

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ  
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему «Топологічна оптимізація елементів конструкції деталей машин»

Виконав: студент VI курсу групи Маш-62

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»  
(шифр і назва)

Володимир ВИТЯЗЬ  
(Ім'я та прізвище)

Керівник:

Ігор СТУКАЛЕЦЬ  
(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ  
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

д.т.н., професор Віталій ВЛАСОВЕЦЬ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**З А В Д А Н Н Я**

на кваліфікаційну роботу студенту  
**Витязю Володимирі Романовичу**

1. Тема роботи: **«Топологічна оптимізація елементів конструкції деталей машин»**

Керівник роботи: Стукалець Ігор Геннадійович, к. т. н., в. о. доцента

Затверджена наказом по університету від 28.04.2023 року № 133/к-с.

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 5.01.2024 року

3. Вихідні дані:

- довідкова література, ДСТУ, ISO;
- каталог продукції Parker Hannifin;
- деталь дослідження №1 – лівий рульовий трапецієвидний важіль мінітрактора DONGFENG 354/404, номінальне навантаження – 1,3 кН;
- деталь дослідження №2 – монтажний кронштейн гідроциліндра Parker Hannifin, каталожний номер – 1455310000, номінальна величина навантаження 12,5 кН.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Визначення та принципи топологічної оптимізації.

2. Методи топологічної оптимізації.

3. Реалізація топологічної оптимізації засобами САПР.

4. Топологічна оптимізація деталей машин в середовищі SolidWorks.

5. Результати топологічної оптимізації деталей машин в середовищі SolidWorks.

Висновки і пропозиції.  
Бібліографічний список.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу

- Презентація кваліфікаційної роботи у форматі PowerPoint (\*.pptx).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,3,4,5	Ігор СТУКАЛЕЦЬ, к. т. н., в. о. доц. кафедри машинобудування			

7. Дата видачі завдання: 28.04.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Визначення та принципи топологічної оптимізації»</i>	<i>1.05.23-12.05.23</i>	
2.	<i>Виконання розділу: «Методи топологічної оптимізації»</i>	<i>15.05.23-2.06.23</i>	
3.	<i>Виконання розділу: «Реалізація топологічної оптимізації засобами САПР»</i>	<i>5.06.23-14.06.23</i>	
4.	<i>Виконання розділу: «Топологічна оптимізація деталей машин в середовищі SolidWorks»</i>	<i>15.06.23-23.06.23</i>	
5.	<i>Виконання розділу: «Результати топологічної оптимізації деталей машин в середовищі SolidWorks»</i>	<i>1.09.23-10.11.23</i>	
6.	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентації роботи. Завершення роботи в цілому</i>	<i>13.11.23-5.01.24</i>	

Студент \_\_\_\_\_ Володимир ВИТЯЗЬ  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Ігор СТУКАЛЕЦЬ  
(підпис)

УДК 621.8

Топологічна оптимізація елементів конструкції деталей машин.

Витязь Володимир Романович – Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024.

Кваліфікаційна робота: 69 с. текст. част., 46 рис., 2 табл., 16 джерел.

У кваліфікаційній роботі розглянуто основні методи оптимізації топології конструкцій деталей машин. Доведено, що застосування топологічної оптимізації під час проектування виробів та використання її використання поряд з новими технологіями виробництва дозволяє значно покращити питомі характеристики вузлів та виробів у цілому, а також суттєво зменшити витрату матеріалів, що використовуються для їх створення.

Виконано топологічну оптимізацію конструкції лівого рульового трапецієвидного важеля мінітрактора *DONGFENG 354/404* та монтажного кронштейна гідроциліндра *Parker Hannifin*, що дало змогу зменшити масу цих деталей на 53% та 50% відповідно.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1. ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПРИНЦИПИ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ .....	8
1.1. Мета і задачі топологічної оптимізації .....	8
1.2. Історія топологічної оптимізації .....	9
1.3. Сучасні напрямки в теорії топологічної оптимізації.....	9
2. МЕТОДИ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	11
2.4. Проблеми, труднощі й недоліки топологічної оптимізації.....	18
2.5. Сфери застосування топологічної оптимізації.....	19
2.6. Методи виробництва.....	20
3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАСОБАМИ САПР.....	23
3.1. Огляд програмного забезпечення для задач топологічної оптимізації..	23
3.2. Метод SIMP для оптимізації топології в середовищі <i>SOLIDWORKS</i> ....	29
4. ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В СЕРЕДОВИЩІ <i>SOLIDWORKS</i> .....	36
4.1. Загальна послідовність процесу топологічної оптимізації в <i>SOLIDWORKS</i> . .....	36
4.2. Цілі та обмеження .....	39
4.3. Обмеження.....	40
4.4. Виробничий контроль.....	41
4.5. Експорт згладженої сітки .....	47
4.6. Параметри топології .....	47
5. РЕЗУЛЬТАТИ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ В СЕРЕДОВИЩІ <i>SOLIDWORKS</i> .....	50

5.1. Топологічна оптимізація рульового важеля <i>DONGFENG 354/404</i> .....	50
5.2. Топологічна оптимізація монтажного кронштейна гідроциліндра <i>Parker Hannifin</i> .....	58
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ .....	67
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК .....	68

2023

-62

## ВСТУП

Зниження маси та збільшення питомої міцності конструкцій, що використовуються в машинобудівній галузі, – найважливіші завдання, які стоять сьогодні перед конструкторами всього світу.

