генерацію підтримки, було побудовано модель, придатну до друку(рис. 3.23). Наповненість матеріалом всередині деталі була визначена 20%. Зроблено це задля покращення міцності, а не з ціллю економії матеріалу або часу.

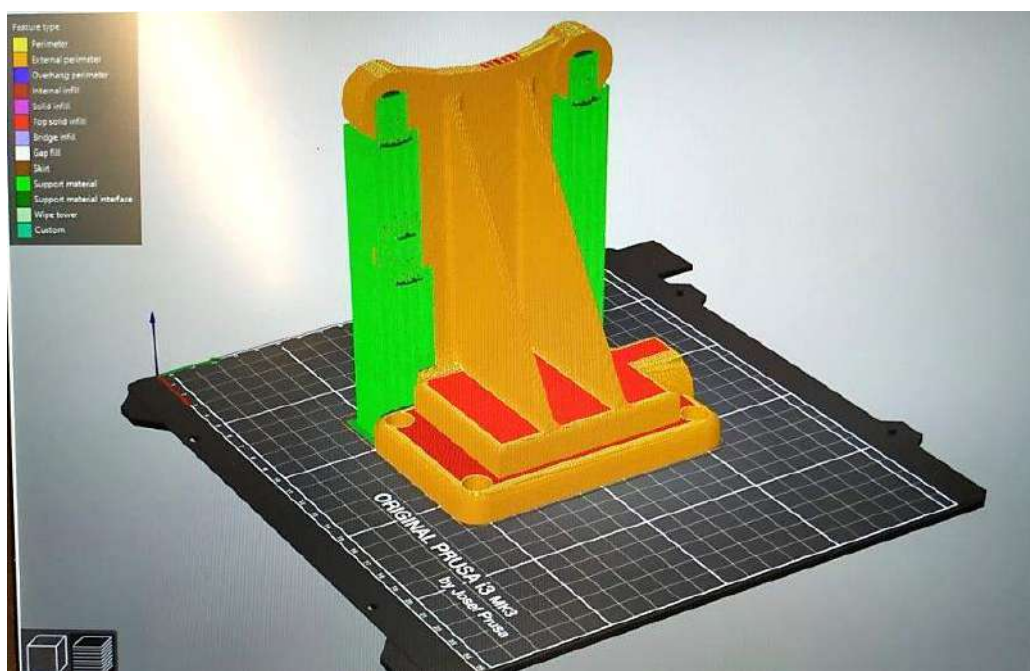


Рисунок 3.23 - 3D модель деталі з підтримками, готовими до друку

Приблизний час на друк деталі 17,5 год. Принтер не вимагає постійної уваги та контролю. Щоб переконатися у заданні правильних до друку параметрів потрібно було почекати доки почнеться друкування перших шарів (рис 3.24, 3.25). Взагалі частіше всього стіл принтера змащують клеєм, щоб перший шар щільно до нього прилягав, та не відірвався з позначеної поверхні. Але з принтером Prusa Slicer, дана проблема не зустрічається, тому деталь «кронштейн» друкувалася без змащення клеєм.

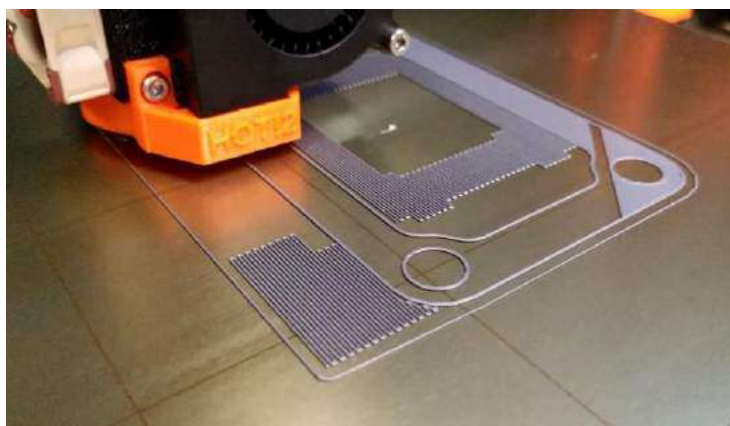


Рисунок 3.24 – Зображення надрукованого першого шару деталі
«кронштейн»

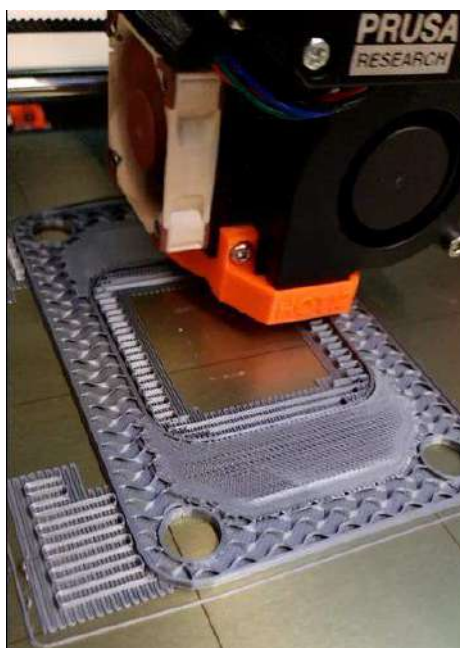


Рисунок 3.25 – Зображення надрукованого восьмого шару деталі
«кронштейн»

Через даний час деталь була надрукована, позбавившись від підтримок, було отримано готовий продукт (рис. 3.26). Взагалі від підтримок позбавитися не складає ніяких труднощів, вони прибираються просто руками, без допомоги сторонніх предметів. Але через особливості друку 3D принтера Prusa Slicer, в 3х отворах $\varnothing 13$ підтримки було витягти складно. Тому деякі частки підтримок залишилися всередині отворів.

Звичайно це є недоліком, але не настільки суттєвим, щоб не використовувати даний принтер взагалі. Ці частки можна вийняти за допомогою додаткового обладнання. Та робити це потрібно доволі обережно, щоб не пошкодити цілісність конструкції.



Рисунок 3.26 – Надрукована деталь «кронштейн» в реальному розмірі

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ «КРОНШТЕЙН» ОПТИМІЗОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

4.1 Топологічна оптимізація існуючої деталі «кронштейн» в модулі NX Topology Optimization

Деталь, що буде підлягати оптимізації – це «Кронштейн» (рис. 4.1).

Кронштейн - консольна деталь або конструкція, яка служить для кріплення на вертикальній площині виступаючих або висунутих в горизонтальному напрямку частин машин або споруд. Механічний принцип дії - опір матеріалу на вигин.

Кронштейн в техніці використовується в основному для поєднання деталей і вузлів машин і пристроїв під прямим кутом.

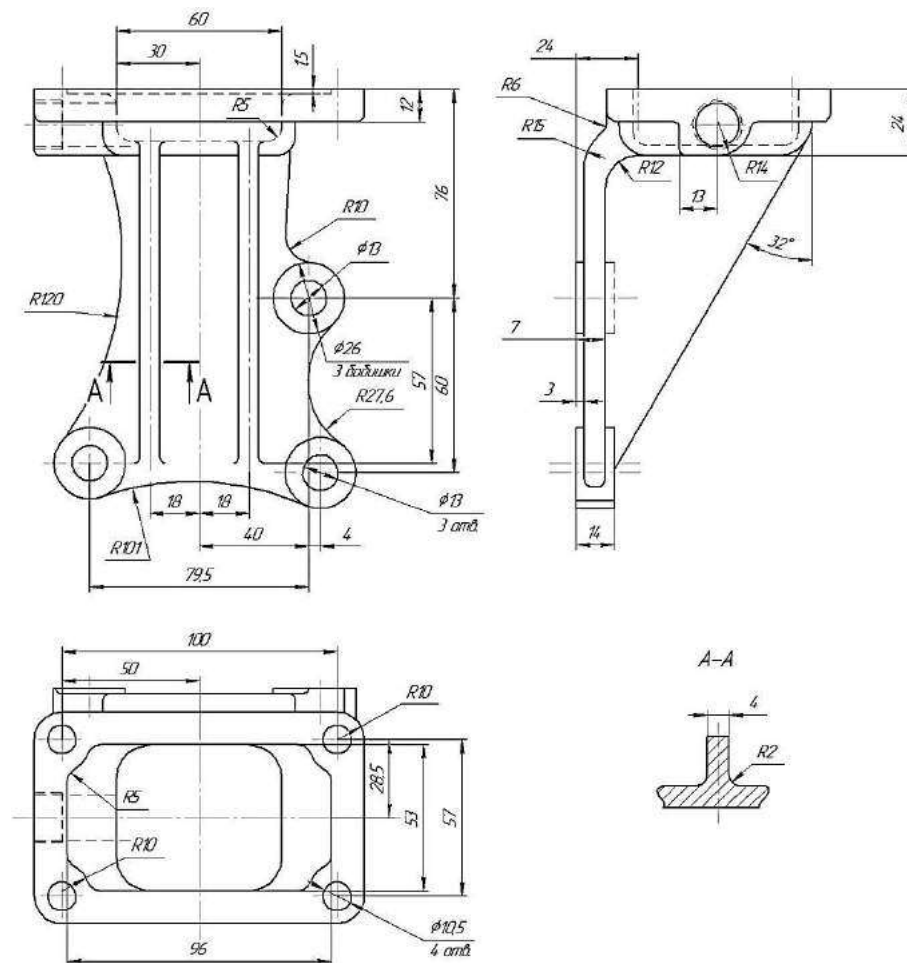


Рисунок 4.1 – Зображення деталі «Кронштейн»

Головною особливістю деталі є витримування заданих навантажень при максимально низькій вазі, що зменшить вагу безпосередньо самої конструкції. Матеріал деталі сталь 40Х.

Використовуючи модуль NX Topology Optimization, була проведена топологічна оптимізація, виходячи з таких обмежень:

1. Обмеження проектування – запобігання написання у напрямку $-Z$.
2. Параметри оптимізації:
 - закріплення деталі за $\varnothing 15$ та $\varnothing 16$ мм (бокові отвори),
 - штифтове закріплення за 3ма отворами $\varnothing 13$ мм та обмеженням за товщиною стінок 0,3 мм;
3. Випадки навантаження - сила 100 Н на 4 отвори $\varnothing 10,5$ мм у напрямку $-Z$.

Далі була обрана Приблизна цільова маса виробу – це 1кг та проведена оптимізація. Отримані результати попередньої топологічної оптимізації. Вага звичайної деталі становить 1,59 кг (рис. 4.2 а) та оптимізованої 1 кг (рис. 4.2 б). Об'єм використаного матеріалу знизився на 62 %.

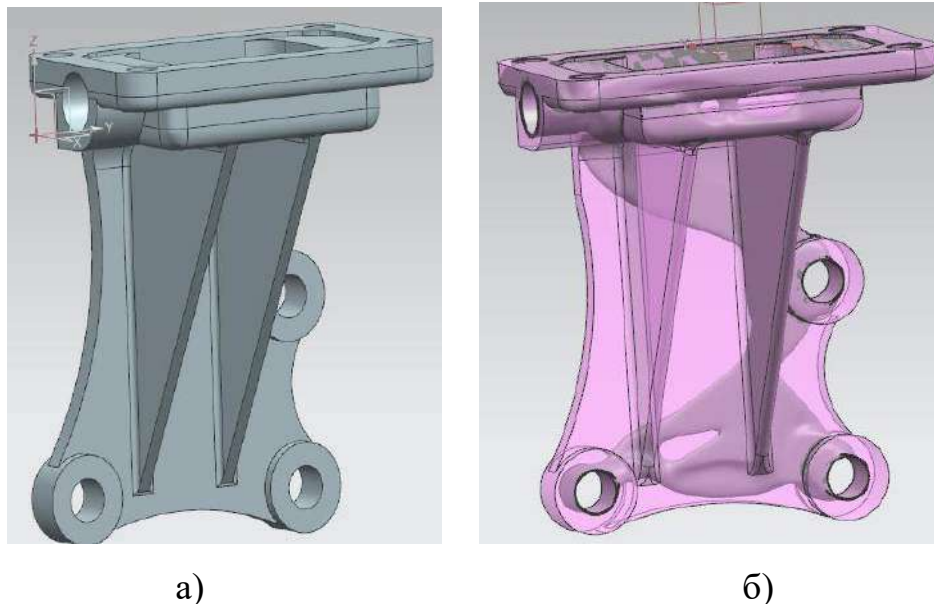


Рисунок 4.2 - 3D модель а) – звичайної деталі та б) – оптимізованої (перша ітерація)

Можна спостерігати, що результати першої оптимізації були незадовільними. Надто тонкі стінки отворів, відсутнє ребро жорсткості і взагалі деталь не придатна для використання, хоча і має наступні значення максимального навантаження та переміщення (рис. 4.3): $\sigma_{\max} = 9,123 \text{ МПа}$ та $\Delta_{\max} = 0,0067 \text{ мм}$.

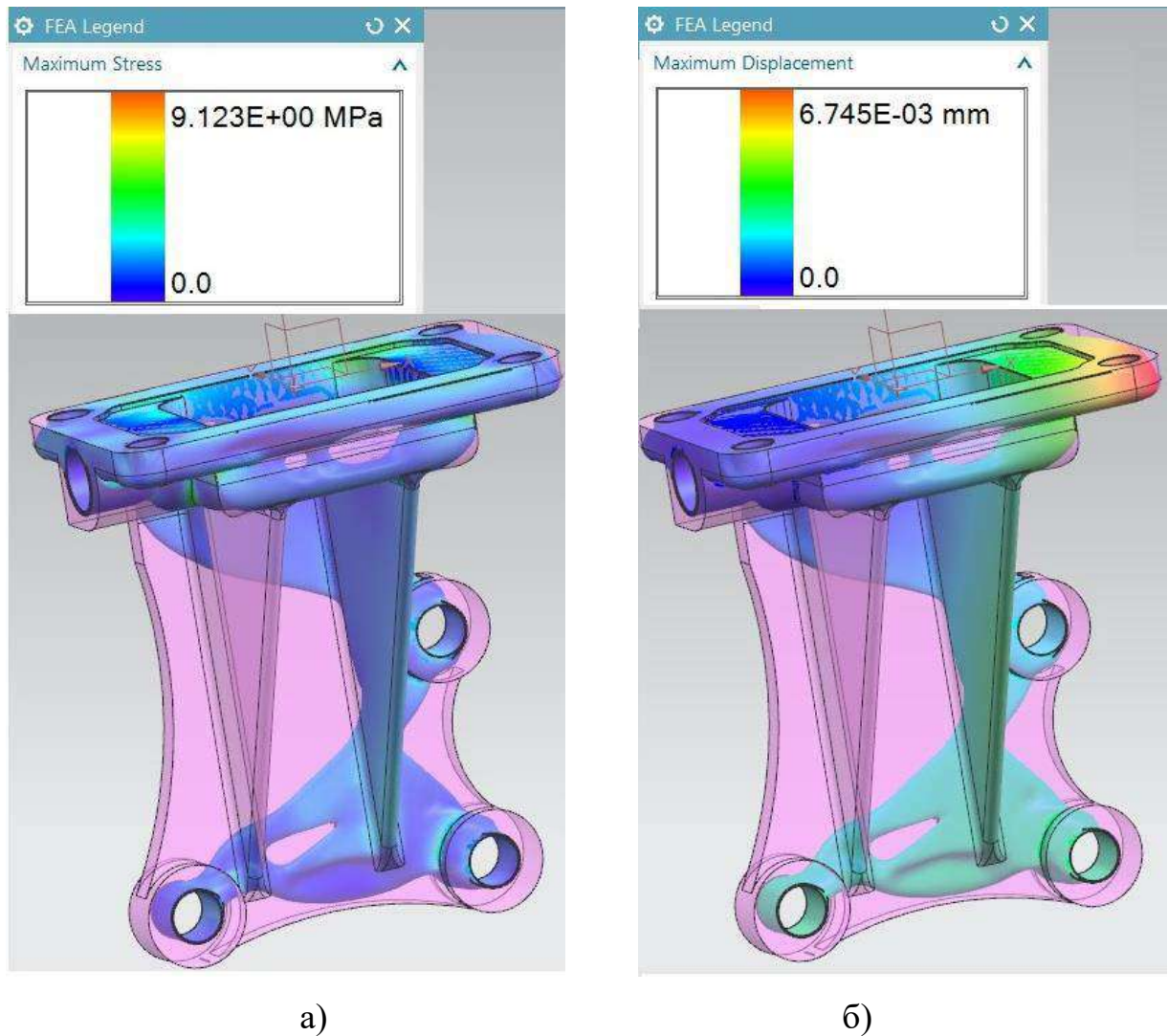


Рисунок 4.3 - 3D модель оптимізованої деталі перша ітерація
а) – максимальне напруження, б) – максимальне переміщення

В наступному випадку змінювалися одночасно декілька параметрів, для отримання інших результатів:

1. Обмеження проектування – розподіл матеріалу – 50%.
2. Параметри оптимізації:

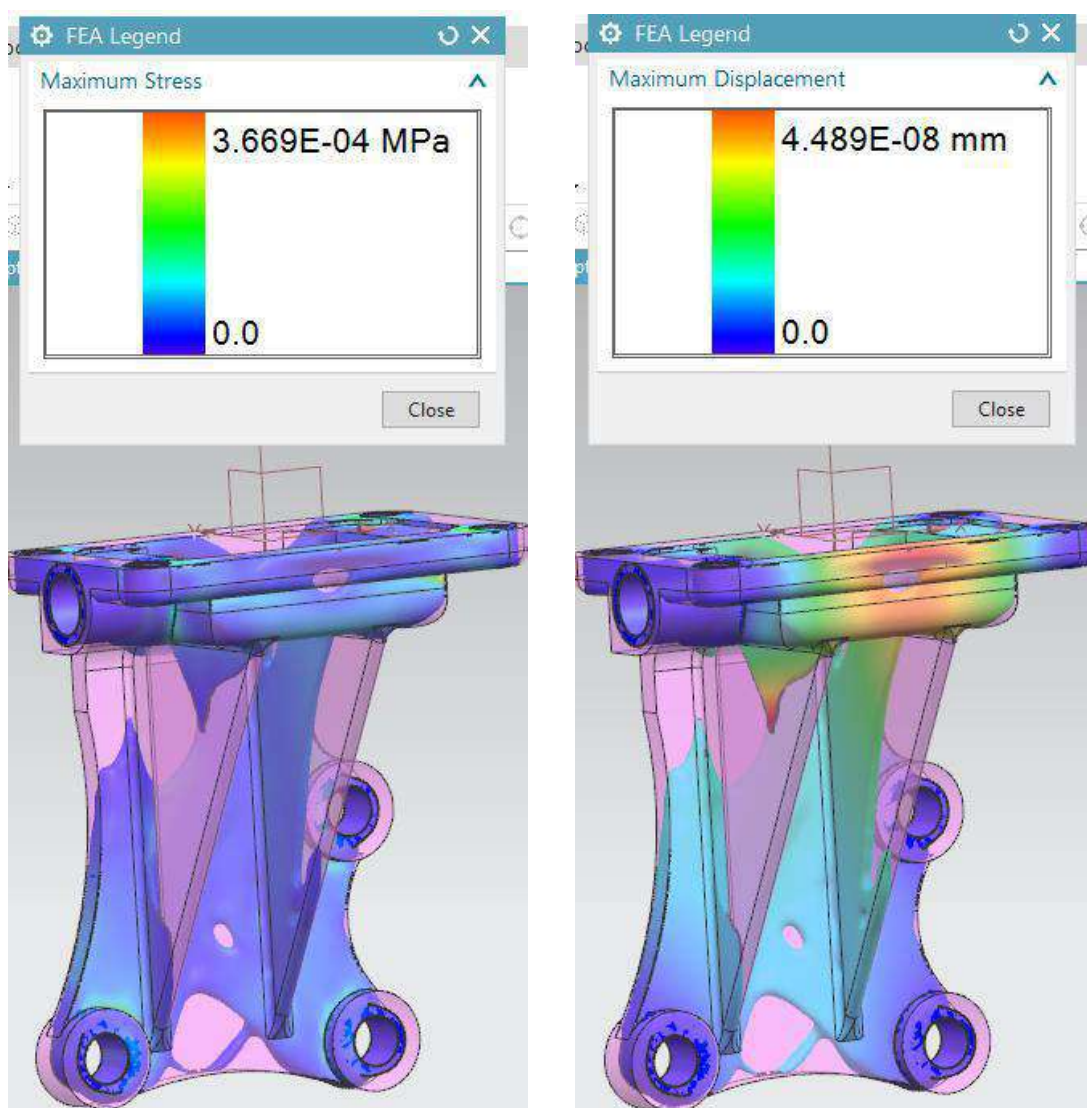
- закріплення деталі за $\varnothing 15$ та $\varnothing 16$ мм (бокові отвори), за 3 - ма отворами $\varnothing 13$ мм та 4 - ма отворами $\varnothing 10,5$ мм.

Без жодних навантажень.

Далі була обрана Приблизна цільова маса виробу – це 1 кг та проведена оптимізація. Тобто в порівнянні зі звичайною деталлю (рис. 4.2 а), об'єм матеріалу оптимізованої деталі (рис. 4.4) також знизився на 62 %. Деталь має наступні значення максимального навантаження та переміщення (рис. 4.3): $\sigma_{\max} = 0,00037$ МПа та $\Delta_{\max} = 0,45$ нм.



Рисунок 4.4 - 3D модель оптимізованої деталі після другої ітерації



а)

б)

Рисунок 4.5 - 3D модель оптимізованої деталі після другої ітерації

а – максимальне напруження, б – максимальне переміщення

З вище наведених результатів, був зроблений висновок, що обмеження були встановлені не належним чином. Тому переглянувши всі параметри оптимізації були встановлені нові значення та обмеження. Та для перевірки була встановлена максимальна вага оптимізованої деталі, а саме 1,5 кг.