Вирішення цих проблем безпосередньо пов'язане із завданням пошуку оптимальних геометричних параметрів виробу, що проектується. В даний час для вирішення цього завдання використовуються методи топологічної оптимізації. Застосування методик оптимального проектування дозволяє знайти найкращі параметри конструкції, що задовольняють технологічні і обмеженням міцності, забезпечуючи, таким чином, мінімум цільової функції.

Застосування методів топологічної оптимізації в аерокосмічній промисловості є щодо новим компонентом процедури проектування. Найбільший поштовх у своєму розвитку вони отримали у разі можливості використання у виробництві адитивних технологій замість класичних субтрактивних виробничих методів. Адитивні технології дозволили розширити область конструктивних виконань того самого виробу.

Для деталей, що застосовуються в машинобудуванні, основними завданнями топологічної оптимізації (ТО) можуть бути як мінімізація обсягу/маси при міцності обмеження, так і оптимізація інших параметрів з обмеженнями за об'ємом.

# 1. ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПРИНЦИПИ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

## 1.1. Мета і задачі топологічної оптимізації

Поняття оптимізації конструкцій включає три тісно пов'язані, але різні за своєю постановкою та вирішенням проблеми: оптимізації розмірів, форми та топології структур.

Топологічна оптимізація (ТО) – це оптимізація розподілу матеріалу у проектній області при впливі на неї заданих навантажень та використанні обмежень різного роду: геометричних, міцнісних, жорстких та ін. ТО є видом оптимізації форми конструкції, що іноді називається оптимізацією компоновання.

Метою ТО є визначення оптимального розподілу матеріалу в області проектування при заданих навантаженнях із задоволенням критеріїв оптимізації, інакше кажучи, визначення кращого використання матеріалу для об'єкта або конструкції, що досліджується, так, щоб цільова функція параметра мала максимальне або мінімальне значення за наявності існуючих обмежень. На відміну від традиційної оптимізації, топологічна оптимізація не вимагає вказівки параметрів оптимізації (тобто незалежних змінних, що піддаються оптимізації) у явному вигляді. У топологічній оптимізації параметром

Оптимізація є функція розподілу матеріалу за обсягом конструкції. Таким чином, основною особливістю завдань оптимізації розмірів є те, що область проектування відома заздалегідь і вона фіксована в процесі оптимізації, а змінною проектування є сама форма.

Останні два десятиліття топологічна оптимізація стала активним полем для досліджень. Це призвело до мультидисциплінарності сучасних методів ТО та використання їх під час вирішення завдань механіки твердого тіла, гідродинаміки, теплодинаміки, біології і т.д.

З погляду реалізації програмного забезпечення оптимізація топології була вбудована модуль більшості комерційних *CAD/CAE*-систем, таких як

*OptiStruct* від *Altair Hyper-Works*, а також модуль *SIMULIA Tosca*, що застосовується в *Abaqus*, *ANSYS* та *MSC Nastran* [6-9].

## 1.2. Історія топологічної оптимізації

Сама ідея структурної оптимізації, тобто можливості розумно економити матеріал, з'явилася на початку XX століття. Першу, піонерську роботу в 1904 написав Мітчелл. У контексті чисельних методів структурної оптимізації вперше почали говорити одночасно з появою методу кінцевих елементів, тобто у 1960-ті роки.

А перше завдання оптимального проектування механічних систем була складена та вирішена Лагранжем. Це було завдання про мінімум ваги колони, що стискається прикладеною до її вільного кінця силою.

Найцікавіші ідеї топологічної оптимізації з'явилися в 1980-і роки, і на їх основі були розроблені добрі, закінчені теорії.

Але справжній сплеск інтересу до цієї теми почався разом із широким поширенням тривимірного друку. Оптимізувати структуру лише півсправи, адже її треба ще й реалізувати. А якщо оптимальна структура настільки складна, що її не дозволяє зробити жоден верстат із числовим програмним управлінням? Саме тут на допомогу приходять 3D-друк. На рубежі 2000-2010-х років закінчилися деякі ключові патенти на технології, пов'язані з 3D-друком. Після цього вона стала розвиватися експоненційно, і, як наслідок, усі згадали про топологічну оптимізацію. Завдяки цьому з'явився інструмент, що дозволяє друкувати змодельовані структури.

## 1.3. Сучасні напрямки в теорії топологічної оптимізації

Топологічна оптимізація сама по собі – підрозділ теорії оптимізації, але з деякою специфікою, пов'язаною з її розвитком у щільному контексті практичних додатків. У цій галузі працюють інженери, яким важливим є практичний результат. Якщо вони отримали конструкцію легше на 5%, що має ту ж жорсткість і міцність, що й попередня, – це і є їх результат. Але також топологічну оптимізацію вивчають чисті математики та обчислювачі, яких цікавить саме теоретична, а не інженерна сторона питань.

У математичних методів оптимізації теж є характеристики, які дозволяють оцінити їхню ефективність: наскільки швидко вони сходяться, наскільки стійкі, наскільки складні форми та топології дозволяють отримати. Тут розвивається абстрактна теорія про існування та єдиності таких рішень. На даний момент з математичної сторони, принаймні у плані чистого варіаційного обчислення, теорія більш-менш завершено, досить зрозумілі всі основні формулювання оптимізації форми та оптимізації топології, їх властивості та способи вирішення.

Активно розвиваються галузі, пов'язані з методами швидкої оптимізації. Однієї математичної постановки недостатньо: треба реалізувати цю постановку та навчити комп'ютер швидко вирішувати завдання. І в цій галузі зараз зосереджено дуже великі зусилля як теоретичного, так і технічний характер. Як створити паралельний алгоритм оптимізації для розподілених обчислень? Як зменшити кількість ступенів свободи? У чисельному рішенні рано чи пізно все зводиться до системи лінійних рівнянь, яку теж треба якось вирішувати. По можливості вона має якось зручно вирішуватись – не методом Гауса, який вимагає кількість операцій, пропорційне кубу числа невідомих, а швидше. У цій галузі зараз зосереджено основні зусилля математиків-прикладників.

Один із цікавих трендів останніх років – використання топологічно оптимальних конструкцій у дизайні та архітектурі. Це робиться не з бажання заощадити, а скоріше з естетичних міркувань. Топологічна оптимізація зазвичай призводить до конструкцій, схожих на природні структури - гладким, без концентрації напружень, те, що називають біонічним дизайном (*bionic design*). Ще один модний напрямок – топологічна оптимізація у природі, зокрема неживої. Це природні процеси, які еквівалентні математичної оптимізації. Ці результати активно популяризуються серед інженерів. Адже й сьогодні далеко не всі з них знають про існування топологічної оптимізації [6-9].

## 2. МЕТОДИ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

В даний час відомі такі основні методи ТО: *SIMP* (твердий ізотропний матеріал з пеналізацією), *ESO* (еволюційна структурна оптимізація) та *Level-Set* (метод встановлення рівня) та їх різні комбінації. Дані методи мають особливості, але водночас тісно пов'язані між собою.

### 2.1. *ESO/BESO*-метод

Методи еволюційної оптимізації конструкцій (*Evolutionary Structural Optimization – ESO*) та двоспрямованої еволюційної оптимізації конструкцій (*Bi-directional Evolutionary Structural Optimization – BESO*) інтенсивно вивчаються та розвиваються останніми роками.

Найефективніше застосування цих методів під час оптимізації топології безперервних структур, тобто. при знаходженні найкращого розміщення та 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.

*ESO*-метод спочатку запропонований у 1992 р. професорами *Mike Xie* та *Grant Steven*. *ESO* класифікується як метод жорсткого знищення, який ітераційно видаляє або додає кінцеву кількість матеріалу. Використовуються евристичні критерії, які можуть бути засновані на чітко визначеній інформації про чутливість. Таким чином, *ESO* відносно простий у реалізації, що є перевагою для задач оптимізації топології з участю складних фізичних процесів.

Метод *ESO* заснований на визначенні рівня напруги у довільній частині конструкції методом кінцевих елементів. Індикатором неефективного використання матеріалу є низький рівень напружень (або деформацій) у тій чи іншій частині конструкції.

В ідеалі рівень напруження в конструкції повинен бути однаковим, близьким до граничного, але безпечного значення.

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

Рівень напруженості кожного елемента визначається порівнянням, наприклад напруги Мізеса цього елемента  $\sigma_e^{vm}$  з критичним або максимальним значенням напруги Мізеса в конструкції  $\sigma_{max}^{vm}$ . Якщо результати кінцево-елементного аналізу елемент задовольняє умові

де  $R_R$  – граничне значення (коефіцієнт відбраковування), при якому елемент видаляється.

Цикл аналізу кінцевих елементів та їх видалення повторюється для кількох ітерацій з використанням однієї й тієї ж порогового ставлення до досягнення стійкого стану, тобто. відсутності елементів, які задовольняють цього порога видалення. Потім коефіцієнт відбраковування може бути збільшений відповідно до певного коефіцієнта еволюції  $H_i$ :

Далі зі збільшеним коефіцієнтом відбраковування цикл проводиться до досягнення нового стаціонарного стану. Ітераційний процес триває, доки не буде досягнуто бажаний результат (наприклад, поки весь матеріал з тих областей, де рівень напруженості не перевищує 25% максимального, не буде видалений).

Розглянемо конструкцію рами (рис. 2.1). Початкова конструкція є плитою заданих розмірів. Оптимальне рішення при розв'язку задачі оптимізації консольної рами у вигляді двостержневої рами одержано за 30 ітерацій, при  $R_{Ri} = 1...30\%$  (рис. 2.1, a-i).



Рисунок 2.1 – Реалізація методу ESO на прикладі оптимізації консольної рами

Кількісною оцінкою зміни жорсткості (або податливості) конструкції в результаті видалення  $i$ -го кінцевого елемента є індекс чутливості, який визначається для середньої податливості як

$$S_i = \frac{1}{u_i} \frac{du_i}{dK_i}$$

де  $u_i$  – вектор вузлового зміщення  $i$ -го елемента;

$K_i$  – матриця жорсткості елемента.

Функція чутливості вказує на збільшення середньої податливості в результаті видалення  $i$ -го елемента, що дорівнює елементарній енергії деформації  $i$ -го елемента. Для мінімізації середньої податливості (тобто максимізації жорсткості) у вигляді видалення елементів необхідно виключати елементи з мінімальним значенням коефіцієнта чутливості.

Математична основа методу *ESO* досить проста та зрозуміла, а його програмна реалізація не вимагає складних прийомів програмування, він однаково застосовується до *2D*- та *3D*-задач. Видалення елемента проводиться присвоєнням його нульового модуля значення, що призводить до його ігнорування при наступних ітераціях (при подальшому обчисленні глобальної матриці жорсткості). У міру видалення елементів в ітераційному процесі

кількість рівнянь зменшується, знижуючи обчислювальну трудомісткість завдання, що особливо важливо для 3D-задач.