1. Обмеження проектування – запобігання написання у напрямку – Z.
2. Параметри оптимізації:
 - закріплення деталі за $\varnothing 15$ та $\varnothing 16$ мм (бокові отвори);

- штирьове закріплення за 3ма отворами $\varnothing 13$ мм та обмеженням за товщиною стінок 4 мм.

3. Випадки навантаження - сила 100Н на 4 отвори $\varnothing 10,5$ у напрямку – Z.

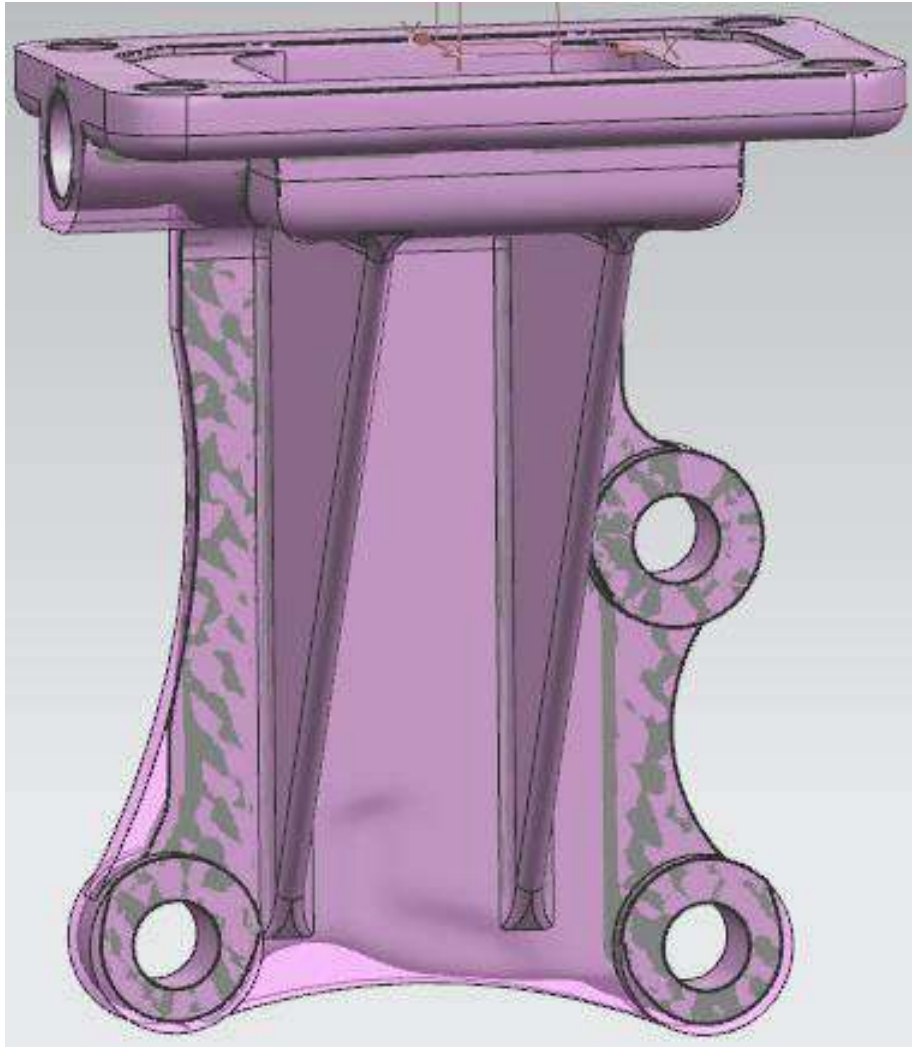


Рисунок 4.6 - 3D модель оптимізованої деталі після третьої ітерації

З наведеної 3D моделі оптимізованої деталі (рис. 4.6) можна зробити висновок, що в цілому деталь придатна для застосування. Та в порівнянні зі звичайною деталлю (рис. 4.2 а), об'єм матеріалу оптимізованої деталі (рис. 4.6) знизився на 5 %. Та нажаль такий незначний відсоток зменшення об'єму матеріалу оптимізованої деталі, говорить про те, що таку деталь зовсім недоцільно виготовляти за допомогою адитивного виробництва. Тому, що вона не виправдовуватиме своїх затрат. Деталь має наступні значення

максимального навантаження та переміщення (рис. 4.7): $\sigma_{\max} = 8,959 \text{ МПа}$ та $\Delta_{\max} = 0,00592 \text{ м}$.

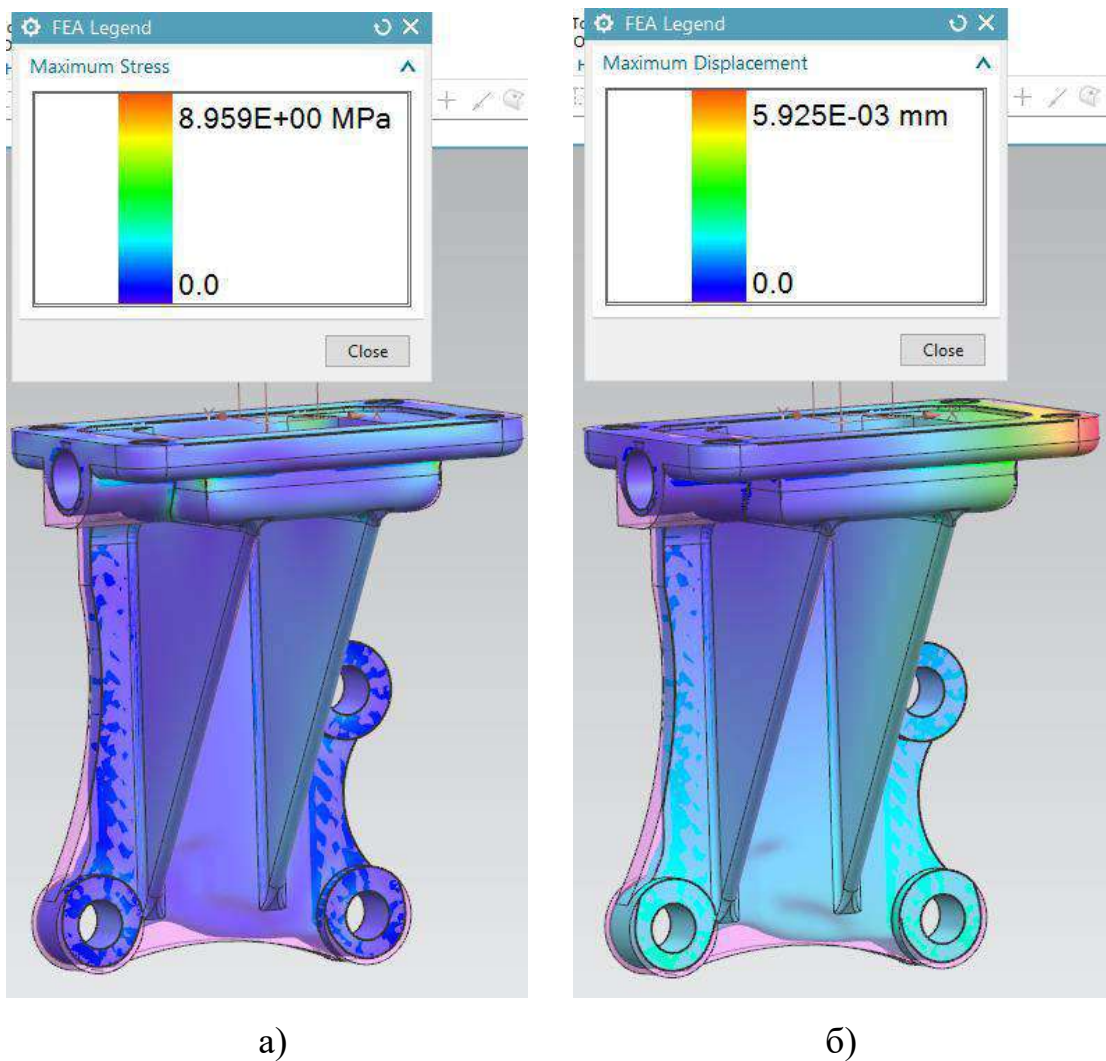


Рисунок 4.7 - 3D модель оптимізованої деталі після третьої ітерації:

а – максимальне напруження, б – максимальне переміщення

Наступна оптимізація проводилася з такими параметрами:

1. Обмеження проектування – запобігання написання у напрямку – Z.
2. Параметри оптимізації:
 - закріплення деталі за $\varnothing 15$ та $\varnothing 16$ мм (бокові отвори);
 - штирьове закріплення за 3 - ма отворами $\varnothing 13$ мм та обмеженням за товщиною стінок 2,5 мм;

3. Випадки навантаження - сила 100Н на 4 отвори $\varnothing 10,5$ мм у напрямку – Z та 10 Н на 3 отв. $\varnothing 13$ мм у напрямку – Y.

Приблизна цільова маса виробу 1,2 кг (рис. 4.8).

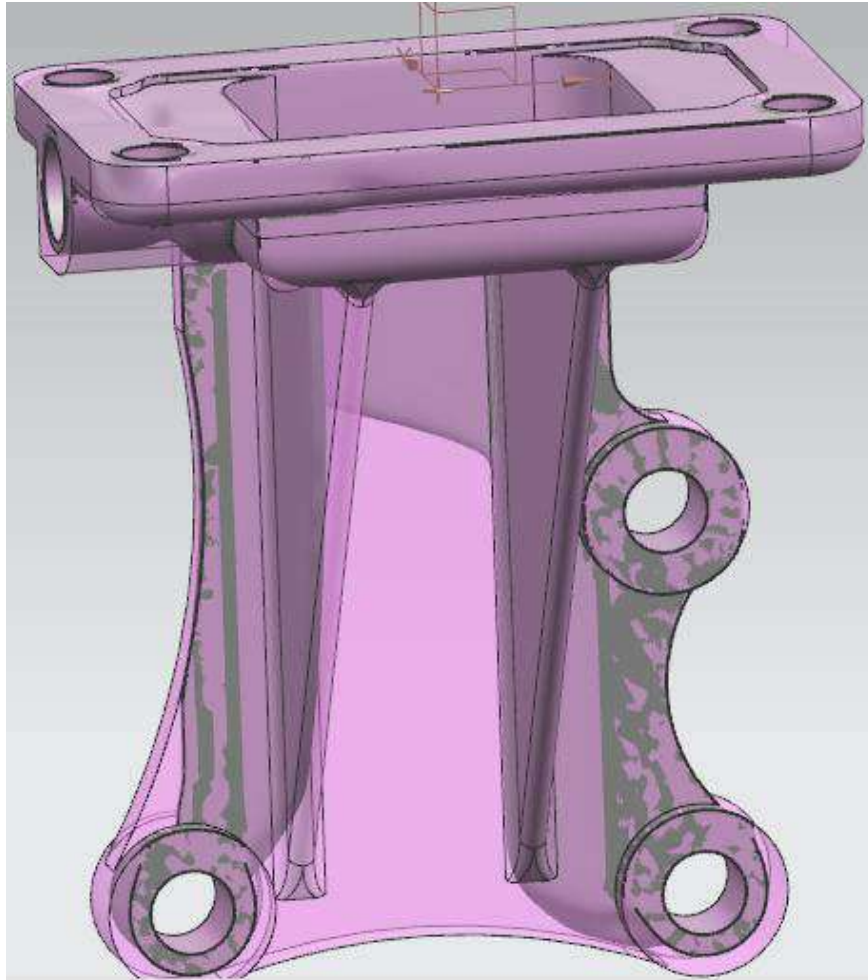


Рисунок 4.8 - 3D модель оптимізованої деталі після четвертої ітерації

Можна спостерігати, що наведена 3D модель оптимізованої деталі (рис. 4.8) все ж таки має конструктивні недоліки, у вигляді неповного ребра жорсткості та нетехнологічних переходів від основного об'єму деталі до отворів $\varnothing 13$ мм.. Зменшення об'єму оптимізованої деталі в порівнянні зі звичайною становить 24,5 %. Така деталь не задовольнятиме виробництво. Тому пошуки найкращих оптимізаційних параметрів тривають. Деталь має наступні значення максимального навантаження та переміщення (рис. 4.9): $\sigma_{\max} = 9,066$ МПа та $\Delta_{\max} = 0,00656$ м.

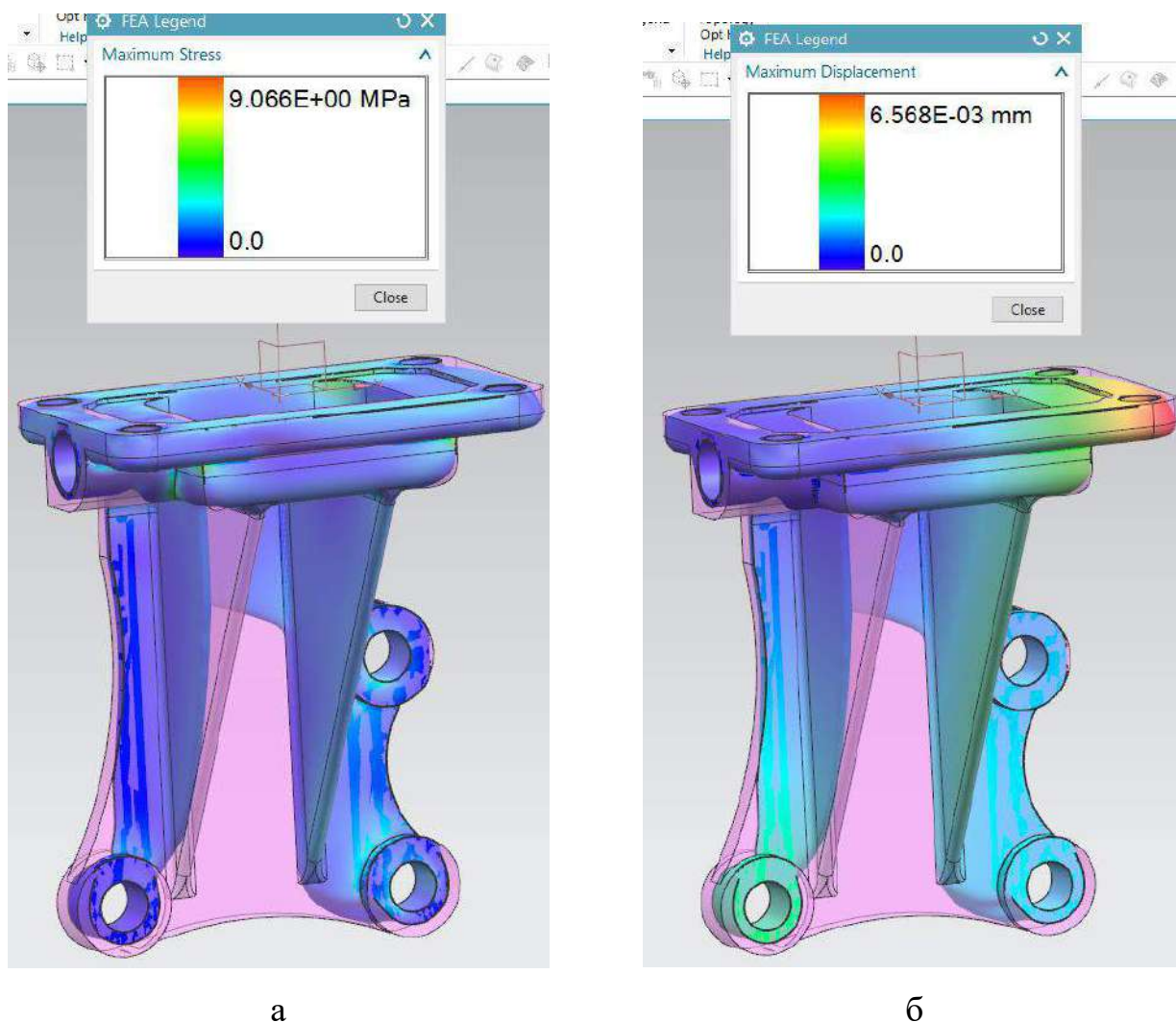


Рисунок 4.9 - 3D модель оптимізованої деталі після четвертої ітерації:

а – максимальне напруження, б – максимальне переміщення

Наступна оптимізація проводилася з такими параметрами:

1. Обмеження проектування – запобігання написання у напрямку – Z.
 2. Параметри оптимізації:
 - закріплення деталі за $\varnothing 15$ та $\varnothing 16$ мм (бокові отвори),
 - штирьове закріплення за 3 - ма отворами $\varnothing 13$ мм та обмеженням за товщиною стінок 2,5 мм;
 - вказана товщина стінок 2мм для 4 - х отворів $\varnothing 10,5$.
 3. Випадки навантаження - сила 100 Н на 4 отвори $\varnothing 10,5$ мм у напрямку – Z та 1000 Н на 3 отв. $\varnothing 13$ мм у напрямку –Y.
- Приблизна цільова маса виробу 1,3 кг (рис. 4.10).

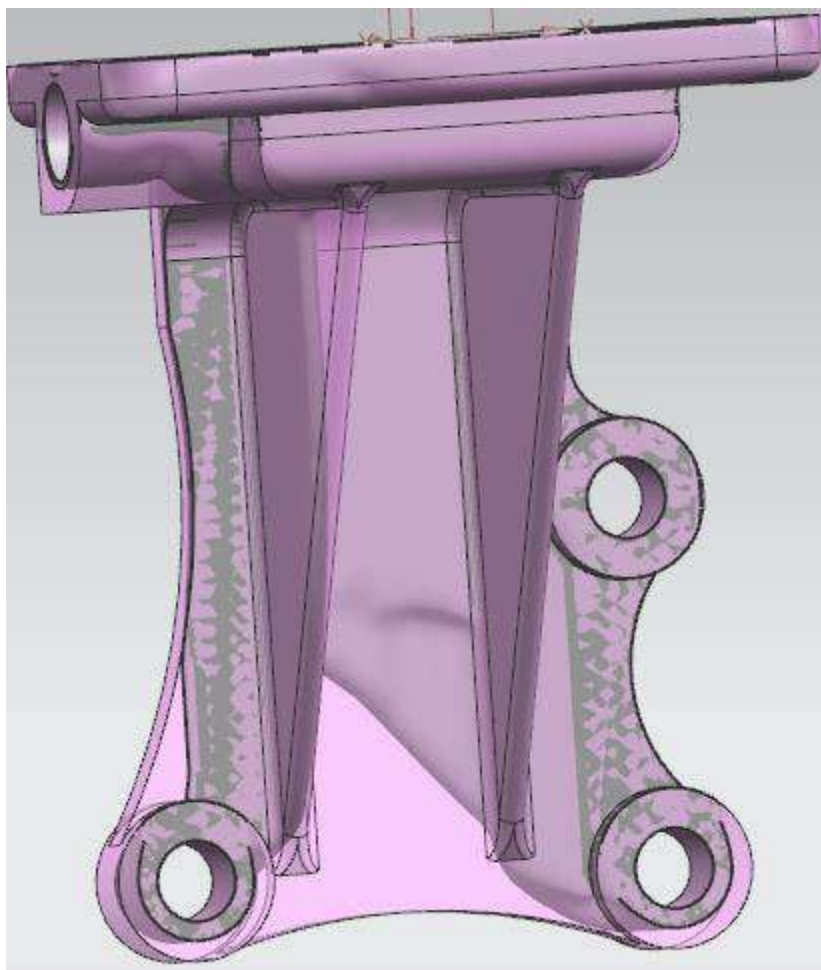


Рисунок 4.10 - 3D модель оптимізованої після п'ятої ітерації деталі

З наведеного результату топологічної оптимізації можна зробити висновок, що наведена 3D модель оптимізованої деталі (рис. 4.10), як і попередня (рис. 4.8) також має конструктивні недоліки, у вигляді неповного ребра жорсткості та нетехнологічних переходів від основного об'єму деталі до отворів $\varnothing 13$ мм. Зменшення об'єму оптимізованої деталі в порівнянні зі звичайною становить 9,5 %. Така деталь не задовольнятиме виробництво. Тому пошуки найкращих оптимізаційних параметрів тривають. Деталь має наступні значення максимального навантаження та переміщення (рис. 4.11): $\sigma_{\max} = 7,601$ МПа та $\Delta_{\max} = 0,00621$ м.