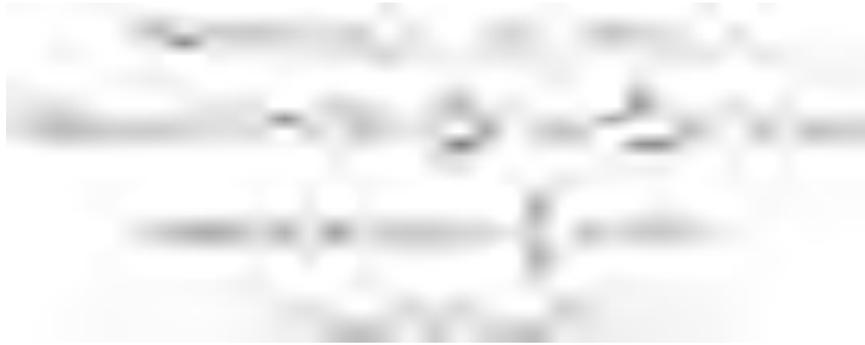
Однак видалений на ранніх ітераціях матеріал може бути корисним на наступних, але метод ESO не дозволяє відновити його. Таким чином, у ряді випадків він не дозволяє отримати оптимальне рішення. Ці недоліки значною мірою усуваються у методі BESO.

Метод BESO (або метод двоспрямованої еволюційної оптимізації конструкцій) дозволяє одночасно видаляти та додавати матеріал у галузі проектування. Принципова відмінність даного методу від ESO полягає в тому, що індекс чутливості порожніх елементів визначається шляхом лінійної екстраполяції поля усунення, одержуваного в результаті кінцево-елементного аналізу. Після цього заповнені елементи з мінімальними значеннями індексу чутливості видаляються із структури, а порожні елементи із найбільшими значеннями чутливості заповнюються матеріалом. Кількості елементів, що видаляються і додаються, на кожній ітерації визначені двома незалежними один від одного параметрами: ставленням видалення  $R_R$  і ставленням включення  $R_I$ .

Незважаючи на те, що методи ESO/BESO досить прості у реалізації, практично відсутня реалізація методу ESO для вирішення задач оптимізації топології, орієнтованих на виробництво [6-9].

## 2.2. SIMP-метод

Цей метод гібридної топології під назвою *ESO-SIMP* націлений на об'єднання розглянутих раніше методів *ESO* та *SIMP*. При цьому як розрахункові змінні беруться відносні щільності елементів, а в якості цільової функції вибирається середня відповідність. Потім задача оптимізації для мінімальної середньої відповідності на основі алгоритму *ESO-SIMP* може бути записана у вигляді



Різниця між методами *ESO-SIMP* та *SIMP* – в обмеженні об'єму. У процесі кожної ітерації елементи, відносна щільність яких менша або дорівнює коефіцієнту відбраковування, видаляються з області розробки, а всі елементи, що залишилися, вводяться в наступну ітерацію. Загальний обсяг всіх елементів  $V$ , що залишилися, повинен задовольняти наступній умові:

$$V' \leq V$$

де  $m$  – кількість всіх елементів, що залишилися.

Однак  $V$  не є реальним повним об'ємом елементів, що залишилися, виражається як

$$V' = \sum_{i=1}^m V_i$$

Коли виконується обмеження об'єму, реальний загальний об'єм всіх елементів  $V'$ , що залишилися, більше, ніж  $V$ , через проміжну відносну щільність, що є не вигідним для ТО. Таким чином, у процесі оптимізації має контролюватись реальний загальний обсяг всіх елементів  $V$ , що залишилися.

Виявлено, що новий метод *ESO-SIMP* має безліч переваг у порівнянні з методом *ESO* та методом *SIMP* з точки зору ефективності та надійності.

### 2.3. *Level-Set* -метод

Цей метод гібридної топології під назвою *ESO-SIMP* націлений на об'єднання розглянутих раніше методів *ESO* та *SIMP*. При цьому я основна ідея методу *Level-Set* (встановлення рівня чи безлічі рівнів) полягає у тому, щоб виразити криву або поверхню у неявному вигляді. При цьому вони

приймаються як встановлений нульовий рівень багатовимірної функції. Потім простежується їх деформація за допомогою цієї функції.

Наприклад, оптимізація топології структури криві або поверхні, що зображують її межі деформуються, щоб мінімізувати енергію пружної деформації.

Для заданої області  $\Omega$  з гладкою межею передбачається існування неявної функції  $\varphi(x)$ , яка відповідає умовам

Двома функціями, що найчастіше використовуються в методі Level-Set, є функція Хевісайда  $H(\varphi)$

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

Для функції  $f$  об'ємне та поверхневе інтегрування по границі можна виразити у вигляді

З обчислювальної точки зору згладжена функція Хевісайду краще у процесі оптимізації.

Функція встановлення рівня є рівнянням типу Гамільтона-Якобі:

де  $v_n$  – нормальна швидкість кордонів, що рухаються.

Завдання оптимізації топології конструкції з обмеженою площею при мінімізації податливості можна описати так:



де область проектування представлена  $\Omega$ ;

$E$  – розрахункова змінна, яка визначається поверхнею рівня

$$E(\varphi) = E_0 H(\varphi) + (1 - H(\varphi)) E_{min},$$

де  $E_0$  – модуль пружності матеріалу;

$E_{min}$  – мінімальний модуль пружності;

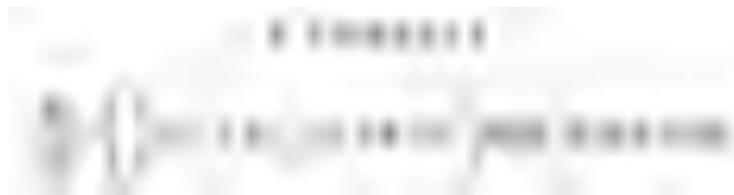
$D$  – матриця пружності;

$V^*$  – допустимий об'єм матеріалу.

Рівняння лінійної пружної рівноваги використовується для обчислення поля розміщення дислокації  $u$ , деформації тензора  $\varepsilon$  і тензора напружень  $\sigma$ .

Завдання оптимізації може бути вирішене з використанням методу критеріїв оптимальності, послідовного методу лінійного програмування або методу, що рухається асимптоти.

Шляхом варіації цільового функціоналу завдання мінімізації у двовимірному випадку формулюється як пов'язане завдання лінійної пружності та рівняння дифузії:



де  $\alpha$  – коефіцієнт демпфування, що стабілізує алгоритм розв'язку [2, 6-9, 11, 12].

## 2.4. Проблеми, труднощі й недоліки топологічної оптимізації

Усі перелічені способи оптимізації мають подібні проблеми: проблему «шахової дошки», тобто. утворення в тілі конструкції не пов'язаних обсягів матеріалів, залежність від сіткового розбиття та проблему локального мінімуму.

Проблема «шахової дошки» виявляється у тому, що схема оптимізованої моделі має розриви суцільності та незв'язані «острівці» матеріалу. Для боротьби з цією проблемою автори пропонують різні схеми фільтрації.

Залежність від сіткового розбиття полягає в тому, що використання різних кінцевих елементів сіток призводить до різних «оптимальних» топологій. Ця проблема у ряді робіт була подолана з використанням методу керованого периметра та схем фільтрації чутливості. Але в загальному випадку проблема розбиття кінцевих елементів сіток до досі не вирішена.

Також слід зазначити, що згадані вище проблеми частково знайшли своє рішення у методі двоспрямованої еволюційної оптимізації конструкцій – *BESO*, який передбачає аналізувати кожної ітерації напружений стан кінцевих елементів. В результаті цього відбувається видалення менш навантажених елементів та додавання елементів, заповнених матеріалом, в області, напружений стан яких вищий за деяке значення.

Є деякі проблеми оптимізації топології, про які потрібно знати, щоб використати її ефективно. Розглянемо, що вони являють собою.

### ***Виробничі обмеження***

Конструкції, які пропонує ТО, можуть бути складними у виготовленні. Враховуючи, що адитивне виробництво досить гнучке з точки зору того, що він може виробляти, все ж таки необхідно перевірити технологічність до остаточного доопрацювання конструкції.

Якщо вирішувати проблему оптимізації топології, думаючи лише про функції, можливі невдачі, коли йдеться про якість та ефективність складання.

Варто зазначити, що кілька розробників програмного забезпечення пропонують функцію, яка називається виробничими обмеженнями для ОП.

Таким чином, можна створювати деталі, які виробляють лише з використанням звичайних методів.

### ***Висока ціна***

Останнім часом вартість адитивне виробництво знизилася, але вона, як і раніше, на сходинок вища за традиційні методи виробництва. Важливо розглядати співвідношення витрат та вигод у кожному конкретному випадку. Для виробництва можливе виготовлення прес-форм для лиття під тиском. Тому можна піти далі, ніж 3D-друк для створення пластикових деталей.

Для включення або виключення кількох компонентів адитивне виробництво може виявитися дорогим, що в більшості випадків є стримуючим фактором, оскільки інвестиції занадто високі. У таких випадках буде вигідніше передати виробництво компанії, яка надає послуги 3D-друку.

## **2.5. Сфери застосування топологічної оптимізації**

Багато галузей в даний час звертають увагу на передові методи проектування, такі як оптимізація топології та генеративний дизайн. Хоча виробництво деталей з цими технологіями може бути дорожчим, вони мають важливі переваги. Аерокосмічна, медична та автомобільна галузі промисловості зараз найчастіше потребують використання цих методів математичного моделювання.

Оптимізація топології допомагає детально проаналізувати компоненти літака, щоб відсікти непотрібну масу компонентів. Це означає, що літак може перевозити більше вантажу (або витратити менше палива) за той самий рейс.

Ті ж переваги можна застосувати до супутників і ракет. Цей математичний метод допомагає зменшити опорні конструкції та створити більш легкі деталі, зберігаючи при цьому їхню початкову міцність.

В галузі медицини оптимізація топології дозволяє створювати високоефективні імплантати та протези. Використовуючи алгоритм, можна створювати деталі, що імітують щільність та жорсткість кісток пацієнта. Крім того, він враховує анатомію пацієнта, рівень активності спроектованої частини та прикладене навантаження. Оптимізація покращує межу витривалості

деталі. Там, де це можливо, алгоритм замінює суцільну структуру ґратами. Це зниження ваги є великою перевагою для імплантатів/протезів.

Деякі виробники автомобілів в даний час використовують для проектування конструкцій (шасі), а також компонентів машин. Ця технологія допомогла зменшити масу каркасу при збереженні (а в деяких випадках навіть покращенні) загальної міцності вихідного продукту.

Зараз, крім композитів та клеїв, сталь знаходить все більше застосувань завдяки можливості створення складних ґратчастих структур із використанням адитивного виробництва.

Наприклад, *BMW*, для демонстрації перспектив технології, зробила концепт-байк на основі *S1000RR*, але з легкою 3D-друкованою металеву рамою (рис. 2.2). Якщо говорити про більш утилітарні застосування, *BMW* вже використовує 3D-друк у виробництві «Роллс-Ройс» і родстерів *i8*.



Рисунок 2.2 – Концепт-байк *BMW* з легкою 3D-друкованою металеву рамою

## 2.6. Методи виробництва

Оптимізація форми топології може створювати складні конструкції, які мають найкраще співвідношення жорсткості та ваги за мінімального

використання матеріалу. Вони можуть бути виготовлені з використанням адитивних, так і субтрактивних виробничих процесів.