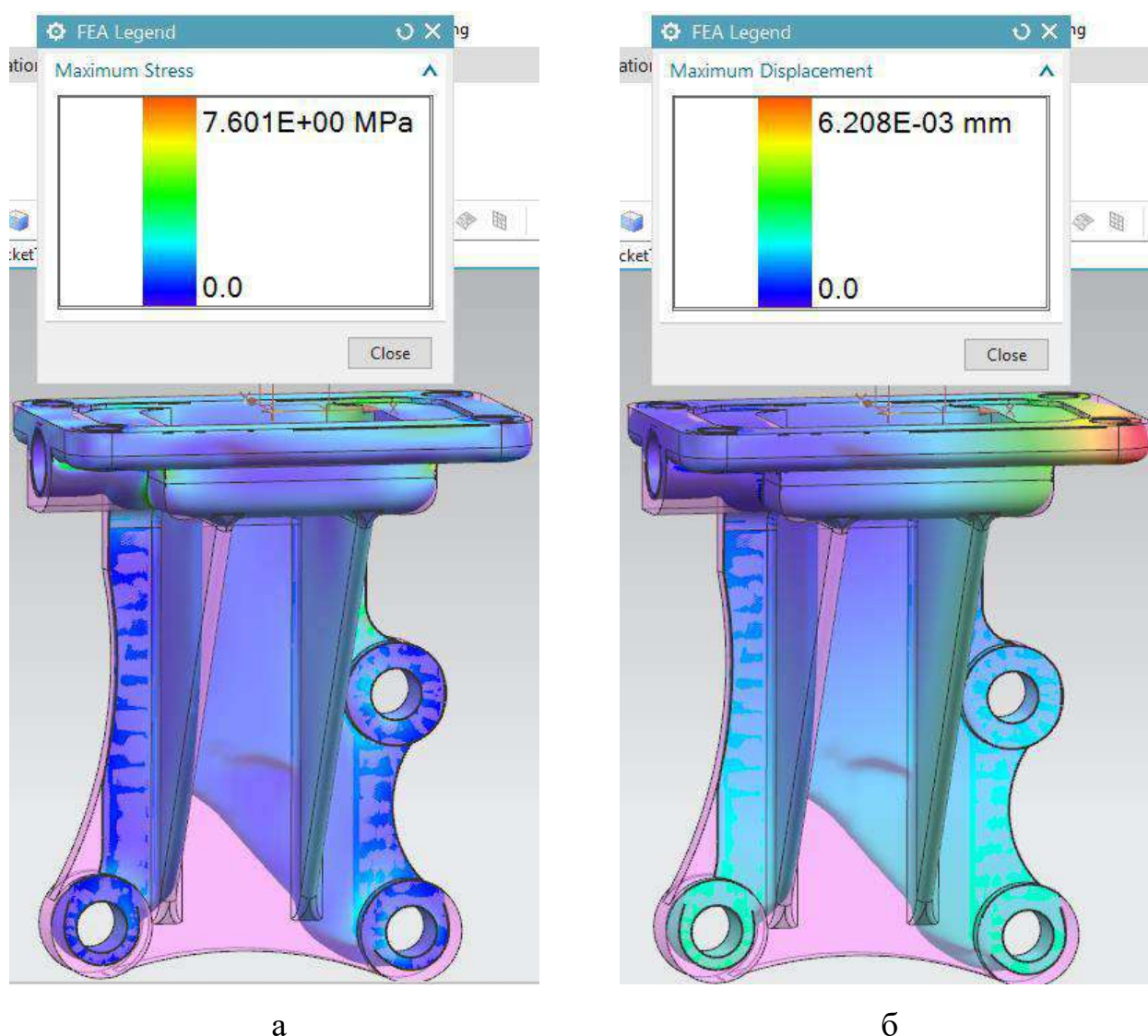
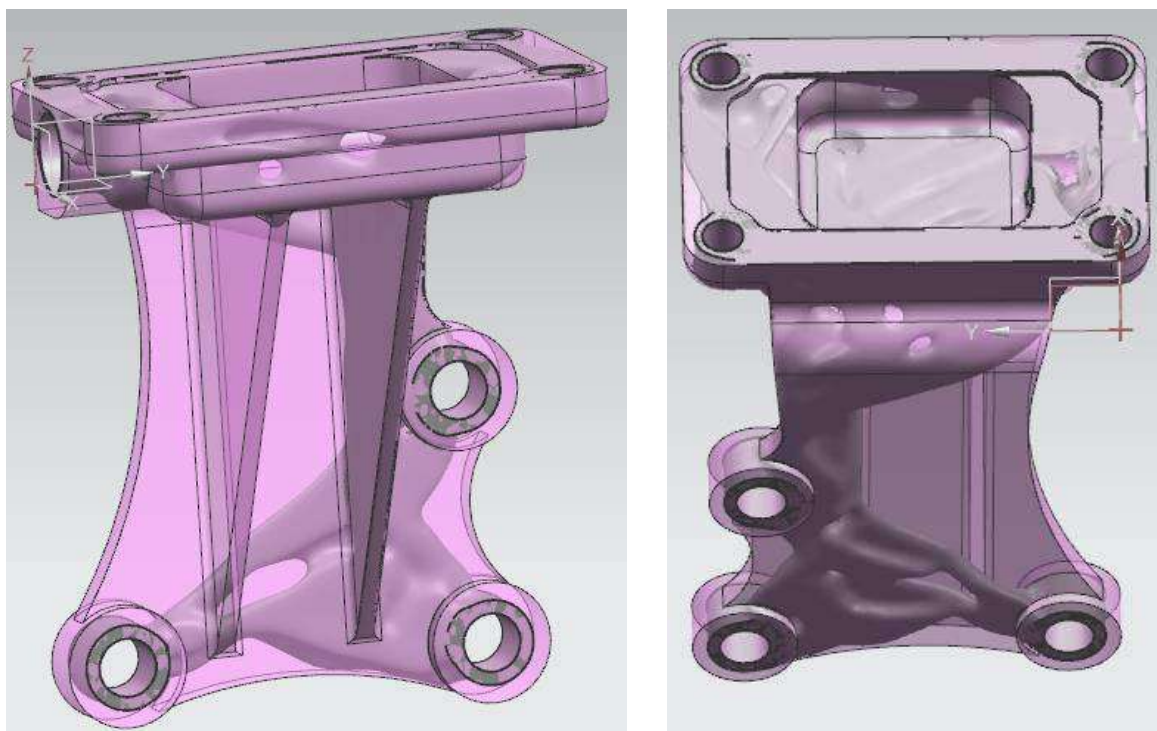


Рисунок 4.11 - 3D модель оптимізованої деталі після п'ятої ітерації
 а – максимальне напруження; б – максимальне переміщення

Наступна оптимізація проводилася виходячи з таких параметрів:

1. Обмеження проектування – розподіл матеріалу 75 %.
2. Параметри оптимізації:
 - закріплення деталі за $\varnothing 15$ та $\varnothing 16$ мм (бокові отвори);
 - закріплення за 3ма отворами $\varnothing 13$ мм та обмеженням за товщиною стінок 3 мм;
 - вказана товщина стінок 2мм для 4х отворів $\varnothing 10,5$.
3. Випадки навантаження - сила 1000 Н на 4 отвори $\varnothing 10,5$ мм у напрямку – Z.

Приблизна цільова маса виробу 0,9 кг (рис. 4.12).



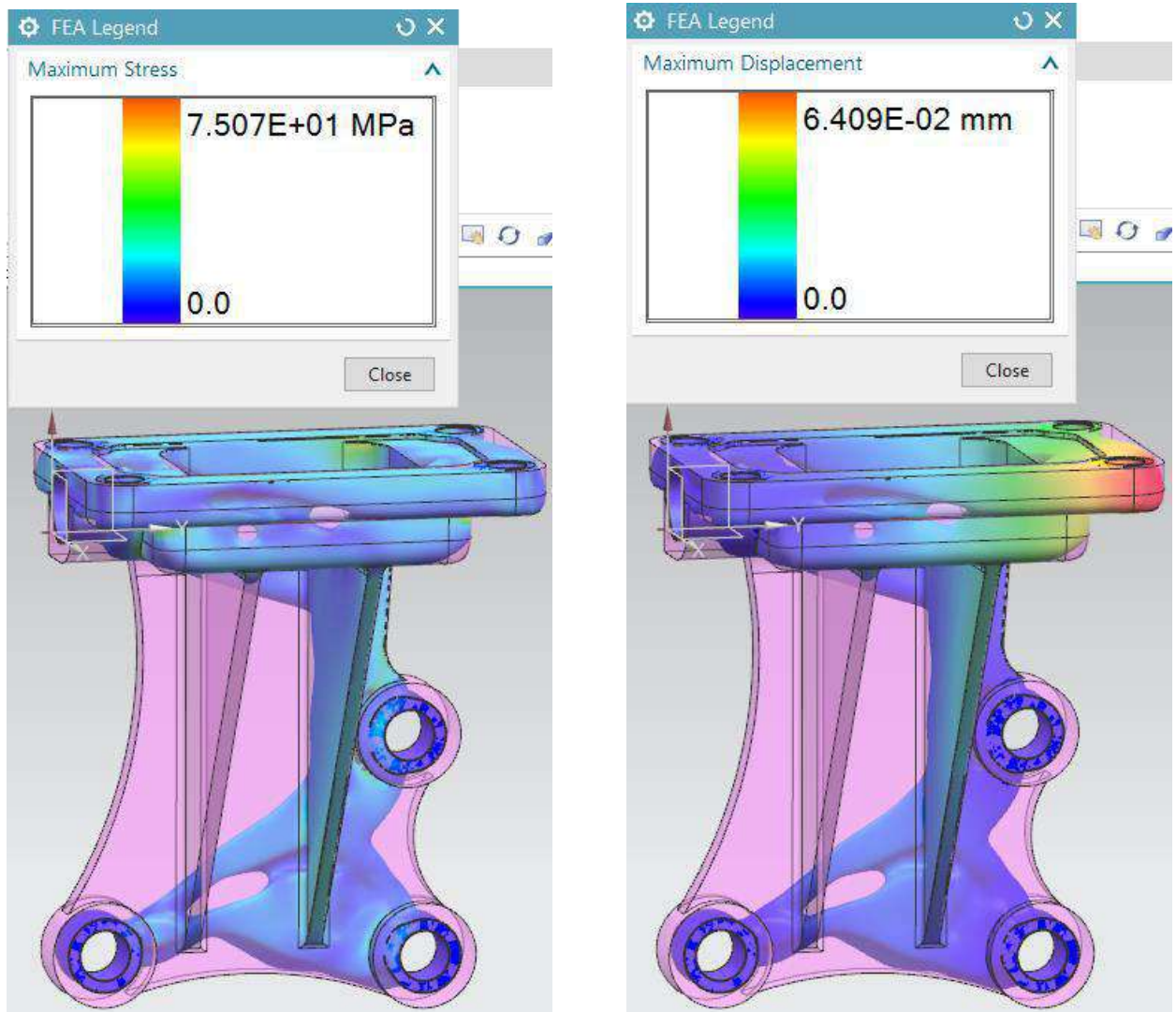
а

б

Рисунок 4.12 - 3D модель оптимізованої після шостої ітерації деталі:

а - спереду, б - ззаду

З вище наведеного результату топологічної оптимізації можна зробити висновок, що наведена 3D модель оптимізованої деталі (рис. 4.12) зовсім не задовольняє вимогам технологічності. Дана модель втратила майже всі конструктивно необхідні особливості. А саме безліч порожнин в верхній частині деталі, де за конструкцією буде знаходитися рідина та відсутність ребра жорсткості зовсім не задовольняють технологічним вимогам деталі. Зменшення об'єму оптимізованої деталі в порівнянні зі звичайною становить 49 %. Така деталь зовсім не придатна для використання. Тому пошуки найкращих оптимізаційних параметрів тривають. Деталь має наступні значення максимального навантаження та переміщення (рис. 4.13): $\sigma_{\max} = 75,07$ МПа та $\Delta_{\max} = 0,0641$ м.



а

б

Рисунок 4.13 - 3D модель оптимізованої деталі після шостої ітерації:

а – максимальне напруження, б – максимальне переміщення

Наступна оптимізація проводилася виходячи з таких параметрів:

1. Обмеження проектування – розподіл матеріалу 75 %.
2. Параметри оптимізації:
 - закріплення деталі за $\varnothing 15$ та $\varnothing 16$ мм (бокові отвори);
 - вказана товщина стінок 3 мм для отворів $\varnothing 13$ мм;
 - вказана товщина стінок 2 мм для 4 - х отворів $\varnothing 10,5$.
3. Випадки навантаження - сила 100 Н на 4 отвори $\varnothing 10,5$ мм у напрямку – Z та 100 Н на 3 отвори $\varnothing 13$ мм у напрямку – Y.

Приблизна цільова маса виробу 0,9 кг (рис. 4.14).

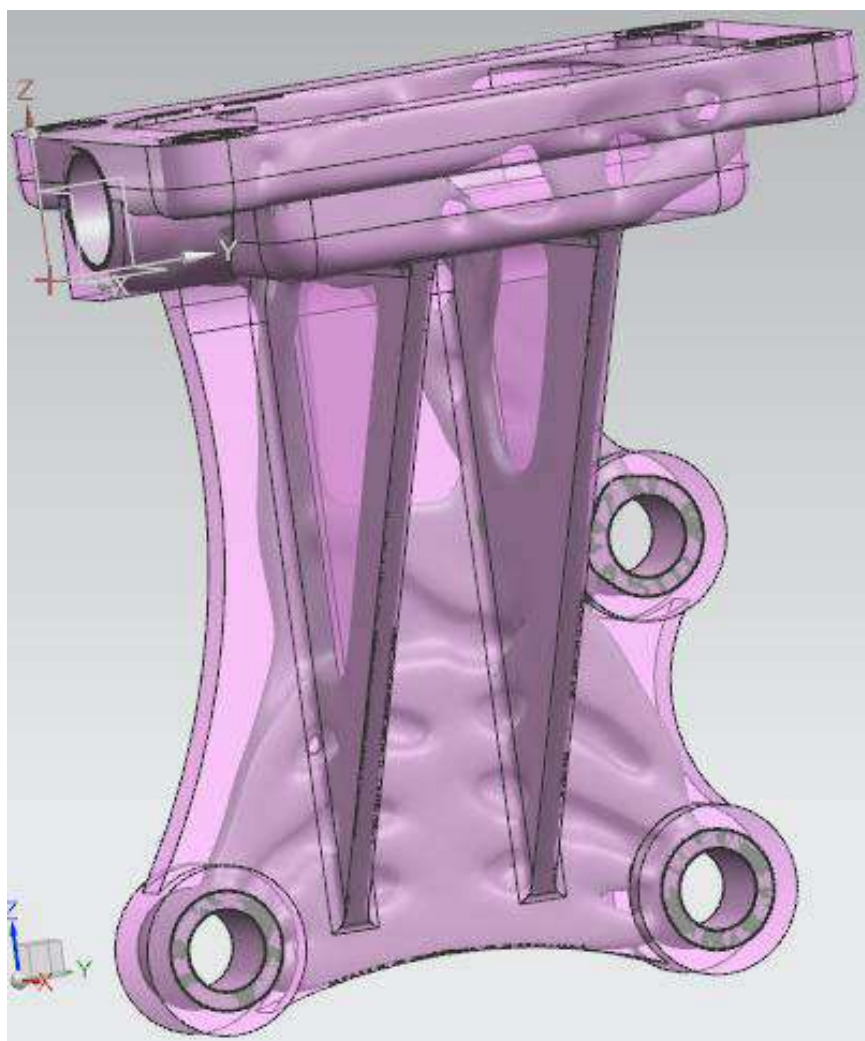


Рисунок 4.14 - 3D модель оптимізованої після сьомої ітерації деталі

З даної оптимізованої конструкції (рис. 4.14) можна зробити висновок, що ребра жорсткості нарешті мають вигляд цілісної конструкції, тобто зможуть витримати деякі навантаження. Та нажаль виходячи з параметрів оптимізації які застосовувалися до деталі, верхня частина деталі, залишилася зовсім не придатною до використання, через велику кількість порожнин. Хоча дійсно цей результат топологічної оптимізації вже близький до кінцевого, однак він потребує переглянути параметри оптимізації, для свого покращення. Взагалі об'єм оптимізованої деталі в порівнянні зі звичайною зменшився на 50 %. Деталь має наступні значення максимального навантаження та переміщення (рис.4.15): $\sigma_{\max} = 35,91$ МПа та $\Delta_{\max} = 0,0842$ м.

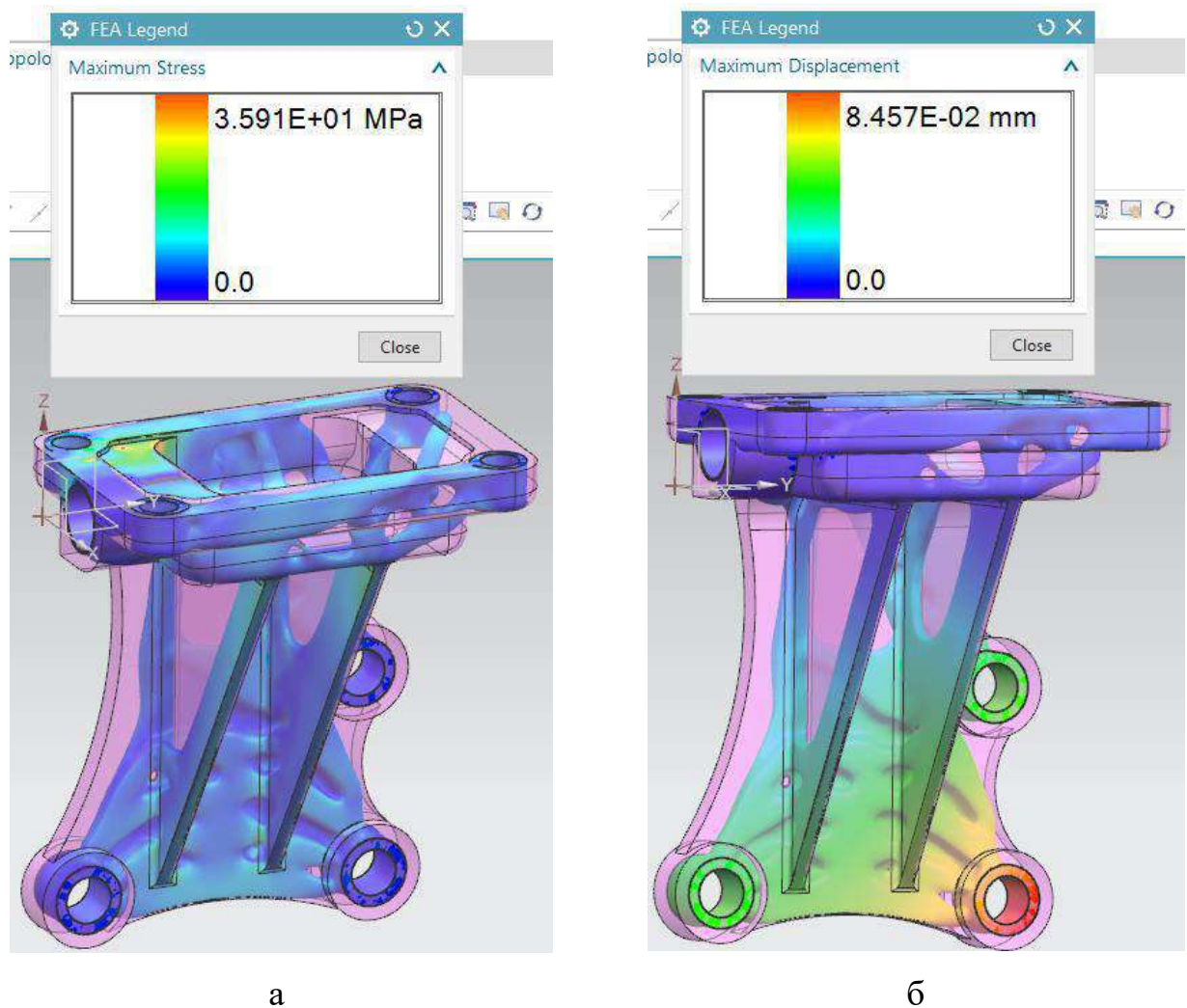


Рисунок 4.15 - 3D модель оптимізованої деталі після сьомої ітерації:

а – максимальне напруження, б – максимальне переміщення

Для зменшення порожнин попередньої оптимізації (рис. 4.14) було прийнято рішення, збільшити тільки цільову вагу виробу та зменшити відсоток розподілу матеріалу в обмеженнях проектування.

А саме оптимізація проводилася виходячи з таких параметрів:

1. Обмеження проектування – розподіл матеріалу 20 %.
2. Параметри оптимізації:
 - закріплення деталі за $\varnothing 15$ та $\varnothing 16$ мм (бокові отвори);
 - вказана товщина стінок 3 мм для отворів $\varnothing 13$ мм;
 - вказана товщина стінок 2 мм для 4 - х отворів $\varnothing 10,5$.

3. Випадки навантаження - сила 100 Н на 4 отвори $\varnothing 10,5$ мм у напрямку – Z та 100 Н на 3 отвори $\varnothing 13$ мм у напрямку – Y.

Приблизна цільова маса виробу 1 кг (рис. 4.16).

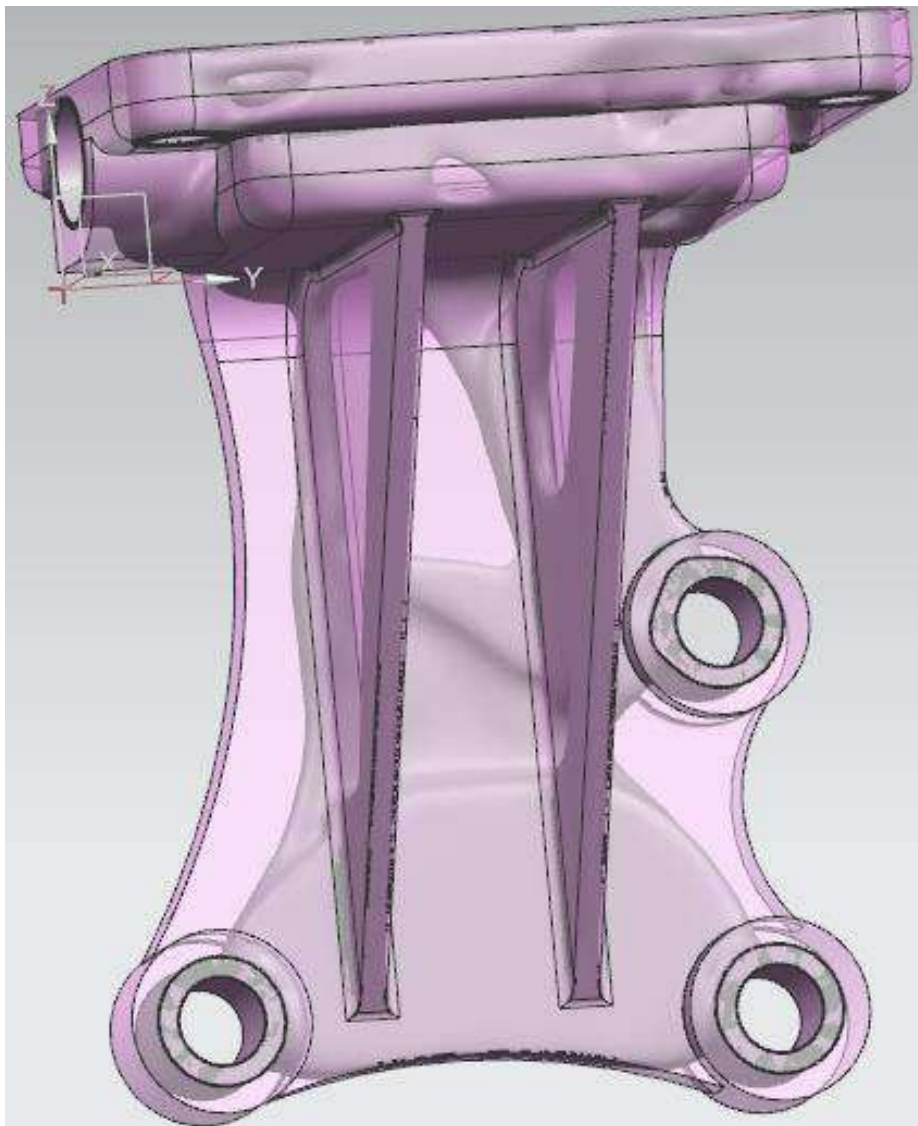
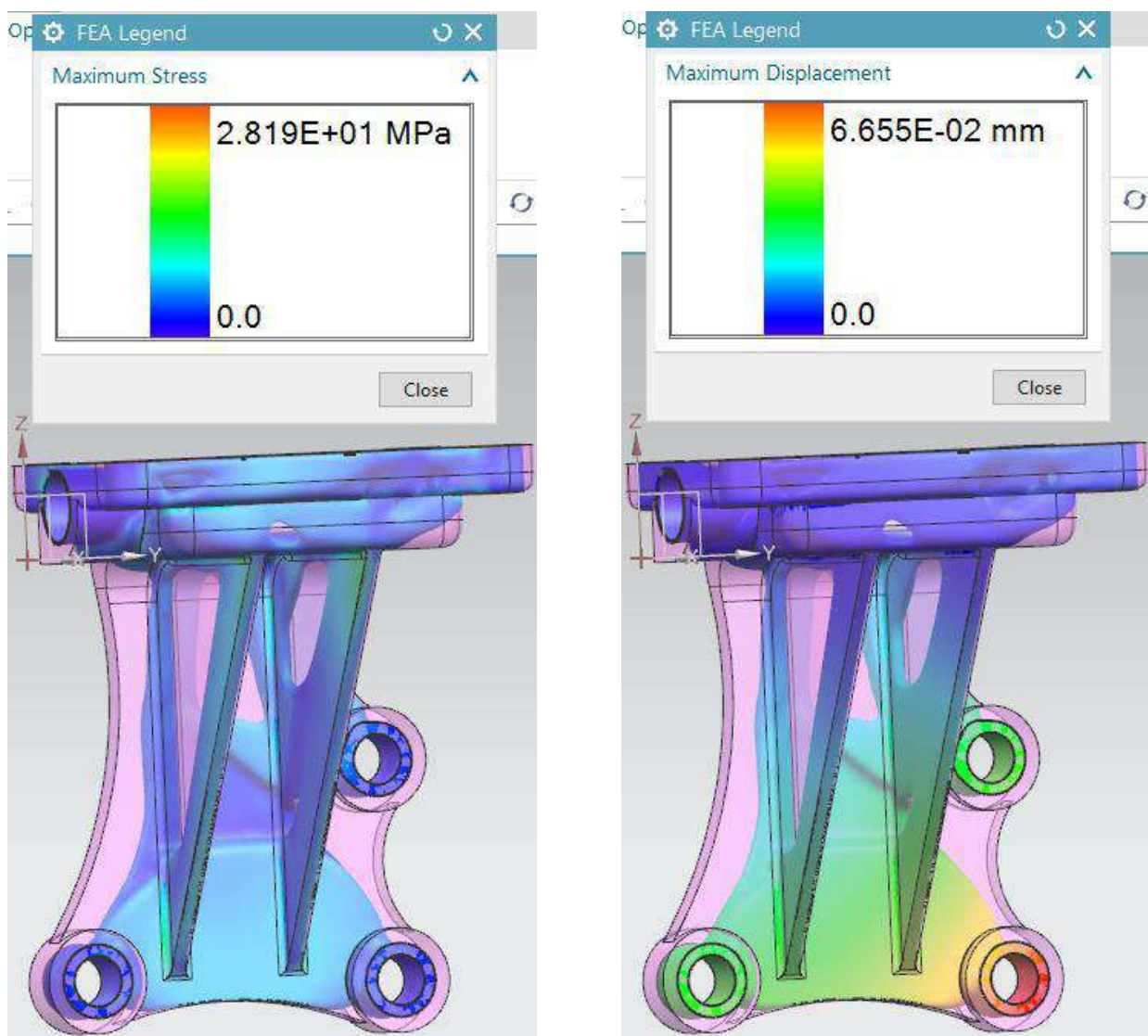


Рисунок 4.16 - 3D модель оптимізованої після восьмої ітерації деталі

З вищенаведеного результату можна зробити висновок, що даних обмежень було не достатньо для повного витіснення порожнин. До того ж стінки отворів $\varnothing 13$ мм надто тонкі для їх повноцінного цільового призначення. Результатом даної оптимізації є зменшення об'єму деталі на 36% та наступні значення максимального навантаження та переміщення (рис. 4.17): $\sigma_{\max} = 28,19$ МПа та $\Delta_{\max} = 0,0666$ м.



а

б

Рисунок 4.17 - 3D модель оптимізованої деталі після восьмої ітерації

а – максимальне напруження; б – максимальне переміщення

Виходячи з вищенаведених результатів було прийняте рішення, розділити об'єм деталі на дві частини, верхню – яка призначена для рідини, та нижню – яка потребує оптимізації. Через те, що в верхній частині деталі, модуль топологічної оптимізації робить безліч порожнин, які не відповідають конструкційним вимогам деталі.

Тому наступна оптимізація виконувалася з такими параметрами:

1. Обмеження проектування – розподіл матеріалу 20 %.
2. Параметри оптимізації:

- закріплення деталі за 3 - ма отворами $\varnothing 13$ мм;
- вказана товщина стінок 4 мм для отворів $\varnothing 13$ мм;

3. Випадки навантаження - сила 100 Н на верхню частину деталі у напрямку – Z.

Приблизна цільова маса виробу 1,12 кг (рис. 4.18).

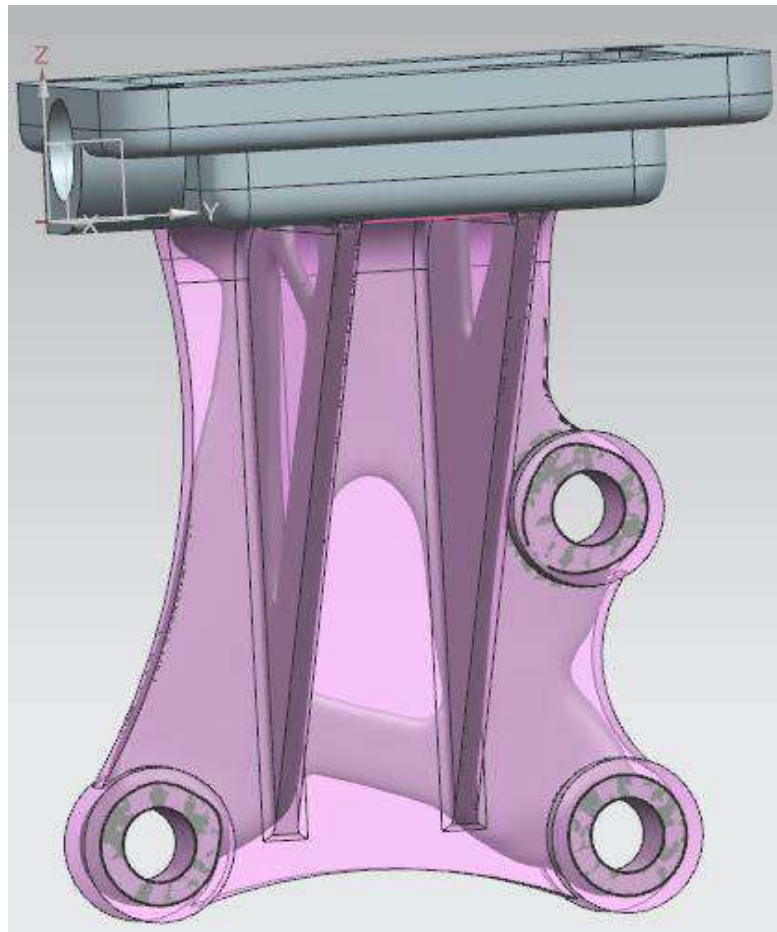
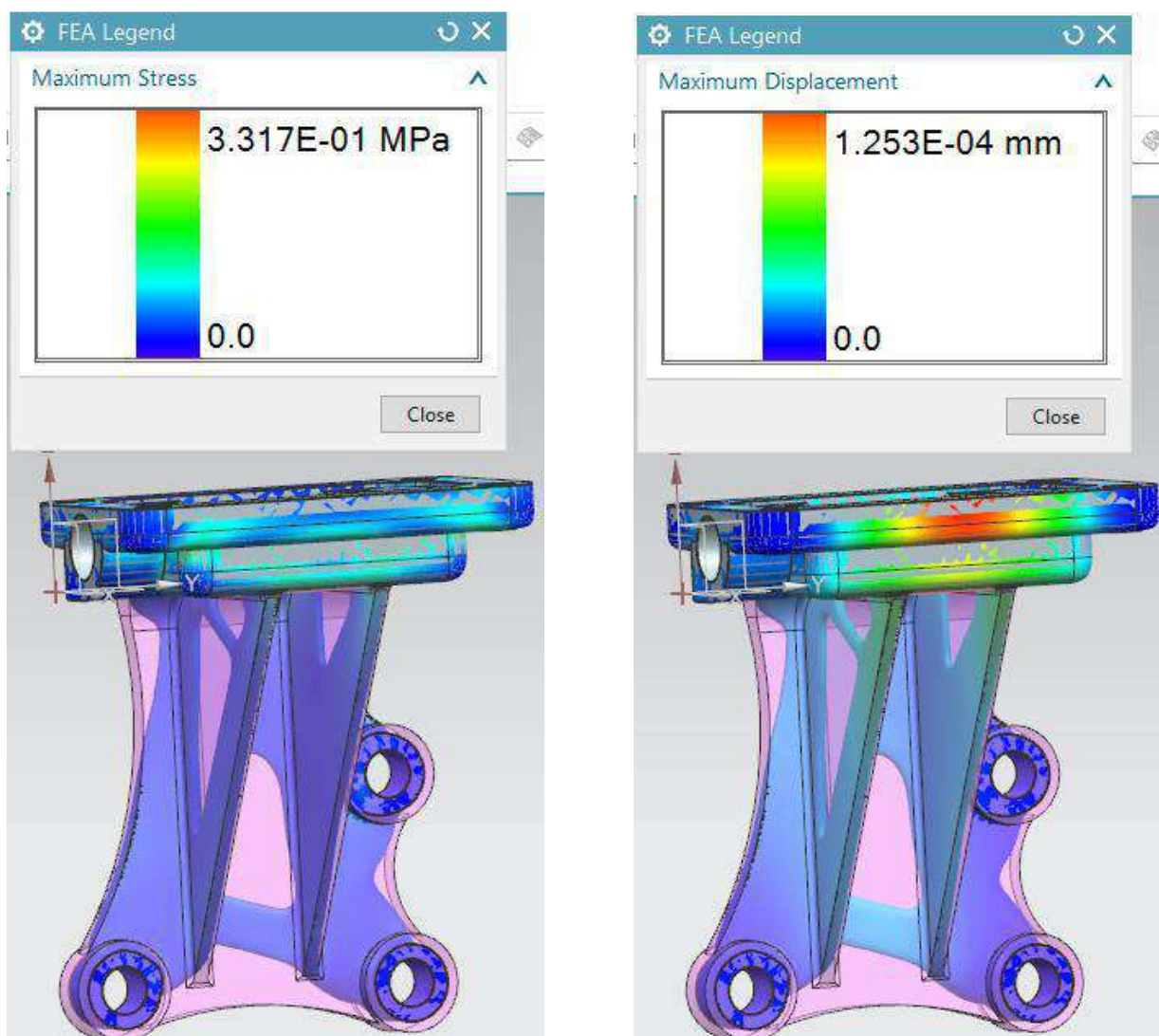


Рисунок 4.18 - 3D модель оптимізованої після дев'ятої ітерації деталі

Можна спостерігати, що наведена 3D модель оптимізованої деталі (рис. 4.18) вже має доволі задовільний вигляд. Зменшення об'єму оптимізованої деталі в порівнянні зі звичайною становить 29 %. Така деталь вже може бути використана на виробництві. Деталь має наступні значення максимального навантаження та переміщення (рис. 4.19): $\sigma_{\max} = 0,332$ МПа та $\Delta_{\max} = 0,00012$ м.



а

б

Рисунок 4.19 - 3D модель оптимізованої деталі після дев'ятої ітерації

а – максимальне напруження; б – максимальне переміщення

Виходячи з вищенаведених результатів можна зробити висновок, що для 3 - х отворів $\varnothing 13$ мм необхідно трохи збільшити товщину стінок до 6 мм з однієї сторони. Тому, що саме за цими отворами конструктивно буде кріпитися гайкове з'єднання.

Наступна оптимізація виконувалася з такими параметрами:

1. Обмеження проектування – розподіл матеріалу 20 %.
2. Параметри оптимізації:
 - закріплення деталі за 3 - ма отворами $\varnothing 13$ мм;

- вказана товщина стінок 6 мм для отворів $\varnothing 13$ мм.

3. Випадки навантаження - сила 100 Н на верхню частину деталі у напрямку – Z.

Приблизна цільова маса виробу 1,12 кг (рис. 4.20).

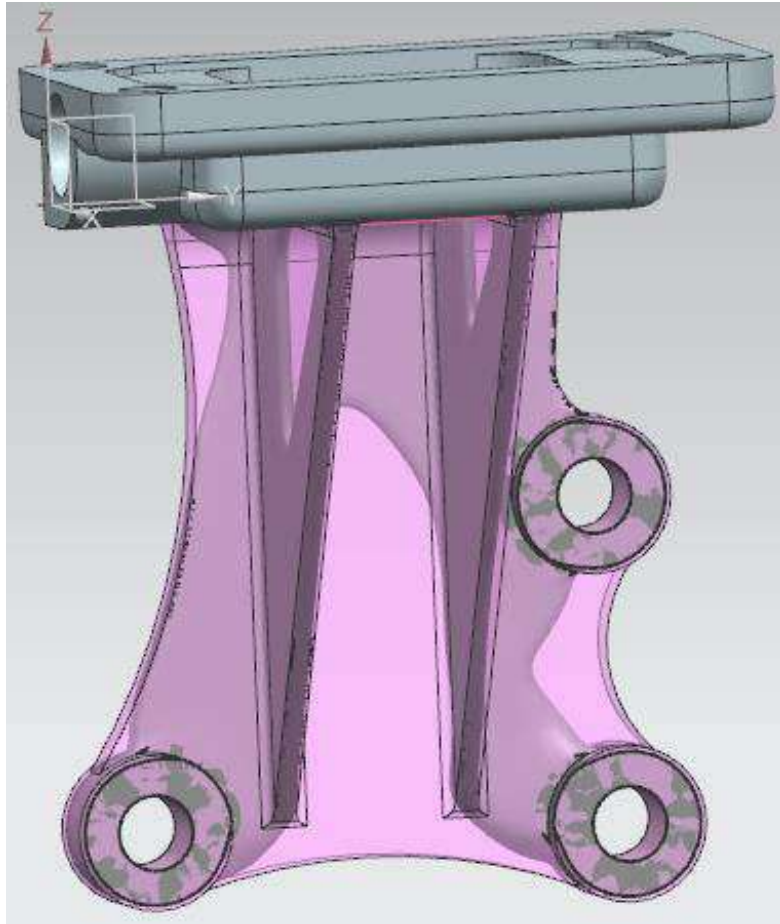


Рисунок 4.20 - 3D модель оптимізованої деталі після десятої ітерації

Підсумовуючи вищенаведених 10 оптимізацій зроблено висновок, що саме остання (рис. 4.20) являється оптимальною в конструктивному плані та для друку безпосередньо. Зменшення об'єму оптимізованої деталі в порівнянні зі звичайною становить 33 %. Така деталь цілком може задовольняти виробництво. Деталь має наступні значення максимального навантаження та переміщення (рис. 4.21): $\sigma_{\max} = 0,332$ МПа та $\Delta_{\max} = 0,00012$ м.

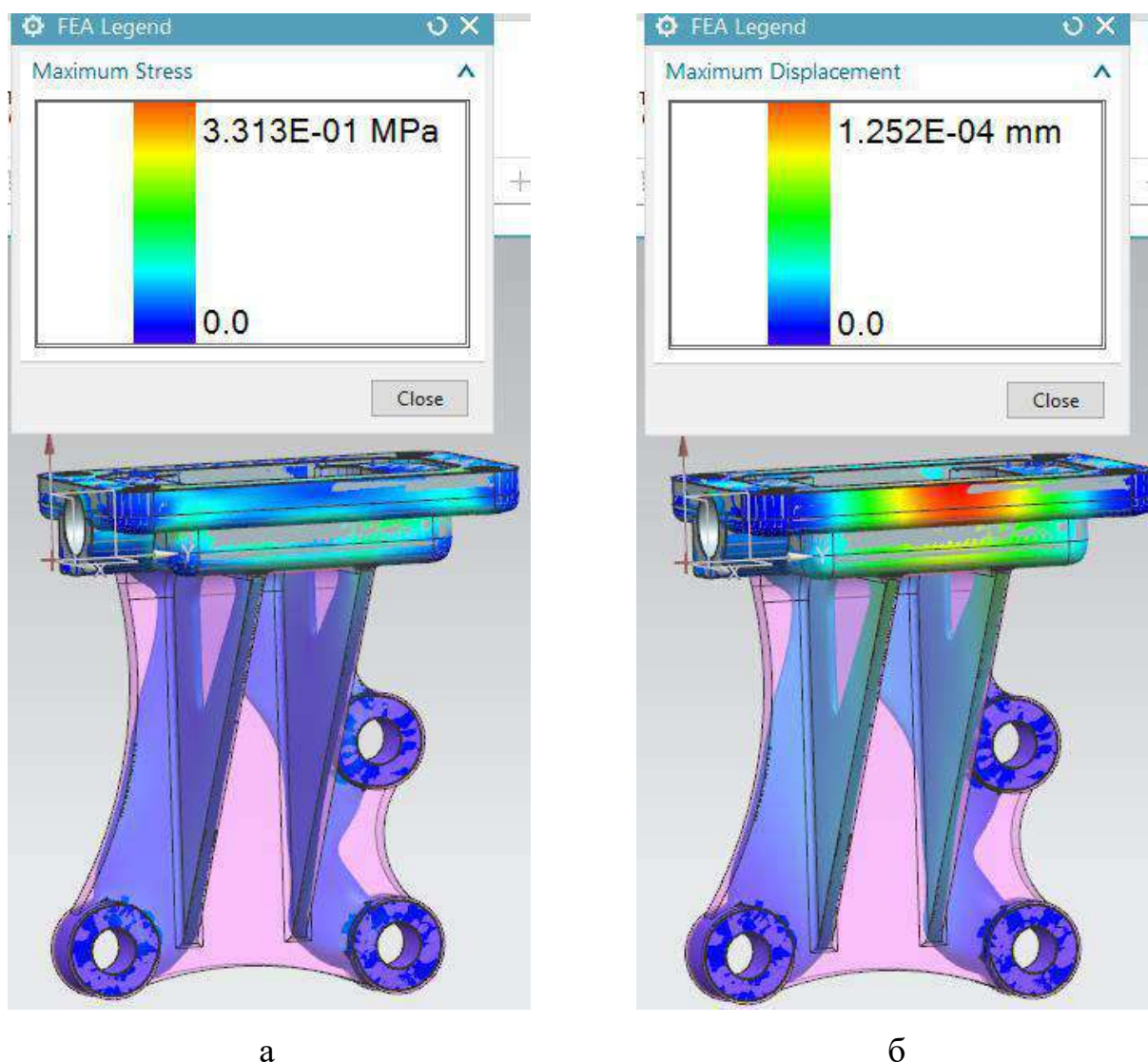


Рисунок 4.21 - 3D модель оптимізованої деталі після десятої ітерації:

а – максимальне напруження; б – максимальне переміщення

4.2 Топологічна оптимізація деталі «кронштейн» спрощеної конструкції виходячи з обмежень, що прикладаються до вихідної деталі

Взагалі проектування та конструювання служить одній цілі: розробці нового виробу. Тобто це процес мозкової діяльності, коли в розумі розробника створюється конкретний образ певного роду деталей. Далі він піддається експериментальному процесу мислення. Одночасно оцінюється

ефект внесених змінень, визначається як ці змінення можуть подіяти на кінцевий результат.

Щоб спростити даний процес, інженери винайшли оптимізацію за формою, розміром та топологічну. Та була розроблена значна кількість модулів топологічної оптимізації. Щоб уявити, як проектується деталь виходячи з даних обмежень, було взято та оптимізовано спрощену модель, деталі «кронштейн». Матеріал деталі – сталь. Вага спрощеної моделі деталі (4.22) 3,86 кг.