Адитивне виробництво дійсно дає проєктанту більшу свободу, але коли йдеться про плоскі вироби, удосконалені субтрактивні методи виробництва можуть так само ефективно створювати деталі зі складною геометрією.

Кожен метод накладатиме різні виробничі обмеження на топологію та геометрію елементів, а також на те, як відбуватиметься виробничий процес при їх створенні. Деякі ефективні методи, які можуть робити ці інноваційні рішення:

### ***3D-друк***

3D-друк відіграв важливу роль у приверненні уваги до оптимізації топології. Без адитивних процесів практично неможливо створювати складні структури, розроблені за допомогою багатьох інших методів оптимізації, особливо генеративного проектування, на додаток до топологічної оптимізації.

3D-друк пропонує швидкий та ефективний спосіб створення топологічно оптимізованих продуктів з мінімальними втратами або без них. 3D-друк має багато переваг і дуже мало обмежень. Одним із обмежень 3D-друку є те, що з нею можна використовувати лише кілька металів, оскільки спочатку вона була розроблена для пластику.

### ***Обробка на верстатах з ЧПУ***

Оскільки використання ОТ стало широко поширеним, були зроблені зусилля з інтеграції в комп'ютерні програми функцій, що дозволяють створювати ці компоненти традиційними методами виробництва. Оскільки ВІД створює порожнисті конструкції з опорними елементами нерівномірної товщини, важко використовувати обробку з ЧПУ для складних компонентів. Але для моделей, у яких візуальна здатність повністю перекривається з Vmap (карта видимості), деталь можна виготовити на устаткуванні з ЧПУ.

Видимість – це концепція, визначена у виробництві розуміння можливості конкретного процесу створювати певну деталь. У практичних процесах деталь називається видимою, якщо жодна точка її поверхні не прихована від напрямів процесу. Зайве говорити, що 5-осьовий верстат із ЧПУ зможе виготовляти вироби більшої складності, ніж 3-осьовий верстат із ЧПУ.

### *Лазерне різання*

Лазерна обробка також може використовуватися як виробничий процес для продуктів ВІД. Цим методом зручно вирізати складні форми із високою точністю. Лазерне різання може використовуватися для декількох різних матеріалів (метали, дерево, акрил, МДФ), що робить її кориснішою, коли можливе субтрактивне виробництво деталі ОТ [1, 6-9, 11-12].

### 3. РЕАЛІЗАЦІЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАСОБАМИ САПР

#### 3.1. Огляд програмного забезпечення для задач топологічної оптимізації

За всіма вищевикладеними чисельними методами існують різні набори та пакети прикладних програм. Однак можливістю топологічної оптимізації конструкцій мають, в основному, пакети, в яких реалізовано метод кінцевих елементів (МКЕ). Нижче наведено огляд програмного забезпечення, за допомогою якого можна проводити топологічну оптимізацію.

- Siemens *NX* (рис. 3.1). *NX* — універсальна комплексна система для проектування, інженерних розрахунків та підготовки керуючого коду для верстатів з ЧПУ - *CAD*, *CAE* та *CAM*. Топологічна оптимізація в рамках модуля *NX CAE* орієнтована на взаємодію деталей у *CAD*-складання. У робочий простір міститься деталь підлягає оптимізації, до неї приєднуються інші, які не будуть порушені процесом, але беруть участь у взаємодії. Вказівка кріплень і прикладених навантажень проводиться саме в рамках складання.



Рисунок 3.1 – Топологічна оптимізація в середовищі *Siemens NX*

- *Siemens Solid Edge* (рис. 3.2). *Solid Edge* - CAD-система твердотільного та поверхневого моделювання, перш за все призначена для роботи з деталями та складаннями, але що володіє вбудованим модулем інженерного аналізу. Розробник позиціонує *Solid Edge* як засіб швидкого проектування та прототипування, «заточене» під адитивне виробництво. Оптимізація проводиться за кілька кроків, без необхідності тонких налаштувань: завантажити «заготовку», вказати отвори та місця застосування навантаження, задати необхідну частку зниження маси та запас міцності. Отримана деталь може бути безпосередньо відправлена до друку або доопрацьована штатними засобами *Solid Edge*.



Рисунок 3.2 – Топологічна оптимізація в середовищі *Siemens Solid Edge*

- CATIA 3DEXPERIENCE (рис. 3.3). Платформа 3DEXPERIENCE, станом на початок 2018 року, складається зі 104 модулів, які називаються ролями. Це рішення різних завдань проектування, управління процесом розробки, симуляції, візуалізації. Однією з цих ролей є Function Driven Generative Designer. Ця роль не тільки дозволяє зробити оптимізацію топології деталі відповідно до зазначених вимог, але й доопрацювати отриманий об'єкт – спростити, усунути нерівності.