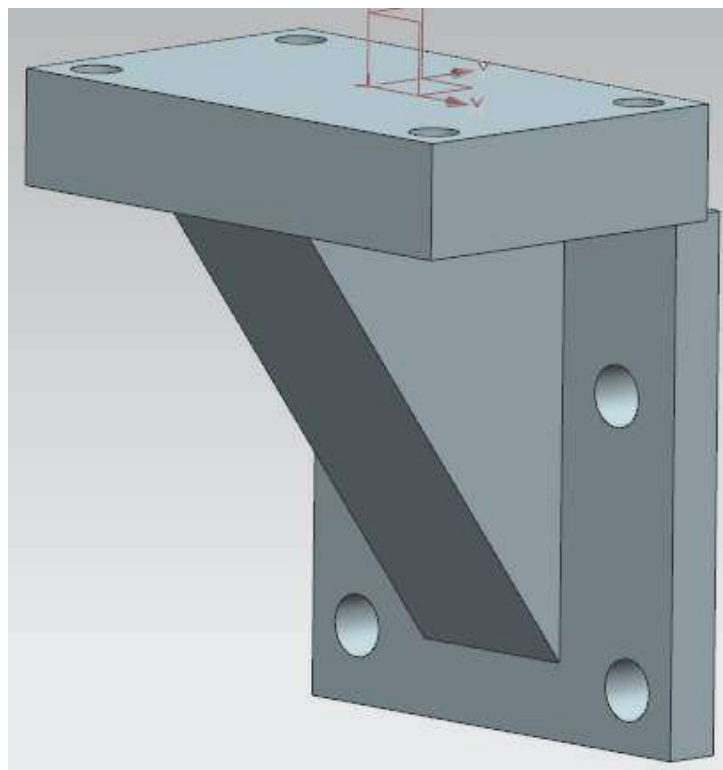


Рисунок 4.22 - 3D модель спрощеної деталі «кронштейн»

Оптимізація виконувалася з такими параметрами:

1. Обмеження проектування – розподіл матеріалу 20 %.

2. Параметри оптимізації:

- закріплення деталі за 3ма отворами $\varnothing 13$ мм;

- вказана товщина стінок 6 мм для отворів $\varnothing 13$ мм;

3. Випадки навантаження - сила 100 Н на верхню частину деталі у напрямку – Z.

Приблизна цільова маса виробу 2,0 кг (рис. 4.23).

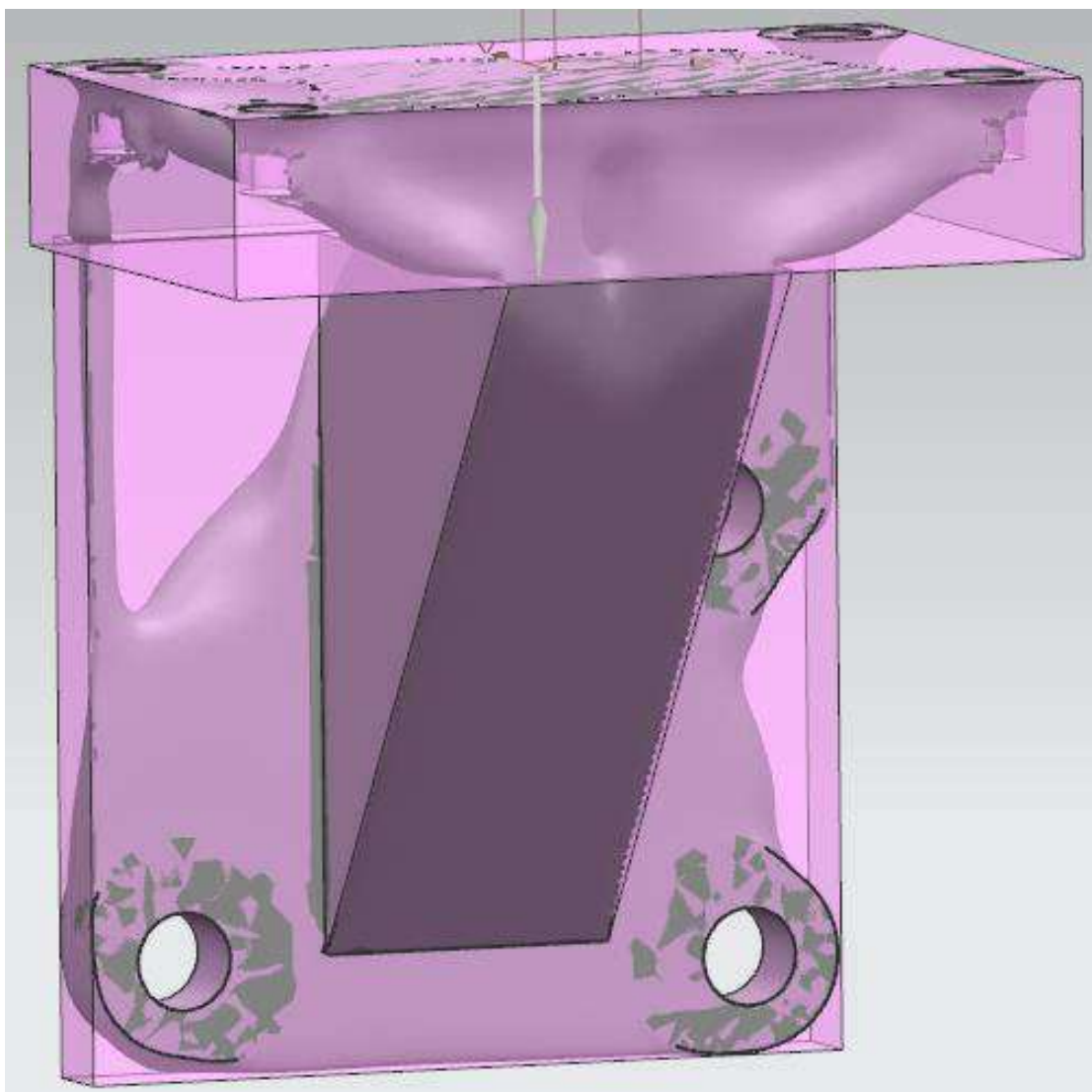


Рисунок 4.23 - 3D модель спрощеної оптимізованої деталі

Деталь має наступні значення максимального навантаження та переміщення (рис. 4.21): $\sigma_{\max} = 1,68$ МПа та $\Delta_{\max} = 0,0102$ м.

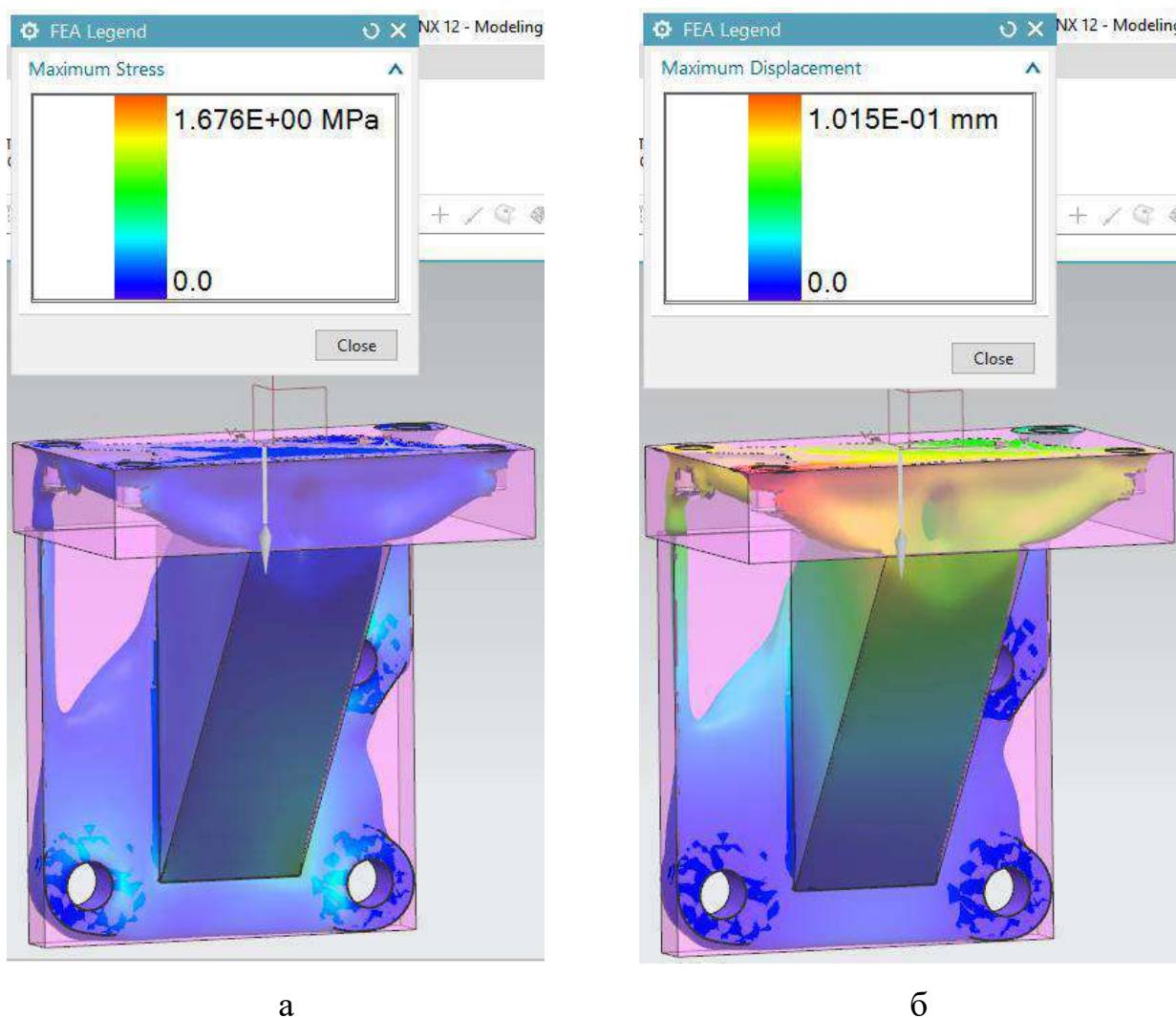


Рисунок 4.24 - 3D модель оптимізованої спрощеної деталі: а – максимальне напруження; б – максимальне переміщення

Підсумовуючи можна сказати, коли у конструктора ще немає готового виробу, він може використовувати модуль топологічної оптимізації, за для того щоб окрім заданих обмежень та навантажень, мати опору для подальших обґрунтувань. Та з метою найвигіднішого розподілу матеріалу, без шкоди технологічним характеристикам спроектувати деталь. З попереднього результату спрощеної моделі оптимізованої деталі (рис. 4.23) видно, що модуль топологічної оптимізації саме і зробив поверхні, які є на існуючій деталі (рис. 4.2 а), а саме R 120 мм та R 27,6 мм. Тобто умовно кажучи, якщо до нинішнього моменту даної деталі не існувало, то за

допомогою NX Topology optimization, зробити це було би в декілька разів простіше.

4.3 Особливості виготовлення деталі «кронштейн» оптимізованої форми на 3D –принтері

Для друку оптимізованої моделі деталі «кронштейн» був використаний принтер PrusaSlicer 2.0 (рис. 4.25). Який використовує для друку FFF (Fused Filament Fabrication) технологію та має наступні параметри:

1. Розміри столу:
 - ширина 200 мм;
 - довжина 250 мм;
 - висота 210 мм.
2. Максимальна швидкість руху:
200 мм/с.
3. Температура нагріву екструдера:
 - максимальна 300 °C;
 - мінімальна 120 °C.
4. Висота шару:
0,05 – 0,35 мм.
5. Підтримуючий матеріал: будь-які термопластики, нейлон, полікарбонат.
6. Кількість датчиків:
2 термістори.

За кінцеву оптимізовану модель деталі була обрана модель після десятої ітерації (рис. 4. 21), так як вона задовольняє всім вимогам технологічності. Та якщо впроваджувати таку деталь в виробництво, то вона звісно потребує фінішної обробки, після звільнення від підтримок.

Параметри використані для 3D-друку оптимізованої моделі деталі (рис. 4.26):

Для друку використовують пластик PLA.

Швидкість руху екструдера по периметру 45 мм/с.

Швидкість руху екструдера по зовнішньому периметру 25 мм/с.

Швидкість руху екструдера, друкуючого підтримки 50 мм/с.

Швидкість холостого ходу екструдера 180 мм/с.

Висота одного шару 0,15 мм.

Діаметр PLA пластику, який подається до друку 1,75 мм.

Густина PLA пластику 1,24 г/см³.

Температура нагріву столу 60°C.

Температура нагріву екструдера 215°C.

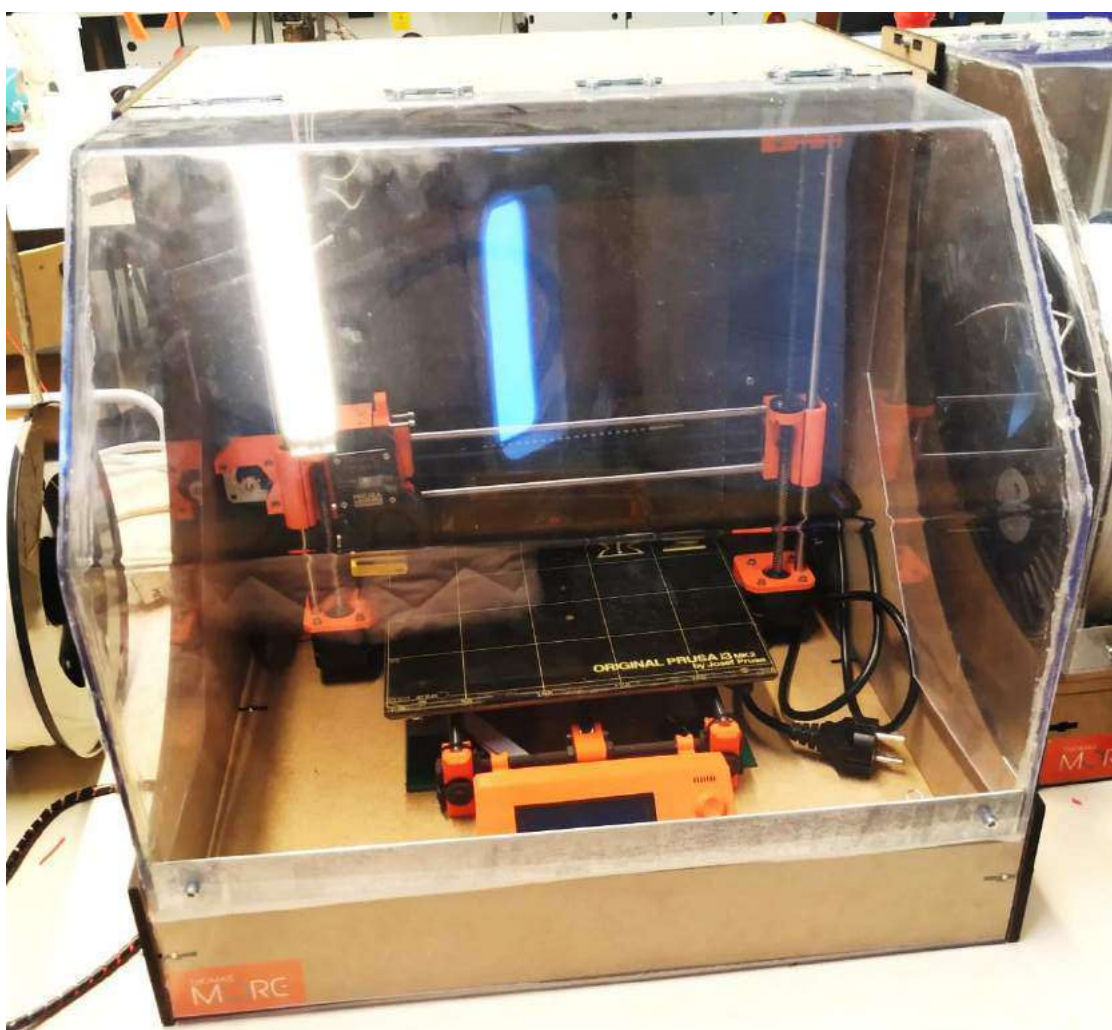


Рисунок 4.25 – Зображення принтеру PrusaSlicer 2.0

Для друку використовують пластик PLA тому, що він дешевше в порівнянні з іншими та друкувати ним також простіше, він не потребує додаткового нагляду.

Взагалі таку відповідальну деталь, як кронштейн треба друкувати з підвищеною точністю, а Prusa Slicer скоріш використовують для друку наглядних прикладів чи деталей які не потребують високої точності.

Тому підсумовуючи можна відмітити, що модуль NX Topology optimization скоріш слід використовувати для оптимізації як основу для створення нових деталей або для оптимізації вже існуючих, та з використанням постобробки. Тому, що даний модуль не дає тієї необхідної точності, яку можуть забезпечити інші подібні програми.

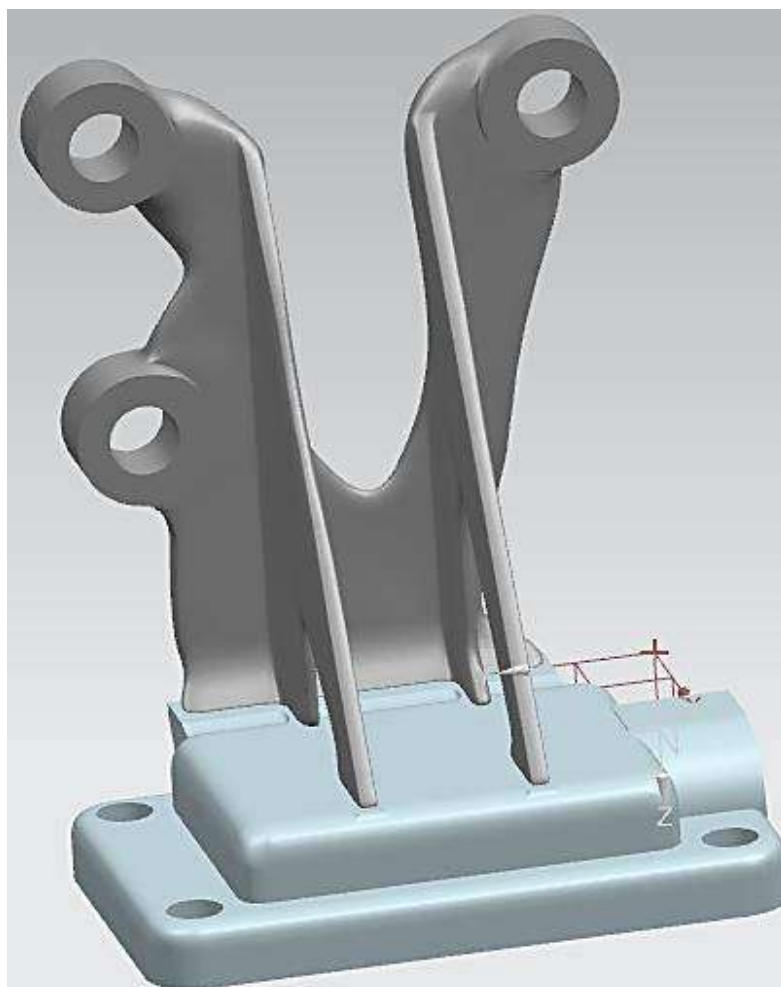


Рисунок 4.26 – Зображення оптимізованої моделі деталі готової до 3D-друку

5 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ НОВОГО ПРИНЦИПУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ «КРОНШТЕЙН» МЕТОДОМ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Для оцінки економічної ефективності від впровадження нового принципу виготовлення деталі «кронштейн» методом топологічної оптимізації було обрано розрахунок вартості необхідного матеріалу для її виготовлення.

Вартість основних матеріалів (M), розраховується за формулою, грн/шт :

$$M = H_{\text{в}} \cdot C_{\text{м}} - B \cdot C_{\text{в}}, \quad (5.1)$$

де $H_{\text{в}}$ – норма витрати матеріалу на одиницю продукції, кг;

$C_{\text{м}}$ – ціна матеріалу за 1 кг, грн/кг;

B – величина відходів на одиницю продукції, кг;

$C_{\text{в}}$ – ціна відходів за 1 кг, грн/кг.

Вартість матеріалу деталі виготовленої за допомогою звичайного виробництва:

$$M_1 = 1,59 \cdot 3,5 - 1 \cdot 0,14 = 5,43 \text{ грн./шт.}$$

Вартість матеріалу деталі виготовленої за допомогою адитивного виробництва:

$$M_2 = 1,12 \cdot 3,5 - 0,2 \cdot 0,14 = 3,89 \text{ грн./шт.}$$

Тобто за допомогою адитивного виробництва можна скоротити вартість матеріалу однієї деталі на 28% в порівнянні з вартістю деталі виготовленої за допомогою звичайного виробництва.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Аналіз потенційних небезпек

В лабораторії католицького університету Льовена, на території кампусу Де Найер, виконувалася магістерська науково-дослідна робота, на тему: «Топологічна оптимізація в адитивному виробництві». Робота, передбачала проведення дослідів з використанням ПК та 3D принтера. Для запобігання ризиків виникнення травматизму, нещасних випадків та створення нормованих умов роботи потрібно дотримуватися правил техніки безпеки під час роботи з персональним комп'ютером та 3D принтером. Даний вид роботи належить до робіт з підвищеним розумовим навантаженням. Тому на дослідника в першу чергу можуть вплинути такі шкідливі та небезпечні фактори як:

- неналежним чином організоване штучне освітлення, може викликати завчасну втоми, зниження рівня працездатності, короткозорість

- можливість підвищеної пульсації світлового потоку (з коефіцієнтом пульсації більше 5%) може призвести до завчасної втоми органів зору, зниження уваги, погіршення гостроти зору, зниження активності та працездатності мозку;

- травмування внаслідок нераціонального розташування робочого місця;

- монотонність роботи та неергономічність робочого місця призводять до захворювань загальноневротичного характеру (наприклад кістково-м'язові);

- інтелектуальна праця призводить до зростання втоми, в першу чергу нервово-психічної (наприклад головний біль)

В подальшому довготривале використання ПК та 3D принтера може призвести до:

- можливість отримання опіку від розплавленого термопластику, або столу печаті, температура якого може досягати 100-150°C;

- ураження електричним струмом через недотримання правил безпеки при роботі з електричними приладами, порушення ізоляції дротів або несправності електричних приладів;

- виділення таких хімічних отруйних речовин, як фенол, формальдегід, метанол, оцтова кислота, стирол, хлористий вініл, ацетон, ацетальдегід під час друку на 3D принтері, сприяють зниженню імунітету та виникненню хвороб дихальної системи;

- при довготривалому використанні 3D принтера та ПК з підвищеним рівнем вібрації, у людини підвищується можливість виникнення головного болю, втома;

Даний вид праці передбачає використання 3D (FDM) принтера, принцип роботи якого заснований на плавленні пластикової нитки. Таким чином, пристрій нагріву становлять велику небезпеку при дотику. Як правило, температура екструдера працюючого приладу може варіюватися від 170 до 300 °С. Конкретний показник температури матеріалу з яким працює дослідник при 3D друці деталі «Кронштейн», а саме PLA це 215 ° С. При такій температурі не виключається можливість отримання хворобливих ушкоджень як, при зіткненні з самим матеріалом, так і з елементами нагріву принтера: столом і соплом екструдера.

Температуру плавлення пластику передбачається перевіряти тільки за показаннями датчиків, які відображаються при друці на дисплеї пристрою.

В ситуаціях, коли потрібен безпосередній контакт з неостиглими поверхнями, наприклад, при прочищенні сопла, передбачається користування спеціальними інструментами та засобами індивідуального захисту рук.

Ще однією причиною займання може бути перегрів екструдера. Наприклад, температура займання PLA пластика складає близько 388°C. Або наприклад, зламаний датчик температури принтера може бути причиною самозаймання матеріалу.

Також 3D-принтери мають дуже багато рухомих частин. Це двигуни, шків, різбові стрижні, каретка і вентилятори. Що при халатному використанні може заподіяти травми різного ступеню важкості.

При роботі 3D-принтера утворюються ультратонкі частинки формальдегіду (діаметр не перевищує 100 нанометрів), що легко проникають в тканини та можуть призвести до легеневих і серцевих захворювань працюючих. Також, в окремих випадках утворюються стирол і капролактами, які є небезпечними для слизових оболонок і шкіри, викликають головний біль, хронічні захворювання у осіб, що працюють в таких умовах тривалий час.

6.2 Заходи по забезпеченню техніки безпеки

На основі аналізу потенційних небезпек розроблено заходи по забезпеченню безпеки, які направлені на усунення чи локалізацію цих небезпечних факторів та відповідають вимогам нормативно-правових актів та стандартів.

Для попередження травматизму, перед початком науково-дослідницької роботи передбачено проведення вступного та первинного інструктажу з охорони праці згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці»). Первинний інструктаж проводиться безпосередньо перед початком роботи на робочому місці.

Для захисту від можливих опіків та травм, пов'язаних з розплавленим пластиком дослідник застосовує засоби індивідуального захисту (спеціальний одяг, засоби захисту рук, очей) згідно НПАОП 0.00-4.01-08 «Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту».

Для виключення можливого ураження електричним струмом персоналу, який приймає участь в роботі передбачені:

- організаційні заходи (проведення навчання з правил електробезпеки, перевірка знань та атестація персоналу на другу або третю групу з електробезпеки, згідно НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці»)

- технічні заходи (враховуючи, що електроживлення електрообладнання приміщення з ПК здійснюється від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц, відповідно до вимог «ПУЕ-2014», електрообладнання в приміщенні з ПК, характеризується як електроустановки до 1000 В, тому згідно вимог глави 1.7 «ПУЕ» та ГОСТ 12.1.030-81 (2001) «ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление», величина опору контуру захисного заземлення електрообладнання приміщення з ПК у будь-яку пору року не перевищує – 4 Ом).

Ергономічні вимоги до моніторів, їх технічні характеристики (розмір екрана, роздільна здатність, зернистість зображення, значення частот вертикальної та горизонтальної розгортки, смуга пропускання відеосигналу, можливості регулювання, мікропроцесорне управління, динамічне фокусування, наявність інварової маски та розмагнічування, антивідблискове покриття, захист від електростатичних та електромагнітних полів, система управління енергоспоживанням) враховано згідно вимог розділу «Мінімальні вимоги по охороні праці» директиви ЕС90/270 ЕЕС. Символи на екрані чіткі і добре розрізняються, зображення без блимання, яскравість та контрастність легко регулюються, екран вільний від відблисків і відбиття, випромінювання знижені до надзвичайно малих рівнів. Застосування плоских екранів зменшує спотворення зображення, на екрані утворюється менше відблисків від відбитого світла. Для підвищення якості зображення, для зменшення відблисків, а також запобігання накопичення статичного заряду передбачається застосування моніторів, на поверхні екрана якого, на переднє скло ЕПТ нанесено спеціальні покриття.

Для запобігання отримання різноманітних видів травм в 3D-принтері «Prusa Sliser» передбачене надійне захисне заземлення, декілька вимикачів, а саме автоматичний, та на випадок поламки ручний вимикач. Також в 3D –принтері присутній захисний корпус, який запобігає отриманню опіків від нагрітого столу та екструдера та частково запобігає викидам шкідливих випарів, які проходять через деякий фільтр.

ПК та 3D-принтер розміщуються в приміщеннях де забезпечується трьохкратний повітряобмін за годину. Досягається це пристроями кондиціонування, вентиляції та дезодорації повітря, системами опалювання згідно ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Сумарний час безпосередньої роботи з 3D-принтером протягом робочого дня не більше 6 годин (НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями»). Після закінчення роботи з 3D –принтером знімається і протирається столик, остиглий до кімнатної температури, чистою вологою тканиною, або промивається проточною водою і витирається насухо та встановлюється назад. Також після роботи ретельно провітрюється приміщення.

При виникненні у працюючих з ПК зорового дискомфорту та інших несприятливих суб'єктивних відчуттів, незважаючи на дотримання санітарно-гігієнічних і ергономічних вимог, рекомендується застосовувати індивідуальний підхід з обмеженням часу роботи з ПК.

У випадках, коли характер роботи вимагає постійної взаємодії з ВДТ (набір текстів чи введення даних і т.п.) з напруженою увагою і зосередженістю, при виключенні можливості періодичного перемикання на інші види трудової діяльності, не пов'язані з ПК, рекомендується організація перерв по 10 - 15 хвилин через кожні 45 - 60 хвилин роботи.

6.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці для приміщення (дослідницької лабораторії, конструкторського бюро, офісу, тощо) обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», МЮУ 06.05.2014 р. за № 472/25249, ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Стопи ніг необхідно розміщувати на спеціальній підставці або безпосередньо на підлозі, стегна у горизонтальній площині, а передпліччя – вертикально, лікті необхідно тримати під кутом 70 - 90° до вертикальної площини, зап'ястя необхідно зігнути відносно вертикальної площини не більше ніж на 20°. Висота робочої поверхні столу 680-800мм, а ширина повинна задовольняти можливості виконання операцій у зоні досяжності рук.

Для запобігання запиленості та загазованості приміщення пилом і парами пластика, що розплавляється при 3D друці, необхідно передбачати вентиляційні системи, які повинні задовольняти вимогам ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Згідно ДСН 3.3.6.042-99 „Державні санітарні норми параметрів мікроклімату” температура приміщень, де працівники виконують свої обов'язки сидячи і не потребують фізичного напруження має становити 22-24° С, відносна вологість повітря у приміщенні 40-60% – в холодну і теплу пору року. Мікроклімат у приміщенні забезпечується згідно ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» .

Оцінку впливу рівня вібрацій необхідно проводити за ДСТУ ISO 2631-1:2004 «Вібрація та удар механічні. Оцінка впливу загальної вібрації на людину».

Забезпечення вимог до санітарно-побутових приміщень (згідно ДБН В.2.2-28:2010 «Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення»). Площу приміщень слід приймати з розрахунку не менше 6 м² на робоче місце працівника, а об'єм- 20 м³.

Оцінку впливу рівня вібрацій необхідно проводити за ДСТУ ISO 2631-1:2004 «Вібрація та удар механічні. Оцінка впливу загальної вібрації на людину».

Враховуючи суттєві нервово-емоційні та інтелектуальні навантаження під час виконання науко-дослідницьких робіт, рівень шумів в лабораторії не повинен перевищувати 65 дБ згідно вимог ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку».

При виконанні в приміщеннях робіт Іб слід застосовувати природне та штучне освітлення. Значення освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення ПК має становити 400 лк, згідно ДБН В.2.5.-28-2018 «Природне і штучне освітлення», якщо ці значення неможливо забезпечити системою загального освітлення, допускається використовувати місцеве освітлення. Штучне освітлення має бути комбінованим, тобто поєднується з місцевим. В якості джерел штучного освітлення рекомендується застосовувати люмінесцентні лампи білого спектрального складу. Місцеве освітлення не повинно створювати відблиски на поверхні екрану та збільшувати освітленість екрану більше 400 лк. Коефіцієнт пульсації не має перевищувати 5%. Тому рекомендується використовувати світильники з розсіювачами та дзеркальними екранними сітками або віддзеркалювачі з високочастотними пускорегулювальними аппаратами. Люмінесцентні лампи у складі світильників при загальному освітлені рекомендовані у приміщеннях висотою до 6 м. Лампи ЛЛ мають наступні переваги: висока світловіддача (до 75 лм/Вт), висока стабільність світлового потоку, термін експлуатації до

10000 годин, високий індекс кольоропередачі. Недоліки: висока вартість, повинні обслуговуватись фахівцями, мають складну пускову апаратуру, можливі шум та миготіння, значна пульсація при однофазній схемі підключення.

Дослідники, які працюють з ПК підлягають обов'язковим медичним оглядам. Періодичні огляди необхідно проводити раз на два роки. Основними критеріями оцінки стану придатності до роботи є стан органів зору, при цьому необхідно враховувати також стан організму в цілому. Наказ міністерства охорони здоров'я України від 21 травня 2007р. №246 «Про затвердження порядку проведення медичного огляду працівників певних категорій».

6.4 Заходи з пожежної безпеки

Аналіз речовин і матеріалів, що використовуються в даній науково-дослідній роботі:

- ПК;
- 3D-принтер;
- термопластичні матеріали.

Виходячи з аналізу речовин і матеріалів можна визначити категорію можливої пожежі згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж (EN 2:1992, EN 2:1992/A1:2004, IDT)». Категорія даної можливої пожежі «В» – пожежі, що супроводжуються горінням рідин або твердих речовин, які переходять у рідкий стан.

Категорію пожежної безпеки, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою» та СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания». Лабораторія з 3D-принтером та аудиторія з ПК

відносяться до категорії В пожежонебезпечних приміщень - Горючі газы, легкозаймисті, горючі і/або важкогорючі рідини, а також речовини і/або матеріали, які здатні вибухати і горіти або тільки горіти під час взаємодії з водою, киснем повітря і/або один з одним; тверді горючі і/або важкогорючі речовини і матеріали (включно з горючим пилом і/або волокнами), за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються), не відносяться до категорій А або Б і питома пожежна навантаження для твердих і рідких легкозаймистих, горючих та важкогорючих речовин і/або матеріалів на окремих ділянках¹ площею не менше 10 м² кожна перевищує 180 МДж·м⁻². 2.3 Якщо питома пожежна навантага не перевищує 180 МДж·м⁻², то приміщення відноситься до категорії Д за умови виконання вимог пунктів 7.6.5 та 7.6.8.

Згідно ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», на випадок пожежі передбачені два шляхи евакуації працівників із адміністративних приміщень та два евакуаційних виходи з механічної дільниці. Максимальне видалення від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу, згідно п.2.29 СНиП 2.09.02-85* «Производственные здания» становить 70 метрів. Приміщення дослідницької лабораторії, в якому розташовуються електрообчислювальні матеріали, різноманітне устаткування, належить до пожежонебезпечної зони, класу П-Па, тому передбачений мінімальний ступінь захисту ізоляції обладнання IP44.

Згідно вимог «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», затверджених наказом МВСУ 15.01.2018 № 25 та зареєстрованих в МЮУ 23.02.2018 р. за № 225/31677 приміщення (лабораторія) оснащено переносними вуглекислотними вогнегасниками ВВК-3 з розрахунку 2шт. на кожні 20м² площі приміщення з урахуванням гранично допустимих концентрацій вогнегасної рідини. Призначений для гасіння загоряння різних речовин, горіння яких не може відбуватися без доступу повітря, загоряння електрифікованим залізничному транспорті,

електроустановок, що знаходяться під напругою не більше 10кВ, загоряння в музеях, картинних галереях і архівах, широке поширення в офісних приміщеннях при наявності оргтехніки, також в житловому секторі.

Перевагою вуглекислотних вогнегасників є відсутність слідів гасіння, вуглекислота після використання не залишає слідів. Вогнегасники вуглекислотні не призначені для гасіння загоряння речовин, горіння яких може відбуватися без доступу повітря алюміній, магній та їх сплави, натрій, калій. Вогнегасники повинні експлуатуватися в умовах помірного клімату в діапазоні температур від мінус 40 до плюс 50 ° С. Не допускається попадання прямих сонячних променів.

Типи вогнегасників

Вогнегасники розрізняють за способом спрацьовування:

автоматичні — стаціонарно монтуються в місцях можливого виникнення вогню.

ручні (приводяться в дію людиною) — розташовуються на спеціально оформлених стендах.

У залежності від акумуляторної вогнегасної речовини вогнегасники поділяються на п'ять видів:

- вуглекислотні,
- повітряно-пінні,
- порошкові,
- водні,
- аерозольні.

За обсягом корпусу:

- ручні малолітражні з обсягом корпусу до 5 л;
- промислові ручні з обсягом корпусу від 5 до 10 л;
- стаціонарні й пересувні з обсягом корпусу понад 10 л.

За способом подачі вогнегасного складу:

- під тиском газів, що утворюються в результаті хімічної реакції компонентів заряду;

- під тиском газів, що подаються зі спеціального балончика, розміщеного в корпусі вогнегасника;
- під тиском газів, закачаних у корпус вогнегасника;
- під власним тиском вогнегасного засобу.

По виду пускових обладнань:

- з вентильним затвором;
- із запірно-пусковим обладнанням пістолетного типу;
- з пуском від постійного джерела тиску.

Вогнегасники маркуються буквами, що характеризують вид вогнегасника, і цифрами, що позначають його місткість.

1. Вуглекислотний вогнегасник призначений для гасіння рідких і газообразних речовин (клас В , С). Заправлений вуглекислотою, яка не залишає забруднюючих речовин на об'єкті гасіння. Рекомендуються для гасіння електроустановок з напругою до 1000В, комп'ютерів, а також пожеж на транспорті, житлових і виробничих приміщеннях.
2. Вогнегасники повітряно-пінні призначені для гасіння вогнищ пожежі класу А (горіння твердих матеріалів органічного походження, горіння яких супроводиться тлінням - дерево, папір, дрантя і так далі) і В (горіння рідин або твердих тіл, що перетворюються на рідини, - нафтопродукти, масла, фарби і тому подібне).
3. Вогнегасник порошковий призначений для гасіння загоряння твердих, рідких і газоподібних речовин (класу А, В, С або В, С в залежності від типу застосовуваного порошку).

Вогнегасник порошковий не призначений для гасіння загорянь лужних і лужноземельних металів та інших матеріалів, горіння яких може відбуватися без доступу повітря.

Порошковий вогнегасник використовується як основний або додатковий джерело боротьби з вогнем. Можна згасити зажевіріли електроприлади, максимальна напруга яких не перевищує 1000В.

4. Основа ефективності водних вогнегасників (ОВ) - це тонкорозпилена вода + спеціальні вогнегасники, в т.ч. змочуючі добавки.
5. Аерозольні вогнегасники - це порівняно нові і вельми ефективні первинні засоби пожежогасіння. Як вогнегасної речовини використовуються парообразующей речовини на основі галоїдированих вуглеводневих сполук: бромистого етилу, хладону або їх суміші.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця переваг та недоліків різних видів вогнегасників.

Вид вогнегасника	Переваги	Недоліки
1	2	3
Вуглекислотні	- відсутність слідів гасіння, бруду тощо; - можна гасити електрообладнання під напругою - дає можливість усунути загорання у важкодоступних місцях, куди доступ піни або порошку може бути проблематичним.	- можливість обмороження вуглекислою при необережному їх використанні; - вуглекислий газ здувається під дією сильного вітру; - при гасінні необхідно при безпосередній близькості тримати вогнегасник до вогнища спалаху.
Повітряно-пінні	- легкий в експлуатації; - не потребує окремих знань для користування; - поставляються відразу зарядженими і готовими до використання. - вартість; - надійність; - майже повна відсутність експлуатаційних витрат.	- обмежений температурний режим; - неможливість використання при горінні речовин, здатних вступати в реакцію з пінним складом; - предмети, що потрапили в зону обробки, можуть бути пошкоджені, особливо це відноситься до електроустаткування.

1	2	3
Порошкові	- висока вогнегасна здатність; - універсальність застосування; - можливість гасіння електроустаткування; - широкий температурний діапазон застосування: від -40°C до +50°C; - зручність та простота у використанні.	- можливість накопичення зарядів статичної електрики на дифузорі вогнегасника; - зниження ефективності вогнегасників при негативній температурі довкілля; - небезпека токсичної дії пари вуглекислоти на організм людини; - небезпека зниження вмісту кисню в повітрі приміщення в результаті використання вуглекислотних вогнегасників; - небезпека охолодження від різкого зниження температури вогнегасної речовини.
Водні	- Не заподіює додаткової шкоди / збитків обробці інтер'єру, предметів обстановки / побуту; - Ефективно витісняє, поглинає токсичні гази, дим навколо вогнища полум'я; - Можна гасити палаючий одяг на людях, при цьому не наближаючись до них на невелику відстань, щоб не заподіяти їм - травму від струменя під високим тиском.	- гасіння тільки твердих речовин/ матеріалів; - неможливість використання при мінусовій температурі повітря поза-опалювальних приміщень; - заборона на гасіння електроустаткування; - необхідність щорічної перезарядки.
Аерозольні	- компактні, мають невеликі розміри	- заправка та дозаправка є досить складним процесом; - при масштабній загрозі є малоефективним засобом.

6.5 Заходи по забезпеченню безпеки у надзвичайних ситуаціях

Оцінка надійності системи матеріально-технічного постачання і виробничих зв'язків.

Матеріально-технічне постачання (МТП) - це комплекс заходів щодо оснащення і забезпечення підрозділів паливно-мастильними матеріалами, продовольством, речовим майном, табельними технічними засобами служб тилу та з підтримки матеріально-технічної бази тилу, запасів матеріальних і технічних засобів в стані, що забезпечує постійну готовність до застосування за призначенням.

Основними завданнями МТП є:

1. Організація та здійснення матеріального і технічного забезпечення підрозділів підприємства;
2. Здійснення методичного керівництва по створенню, зберіганню, використанню та заповненню резервів запасних частин (ЗЧ) для мінімізації простоїв кінцевих виробів і організації безвідмовної роботи техніки;
3. Організація технічно правильної експлуатації техніки і технічних засобів, підтримання їх в постійній готовності до застосування;
4. Організація своєчасного і якісного ремонту техніки і технічних засобів;
5. Контроль за експлуатацією та ремонтом техніки;
6. Здійснення документальних ревізій і перевірок технічного стану і змісту техніки.

З усіх завдань, покладених на службу МТП, можна виділити ключову - визначення постачальницьких потреб, яка повинна вирішуватися в двох взаємопов'язаних аспектах:

- Підтримка працездатного стану експлуатованої складної машинобудівної продукції наявними ЗЧ для виконання робіт з технічного обслуговування і ремонту (ТОіР);

- Забезпечення підприємства ЗЧ, що відображають найменшу вартість терміну служби наявного парку техніки.

Одним з основних факторів, що впливають на експлуатаційну надійність техніки, є стратегія технічного і ремонтного обслуговування (ТОіР) машинобудівної продукції, що застосовується на підприємстві.

Від обраної стратегії ТОіР залежить підхід до організації МТП, отже виникає проблема при знаходженні оптимальних обсягів запасів ЗЧ. Різні стратегії ТОіР, таким чином, породжують і різні підходи до математичного моделювання запасів, так як саме попит на ЗЧ є головним вхідним параметром при розрахунках. Таким чином, виникає необхідність аналізу основних стратегій ТОіР при експлуатації складної техніки.

На сьогоднішній день існують дві основні стратегії експлуатації, які базуються на різних підходах і принципах. Перша - це стратегія організації ТОіР на основі планово-попереджувальних ремонтів (ППР), друга стратегія - організація на основі фактичного стану технічного ресурсу об'єктів і їх підсистем.

Стратегії ТОіР традиційно розглядаються на підприємствах в основному в технічному аспекті, проте, у зв'язку з повсюдним переходом машинобудівного виробництва до впровадження концепції управління життєвим циклом (ЖЦ) продукції, на перший план виходять питання ефективності експлуатації, тобто економічні аспекти.

Надійність і ефективність експлуатації нерозривно пов'язані - технічні особливості кожної з стратегій знаходять пряме відображення в економічній частині, формуючи групи витрат, багато з яких не завжди чітко видно і зрозумілі керівництву компаній.

Більшість провідних машинобудівних підприємств авіаційної, аерокосмічної, автомобільної галузі вкладають кошти в розробку, створення і обслуговування системи об'єктивного контролю технічного ресурсу елементів. Також розробляються методики для організації МТП [6], з метою

підвищення ефективності експлуатації та зміцнення провідних позицій на світових ринках.