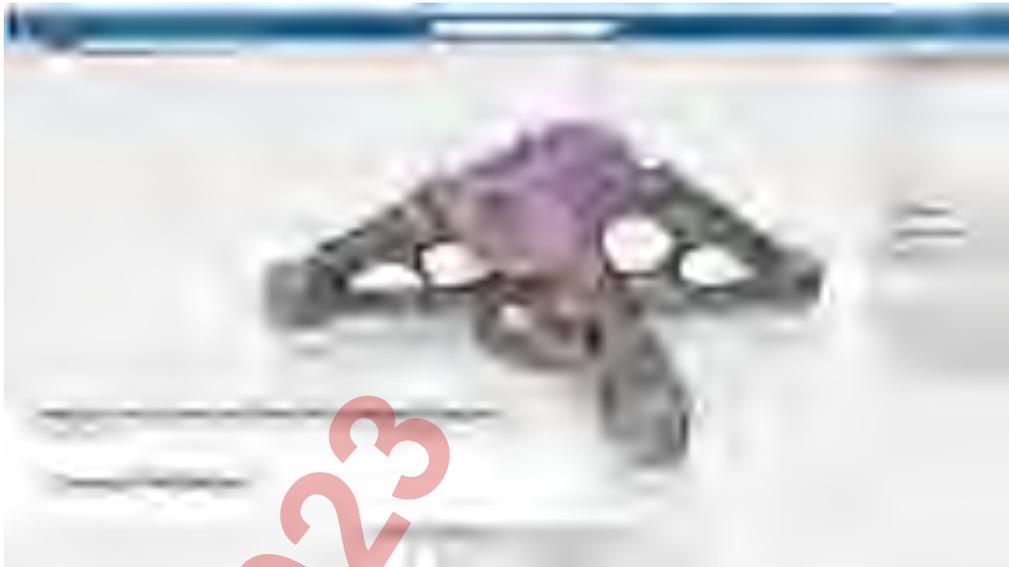


Рисунок 3.3 – Топологічна оптимізація в середовищі *CATIA 3DEXPERIENCE*

- *SOLIDWORKS* (рис. 3.4). Оптимізація топології була додана в *SOLIDWORKS* 2018. Вона доступна в модулі *SOLIDWORKS Simulation* редакцій *Professional* та *Premium*. Інженер вказує навантаження, умови оптимізації - наприклад, найкраще відношення жорсткості до маси, і запускає дослідження топології. За завершення процесу, для підготовки до виробництва, виконується згладжування сітки оптимізованої деталі.



Рисунок 3.4 – Топологічна оптимізація в середовищі *SOLIDWORKS*

- *Autodesk Fusion 360* (рис. 3.5). Хмарна платформа для проектування, інженерних розрахунків та підготовки до виробництва на верстатах з ЧПУ *CAD/CAE/CAM*. У максимальній підписці, яка називається *Ultimate*, доступний модуль *Advanced Simulation*. Він відповідає за моделювання деформацій, роботу з анізотропними матеріалами та оптимізацію топології.



Рисунок 3.5 – Топологічна оптимізація в середовищі *Autodesk Fusion 360*

- *Shape optimization* (рис. 3.6). Можливості для налаштування оптимізації не дуже широкі, але для основного завдання створення деталі з мінімальною масою та необхідною міцністю достатні.

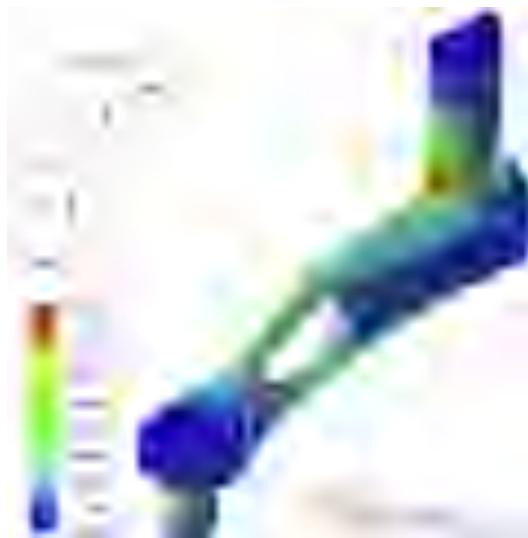


Рисунок 3.6 – Топологічна оптимізація в середовищі *Shape optimization*

- *ANSYS Mechanical* (рис. 3.7). *ANSYS Mechanical* дозволяє моделювати деформацію конструкцій під навантаженням, розраховувати вплив вібрацій та виникнення резонансів. Для проведення автоматизованої топологічної оптимізації необхідно імпортувати модель-заготовлю деталі, вказати точки кріплення та застосування навантажень, задати граничні умови, такі як мінімальна товщина. Можливе моделювання як традиційних матеріалів, так і анізотропних – композити, 3D-друкарські деталі.



Рисунок 3.7 – Топологічна оптимізація в середовищі *ANSYS Mechanical*

- *solidThinking Inspire* (рис. 3.8). У порівнянні, наприклад, з *Ansyes Mechanical* – це більш доброзичливе ПЗ, розраховане на вирішення кількох вузьких завдань - моделювання взаємодії деталей у збірках, просте ескізне проектування, топологічної оптимізації. Об'єкти, з якими необхідно працювати, можуть бути створені як в *Inspire*, так і імпортовані з інших *CAD*-систем. Після «відрізання зайвого» оптимізована деталь спрощується та згладжується, що значно покращує зовнішній вигляд та дозволяє відразу відправити її у виробництво. Крім топологічної оптимізації, *Inspire* здатна

формувати сітчасте заповнення замість суцільного, ця функція нагоді при необхідності ще більше знизити масу деталі.



Рисунок 3.8 – Топологічна оптимізація в середовищі *solidThinking Inspire*

- *Autodesk Netfabb Ultimate* (рис. 3.9). Ця програма відома багатьом користувачам 3D-принтерів, як зручний засіб «ремонт» сітки та поділу моделі на частини. Функціональність Netfabb набагато ширша – там, наприклад, є створення гіллястих підтримуючих структур для *FDM*-друку, моделювання деформації металевих деталей для *SLS* та *SLM*, а в редакції *Ultimate* додано топологічну оптимізацію та генерацію сітчастого заповнення.