Матеріально-технічне забезпечення (МТП) створює умови для нормальної виробничо-господарської діяльності і є джерелом раціоналізації й оптимізації функціонування підприємств і організацій в цілому. У структурі витрат на експлуатацію та обслуговування продукції витрати, пов'язані з формуванням ресурсно-сировинної бази і супутніми логістичними процесами (закупівля, транспортування, зберігання, і т.д.), є однією з найбільш значущих складових. В умовах високої насиченості ринків різними виробниками це в підсумку позначається на конкурентоспроможності продукції. У зв'язку з цією обставиною виробники машинобудівної продукції змушені зосереджувати свою увагу на вирішенні проблеми організації ефективного МТП, оскільки це створює передумови для підвищення продуктивності економічних систем будь-якого масштабу.

Протягом останніх років було написано багато наукових робіт, присвячених проблемам оптимізації запасів. Більшість дослідників не враховують специфіку продукції та пропонують загальні підходи, засновані на традиційній ідеї зниження витрат і часу поставок, погано застосовні в конкретних ситуаціях.

Для забезпечення ефективної експлуатації машинобудівної продукції будь-якого призначення, при будь-якому критерії оптимальності, необхідно мінімізувати час простою кінцевих виробів для відновлення працездатності.

Аналіз часу відновлення працездатності дозволив зробити висновки про фактори, що впливають на величину:

- час доставки безпосередньо залежить від стратегії експлуатації техніки, а також ЗЧ на складах;

- час на монтажньо-демонтажні роботи залежить не тільки від класифікації персоналу, але і від конструкційних особливостей кінцевого виробу;

- чітко видно, що зростання коефіцієнта технічної готовності пов'язаний безпосередньо з часом на відновлення працездатності техніки;

- значення часу на виявлення причин відмови та часу на проведення ТОіР залежить від класифікації персоналу, що відповідає за дані процеси.

При плануванні МТП необхідно враховувати конструкційні особливості кожного виробу. Також існують чинники, що обумовлюють експлуатаційну специфіку виробів. Це дозволяє виділити і систематизувати логістичні фактори, що впливають на ефективність МТП.

Потрібно обґрунтовувати підхід до врахування резервування елементів при плануванні оптимального обсягу запасних частин. Це дозволяє задати умову збереження працездатності виробу в цілому в залежності від його конфігурації, що відбивається на значенні ймовірності безвідмовної роботи виробу.

Повинен бути розроблений комплекс економіко-математичних моделей оптимізації запасу для продукції різного призначення з урахуванням конструкційної надмірності; облік резервування елементів в розроблених моделях дозволяє врахувати перекриваються потреби в однотипних видах запасних частин. Також в моделях враховані логістичні виробів.

Повинен бути розроблений алгоритм вибору моделі для визначення оптимального обсягу запасу і схема організаційної системи обробки даних про потребу ЗЧ для підприємств, що експлуатують обладнання з технічного ресурсу. Впровадження такої системи дозволяє здійснити коригування обсягів виробництва і поставок під фактичну інтенсивність відмов виробу з урахуванням стану запасів в системі технічної експлуатації.

Незалежно від призначення обладнання, основним завданням МТП є визначення номенклатури та обсягу необхідних запасних частин. На практиці рішення даної задачі здійснюється шляхом математичного моделювання, в результаті чого підприємство отримує інформацію:

- номенклатура запасних частин, необхідних до зберігання в системі МТП;

- Оптимальний обсяг запасних частин, необхідний для здійснення ТОіР кожного експлуатованого виробу.

Однак, промислові підприємства, прагнучи підвищити ефективність виробничих процесів, ставлять перед собою мету здійснити перехід зі стратегії ППР на стратегію експлуатації обладнання по фактичному ресурсу. Це ускладнює планування потреби в запасних частинах.

Для ефективного управління запасом при експлуатації обладнання з технічного ресурсу треба враховувати:

- призначення обладнання;
- конструкційну і експлуатаційну специфіку виробів;
- обсяг запасу в попередній період часу.

Щоб для впровадити розроблений комплекс моделей потрібна організувати систему збору даних, а також представити робочі форми для формування інформаційної бази МТП. Це дозволяє здійснити коригування експлуатаційної інтенсивності відмов різних елементів техніки згідно її технічного стану. Фактична інтенсивність відмов дозволить більш точно визначати потреби підприємства в запасних частинах.

ВИСНОВКИ

Поставлені задачі до даної науково-дослідної роботи були виконані, мета роботи також досягнута. Рух розвитку адитивних технологій та оптимізації конструкцій постійно прискорюються. Топологічна оптимізація є однією з основних напрямків в області оптимізації конструкцій, яка поступово набирає обертів у використанні. Також топологічна оптимізація суттєво скорочує тимчасові та матеріальні витрати конструкції.

З'являється та впроваджується в виробництво різноманітне програмне забезпечення з модулем топологічної оптимізації, що суттєво скорочує час пошуку інженером оптимальної конструкції.

З топологічної оптимізації в адитивному виробництві з'явилася можливість виготовляти деталі та конструкції майже необмеженої за складністю форми. Що також скорочує час на виготовлення таких деталей. Це говорить про те, що топологічна оптимізація дійсно має потенціал для максимального її впровадження, як в машинобудівні, авіабудівні так і в промислові галузі.

Була проведена топологічна оптимізація деталі «кронштейн». В результаті якої, вагу деталі було зменшено з 1,59 кг до 1,12 кг. Також використовуючи адитивне виробництво можна скоротити вартість матеріалу однієї деталі на 28% в порівнянні з вартістю деталі виготовленої за допомогою звичайного виробництва.

Застосування топологічної оптимізації з використанням такого інструменту, як модуль NX Topology Optimization дає можливість створювати міцні та полегшені конструкції для різних галузей застосування. Даний підхід забезпечує простоту постановки задач, до того ж дозволяє контролювати та дотримувати технологічні вимоги, задавати мінімальну вагу виробу і обмеження геометрії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кишов Е.А., Комаров В.А. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Автоматизация проектирования сложных высоконагруженных узлов и деталей машин на основе топологической оптимизации: дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук: 2018. С. 151.
2. Васильев Б.Е., Магеррамова Л.А. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин: Вестник СГАУ № 3-1, 2015. С. 139–147.
3. Топологическая оптимизация помогла облегчить крыло самолета. URL: <https://nplus1.ru/news/2017/10/05/optimize> (дата звернения: 12.07.2019).
4. В НИТУ «МИСиС» спроектировали и испытали 3D-печатные авиационные детали с бионическим дизайном. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/in-nust-misis-designed-and-tested-a-3dprinted-aircraft-parts-with-bion/> (дата звернения: 13.07.2019).
5. Brackett D., Ashcroft I., Hague R. Topology optimization for additive manufacturing. 22nd annual international solid freeform fabrication symposium. 2011. P. 348-362.
6. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника № 51, 2017. С. 51-61.
7. Jikai Liu, Yongsheng Ma. A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. Advances in Engineering Softwar, 2016. P. 161–175.
8. Оганесян П.А., Шевцов С.Н. Оптимизация топологии конструкций в пакете ABAQUS. Известия Самар. науч. центра РАН – Т. 16, 2014. С. 543–549.

9. Y.H. Kim, A. Tan, B.S. Yang. Optimum shape design of rotating shaft by ESO method. *Journal of Mechanical Science and Technology* Vol. 21, iss. 7, 2007. P. 1039–1047.
10. L. Xia, Q. Xia, X. Huang. Bi-directional evolutionary structural optimization on advanced structures and materials: A comprehensive review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2016. P. 1–42.
11. Шевцов С.Н. Методы оптимизации конструкций: курс лекций, Донск. гос. техн. ун-т., Ростов н/Д, 2010. С. 97.
12. Кротких А.А., Максимов П.В. Исследование и модификация метода топологической оптимизации SIMP. *Междунар. науч.-исслед. Журнал* № 01(55), 2016. С. 91–94.
13. Bruns T. A reevaluation of the SIMP method with filtering and an alternative formulation for solid–void topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* Vol. 30, iss. 6, 2005. P. 428–436.
14. Liu Z., Korvink J., Huang R. Structure topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB. *Structural and Multidisciplinary Optimization* Vol. 29, iss. 6, 2005. P. 407–417.
15. Темис Ю.М., Якушев Д.А. Оптимизация конструкции деталей и узлов ГТД. *Вестник СГАУ*– № 3-1, 2011. С. 183–188.
16. Марчук Н.И. Оптимальное проектирование конструкций с использованием топологической оптимизации. *Молодежь и наука: сб. материалов VIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*, 2012. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section35.html> (дата звернения: 01.09.2019).
17. Шевцова В.С., Шевцова М.С. Сравнительный анализ методов оптимизации топологии (SIMP и Level-Set) на примере реконструкции крыла стрекозы. *Вестник Юж. науч. центра Т. 9, № 1*, 2013. С. 8–16.
18. Siemens: *Topology Optimization for Designers Help*, 2017, URL: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14633/>

[Frustum-Topology-Optimization-Integrated-into-Siemens-NX-for-3D-Printing.aspx](#), (дата звернення: 06.07.2019).

19. А.Гранкин. Аддитивные технологии в Siemens NX CAM. Часть 1: Семь этапов нового производственного процесса.



Магістерська робота на тему:

Топологічна оптимізація
в адитивному виробництві з
використанням спеціального
програмного забезпечення

Виконала ст.гр. М-118м Жученко А.Г.

Керівник Вишнепольский Є.В.

Matthias Faes

Мета топологічної оптимізації



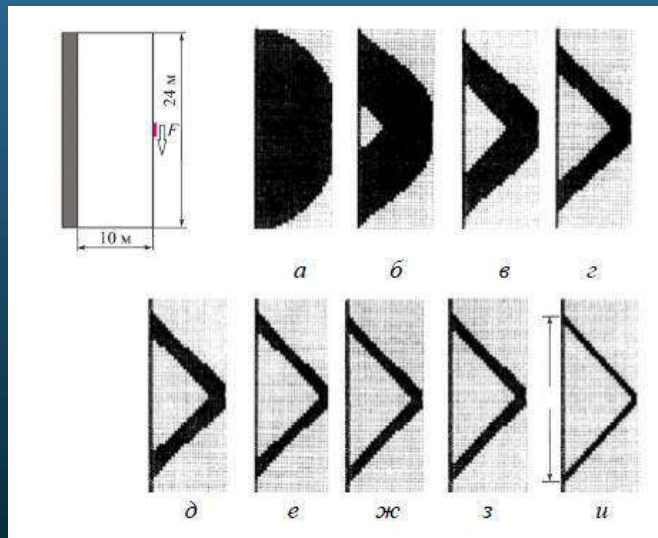


Послідовність завдань для топологічної оптимізації

- Формулювання вимог до конструкції
- Розробка концепції конструкції
- Структурна топологічна оптимізація
- Інженерний аналіз
- Остаточне доведення методом кінцевих елементів
- Аналіз остаточної оптимальної конструкції

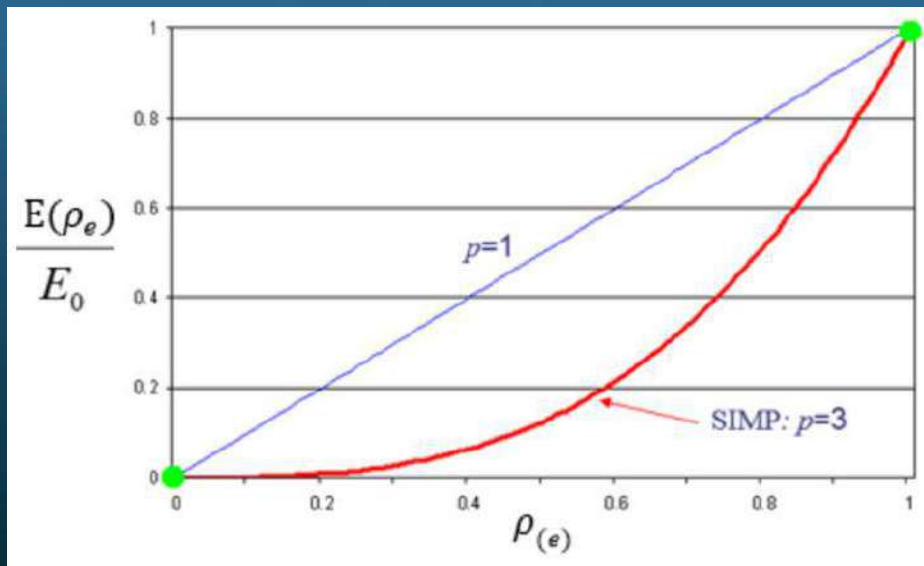
Методи топологічної оптимізації

ESO/BESO (метод еволюційної оптимізації конструкцій/
двобічної еволюційної оптимізації конструкцій)



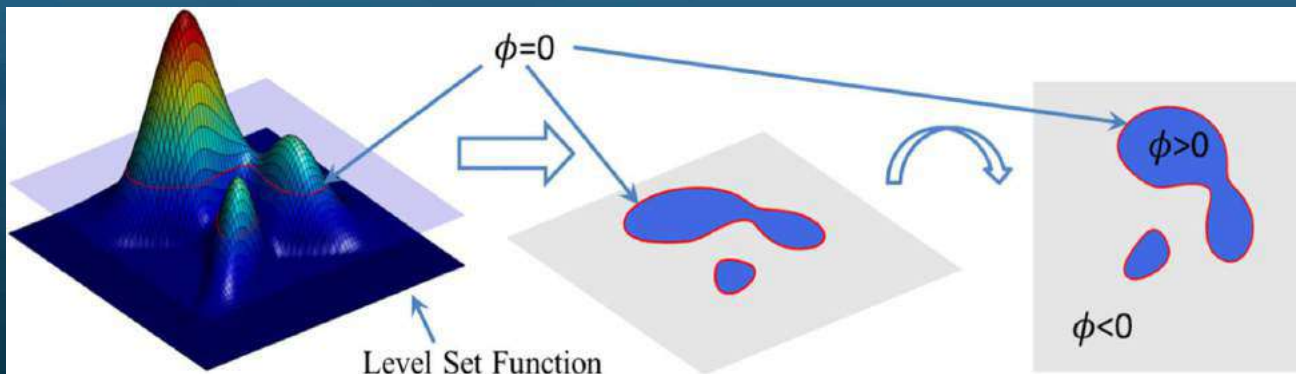
Методи топологічної оптимізації

SIMP (метод пеналізації для твердого ізотропного тіла)

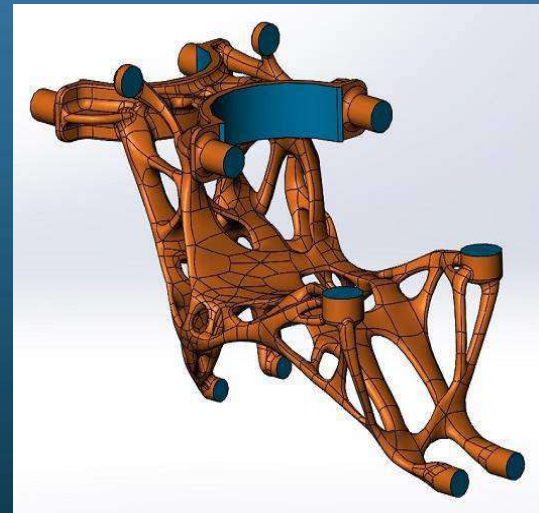
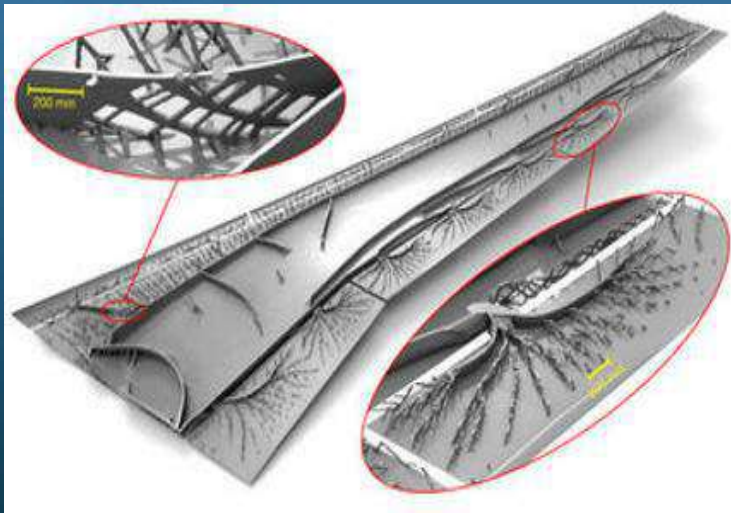
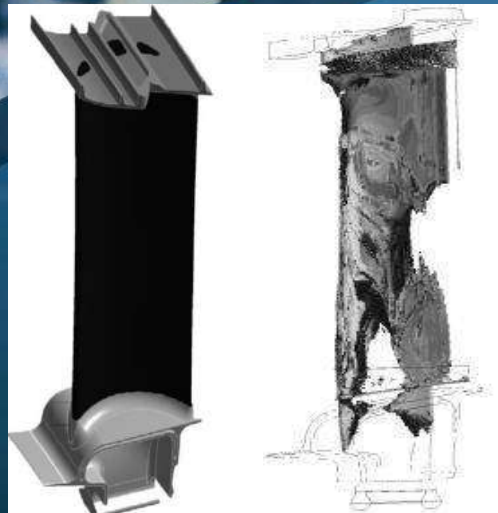


Методи топологічної оптимізації

Level-Set-метод (встановлення рівня або безлічі рівнів)



Приклади успішного застосування ТО при проектуванні деталей машинобудування



Адитивне виробництво як спосіб втілення результатів ТО





Обмеження при використанні адитивного виробництва

- властивості матеріалу
- обмежений вибір матеріалів
- точність та якість поверхонь деталей
- швидкість виготовлення
- відносно високі капітальні вкладення
- перебої друку
- трудомісткість процесу

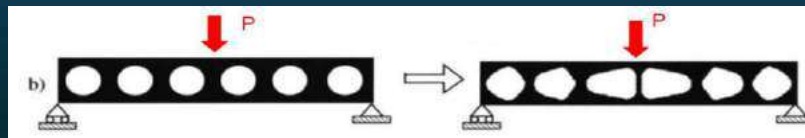
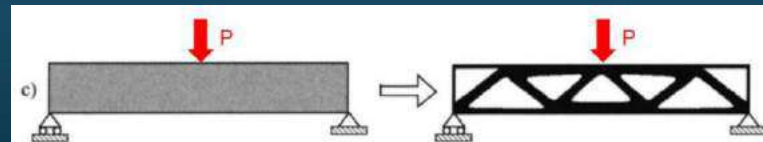
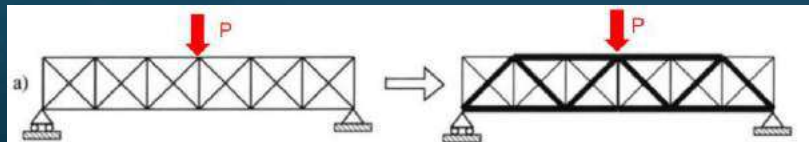
Види оптимізації

Оптимізація
конструкцій

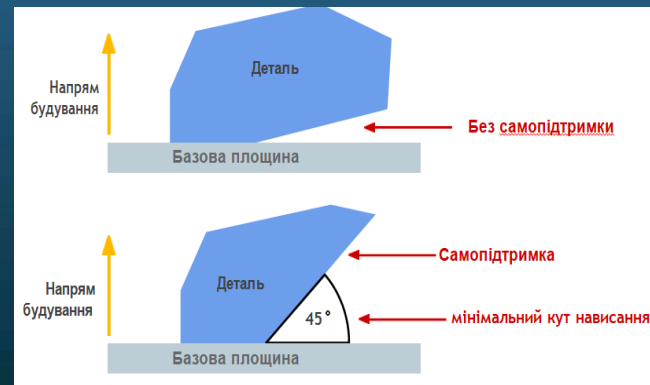
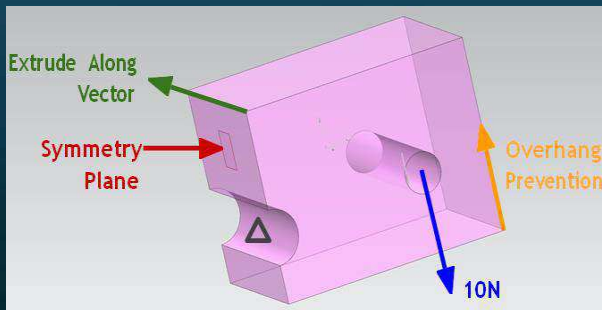
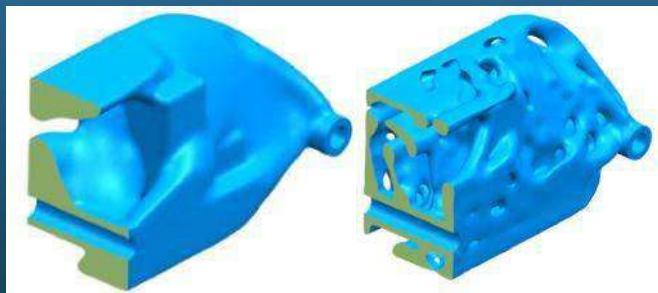
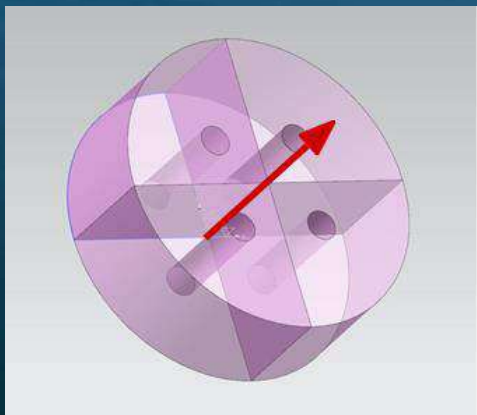
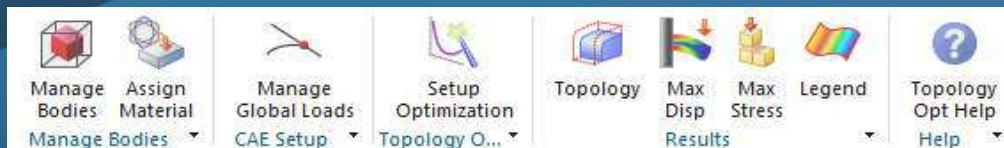
Оптимізація
розмірів

Оптимізація
форми

Оптимізація
топології

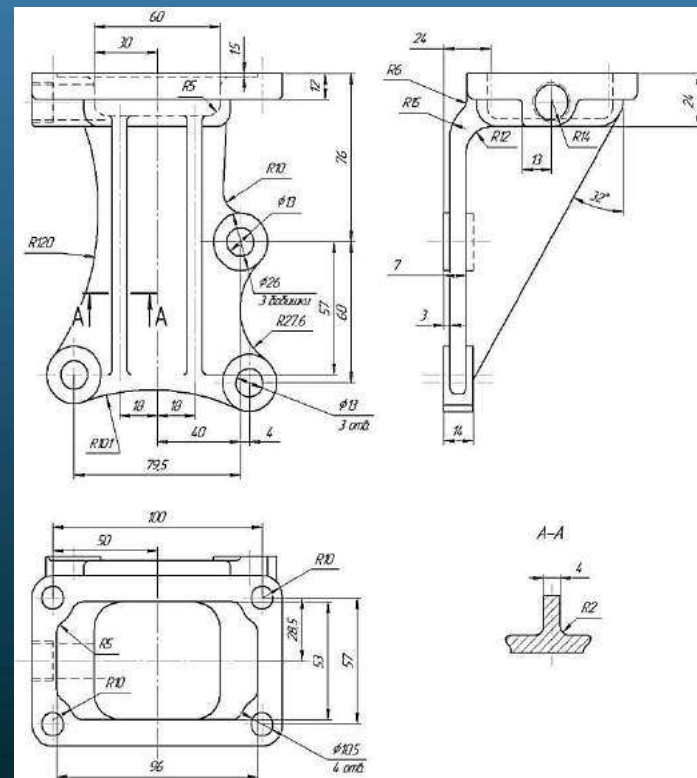


Модуль Siemens NX Topology optimization

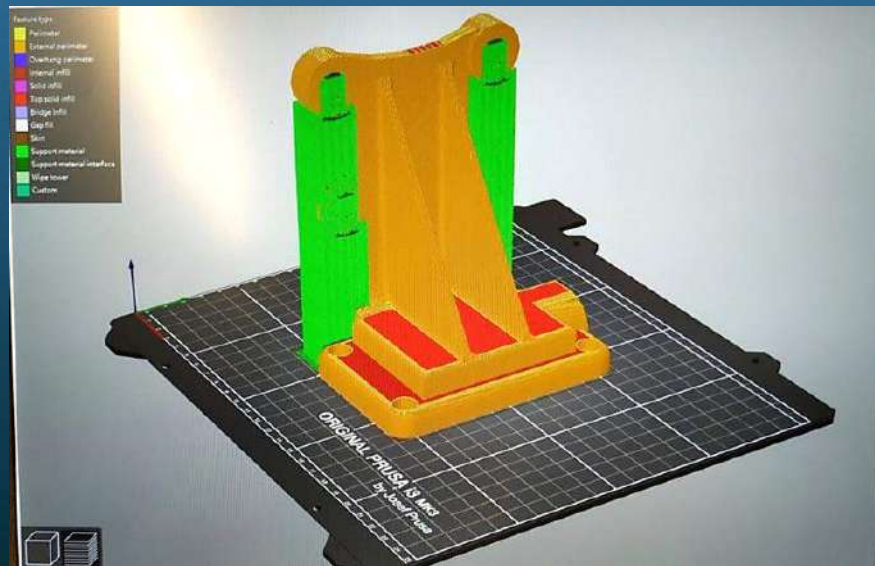


Параметри оптимізації

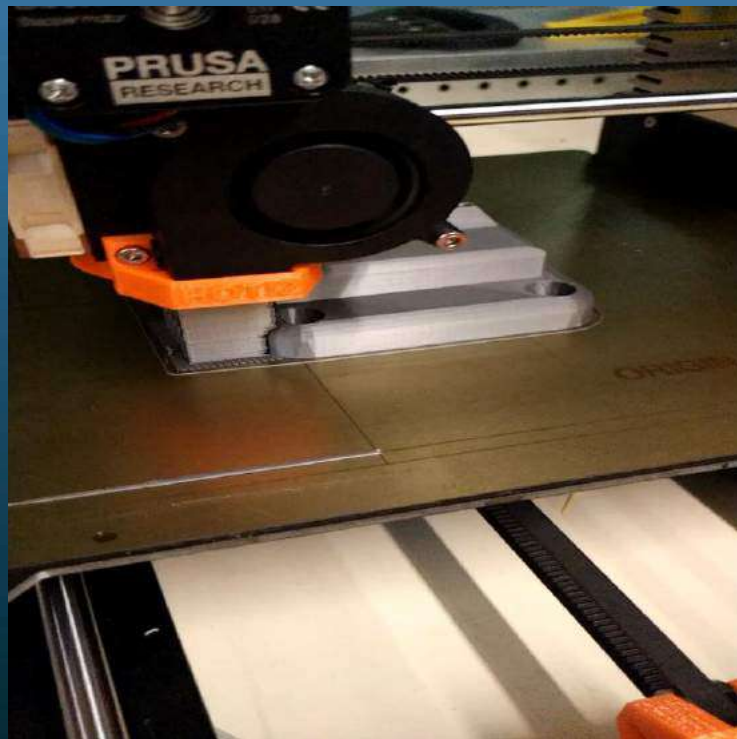
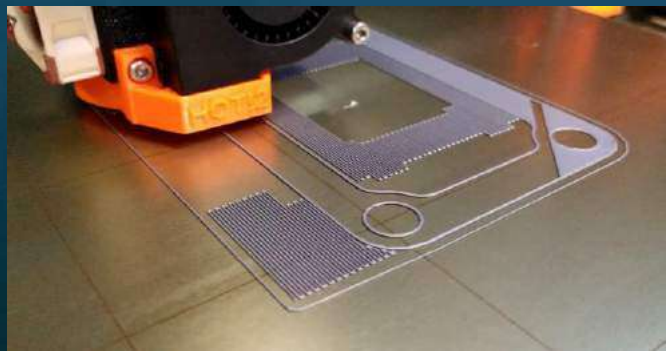
- Обмеження проектування – запобігання написання у напрямку $-Z$.
- Граничні умови:
 - закріплення деталі за $\varnothing 15$ та $\varnothing 16$ мм (бокові отвори),
 - штифтове закріплення за 3ма отворами $\varnothing 13$ мм та обмеженням за товщиною стінок 0,3 мм;
- Випадки навантаження - сила 100 Н на 4 отвори $\varnothing 10,5$ мм у напрямку $-Z$.



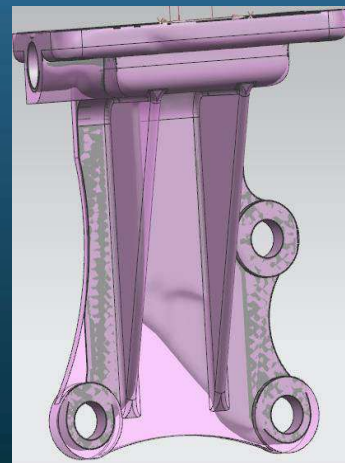
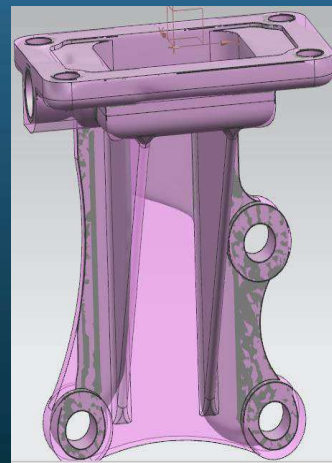
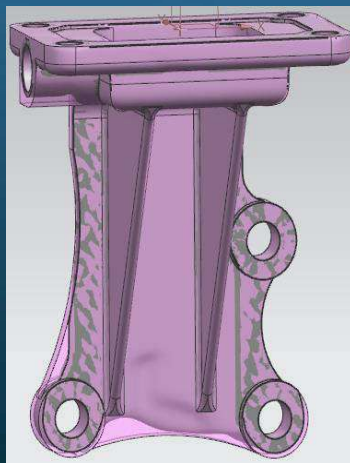
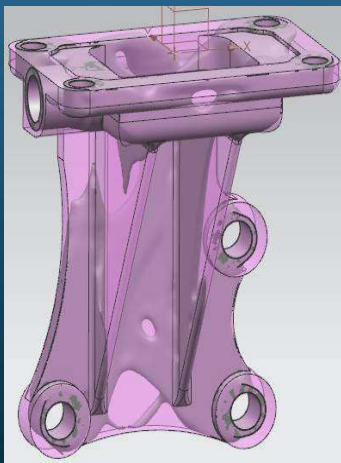
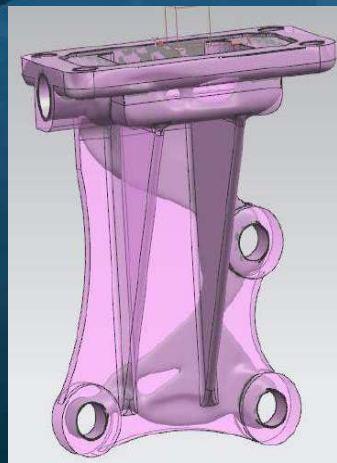
Програмне забезпечення для адитивного виробництва Prusa Slicer



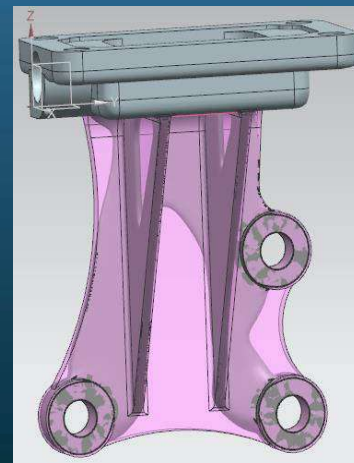
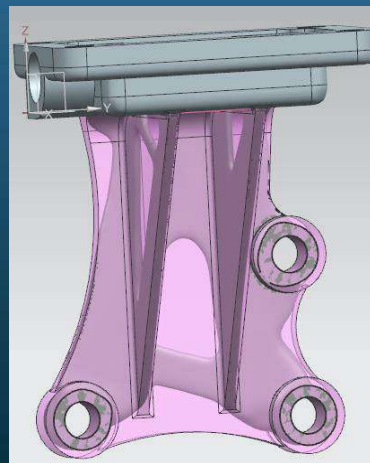
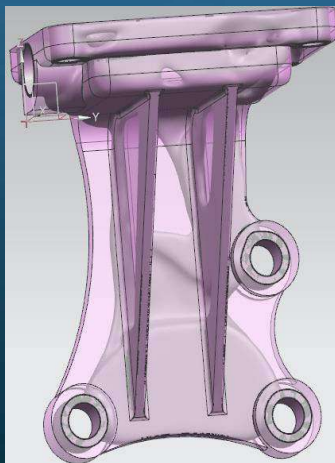
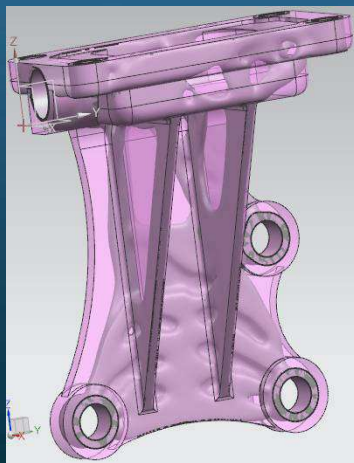
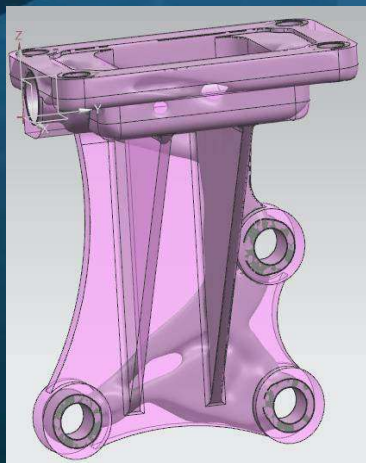
Друк деталі «Кронштейн»



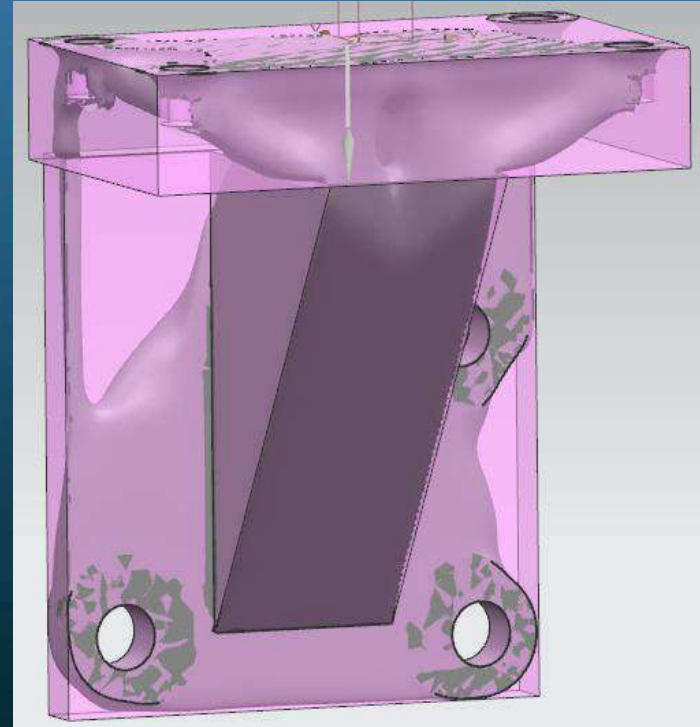
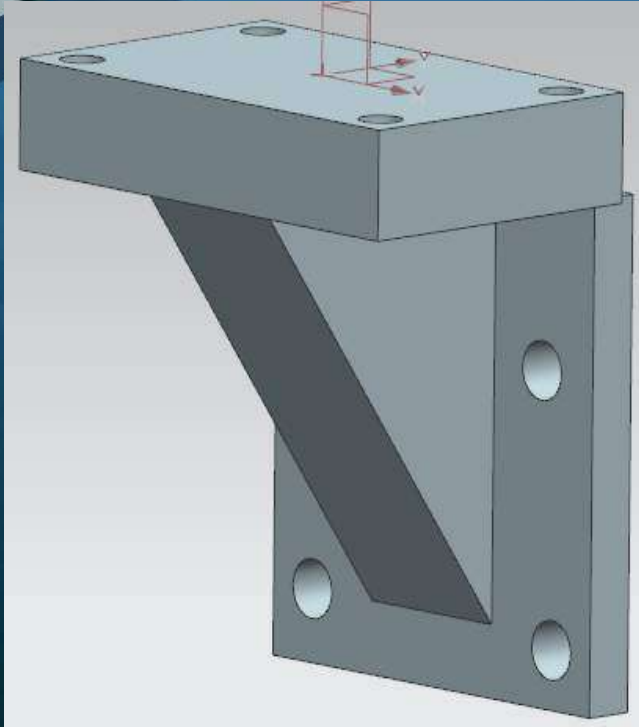
Результати оптимізації



Результати оптимізації

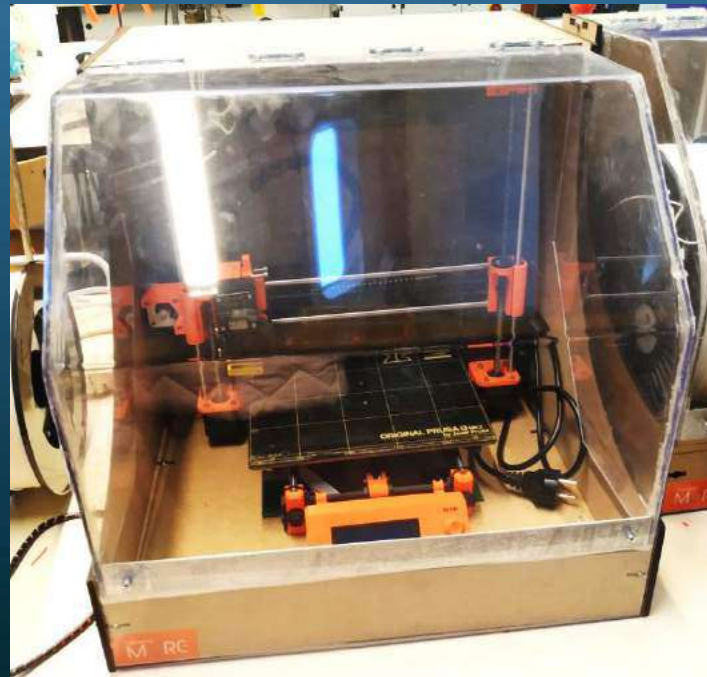


Оптимізація спрощеної деталі

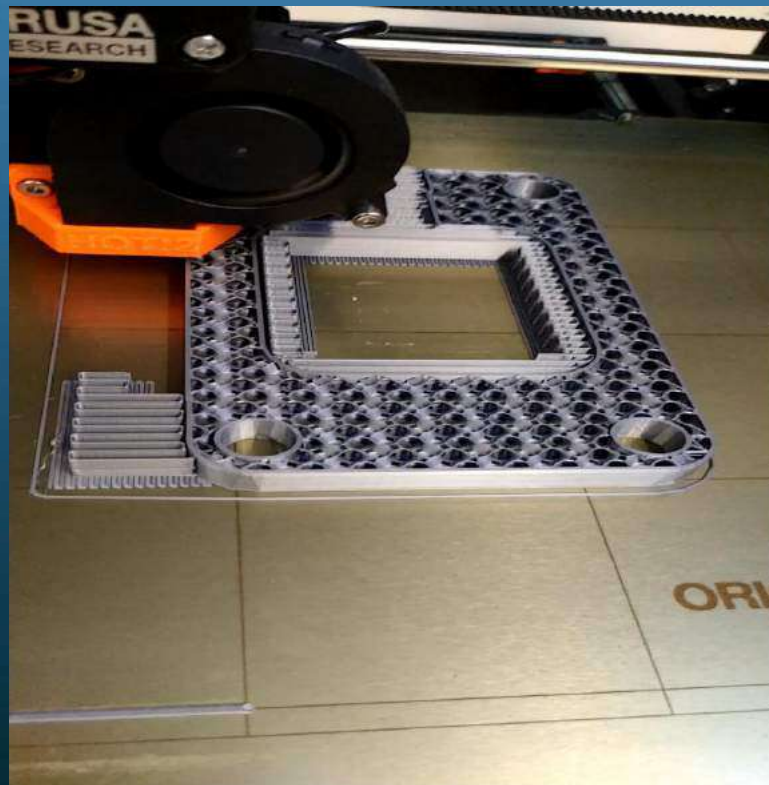
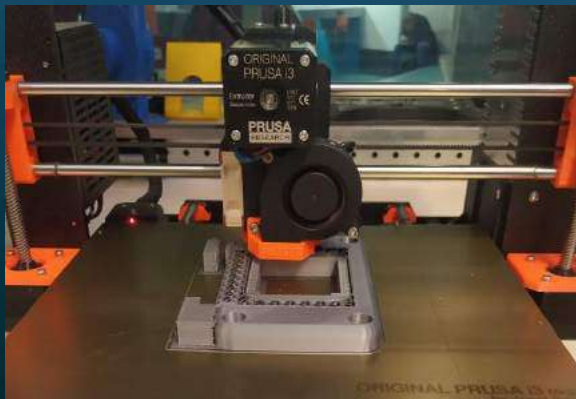
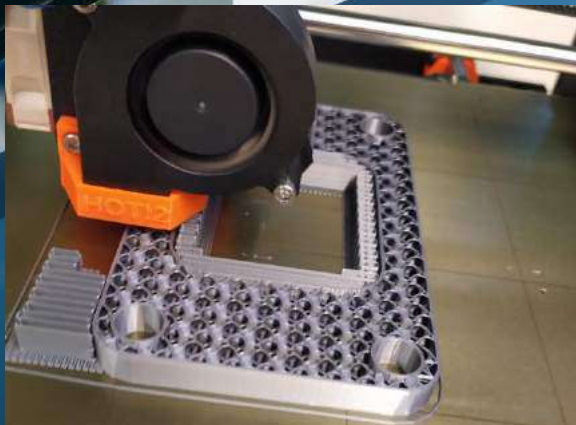


Параметри друку оптимізованої деталі в програмному забезпеченні Prusa Slicer

- Для друку використовують пластик PLA.
- Швидкість руху екструдера по периметру 45 мм/с.
- Швидкість руху екструдера по зовнішньому периметру 25 мм/с.
- Швидкість руху екструдера, друкуючого підтримки 50 мм/с.
- Швидкість холостого ходу екструдера 180 мм/с.
- Висота одного шару 0,15 мм.
- Діаметр PLA пластику, який подається до друку 1,75 мм.
- Густина PLA пластику 1,24 г/см³.
- Температура нагріву столу 60°C.
- Температура нагріву екструдера 215°C.



Друк оптимізованої деталі «Кронштейн»



A close-up photograph of a microscope's objective lens and eyepiece, showing the intricate mechanical details and the glass elements. The image is partially obscured by a dark blue diagonal band that runs across the slide.

Висновок

- ТО – новий підхід до проектування деталей машинобудівної галузі
- Зниження ваги при заданих обмеженнях
- Більш ефективне використання матеріалу
- Майже необмежене за складністю форми виготовлення деталей