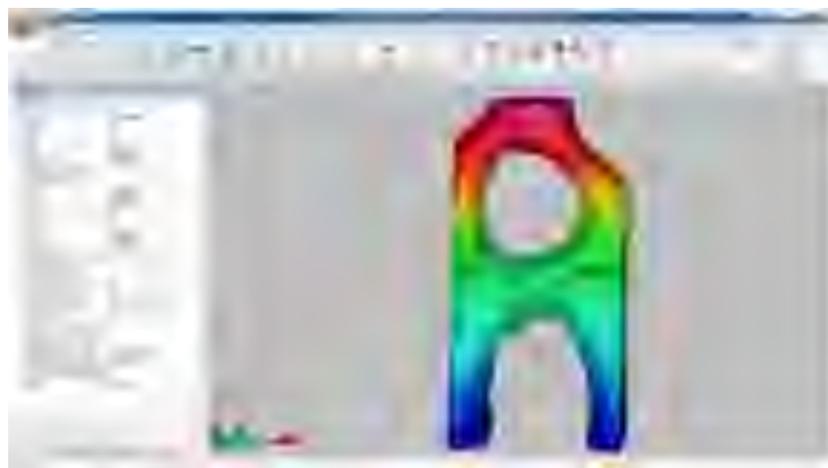


Рисунок 3.8 – Топологічна оптимізація в середовищі *solidThinking Inspire*

- *ABAQUS* (рис. 3.9). Методологія *BESO* була вбудована в *ABAQUS* і зазнала удосконалення в частині продуктивності, згладжування нерівностей поверхні, утворених ребрами та гранями кінцевих елементів, створення можливості імпорту / експорту моделей з та в найбільш поширені формати *CAD*. Для виключення можливих помилок, що виникають при перетворенні моделі на KE-формат, *ABAQUS* має необхідний набір інструментів [3-5, 10, 14, 15].

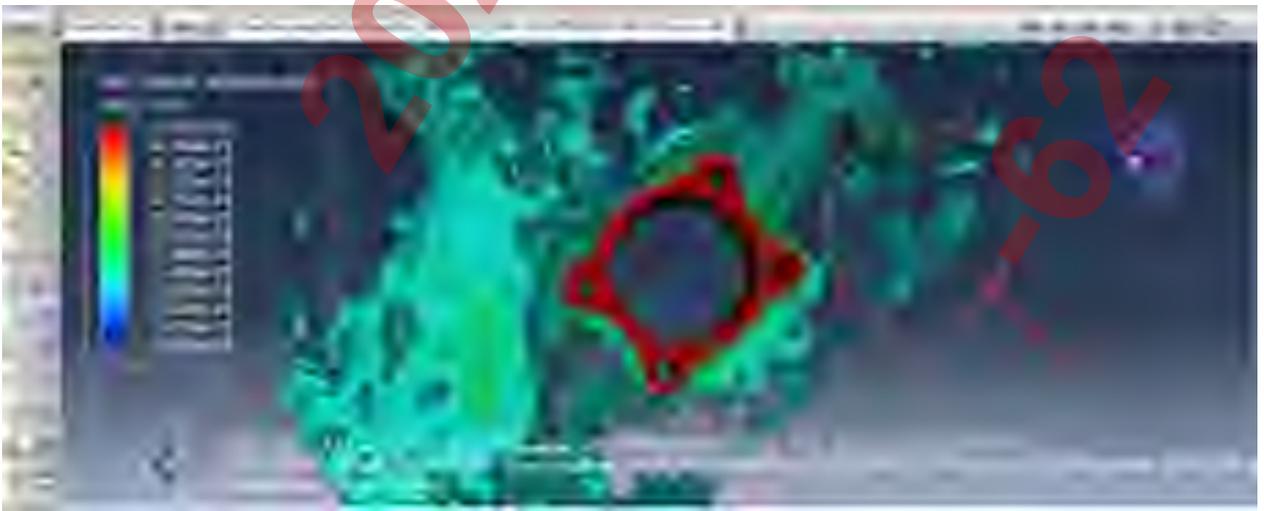


Рисунок 3.9 – Топологічна оптимізація в середовищі *ABAQUS*

### 3.2. Метод *SIMP* для оптимізації топології в середовищі *SOLIDWORKS*

Оптимізація топології є найпоширенішим типом структурної оптимізації. Вона використовується у початковій фазі проектування для прогнозування оптимального розподілу матеріалу в рамках зазначеного вихідного простору проектування структури та розглядає функціональні специфікації та виробничі обмеження.

Найбільш популярним математичним методом оптимізації топології є метод твердого ізотропного матеріалу з пеналізацією (*SIMP*). Метод *SIMP* був спочатку запропонований Бендсо і Кікучі (*Bendsoe, Kikuchi*) (1988) і Розван і Чжоу (*Rozvany, Zhou*) (1992). Метод *SIMP* прогнозує оптимальне

розподілення матеріалів у межах зазначеного проектного простору для поданих випадків навантажень, граничних умов, виробничих обмежень та вимог продуктивності.

Відповідно до Бендсо (Bendsoe) (1989) "Оптимізація форми у найзагальнішому сенсі повинна включати визначення для кожної точки в просторі незалежно від знаходження матеріалу в даній точці". Традиційний підхід до оптимізації топології - це поділ області на сітку кінцевих елементів, яка називається суцільною ізотропною мікроструктурою. Кожен елемент заповнюється матеріалом для областей, яким потрібний матеріал, або не містить матеріалу для областей, де можна видаляти матеріал (подання пустот). Розподіл щільності матеріалу в рамках проектного домену  $\rho \in$  дискретним, а кожному елементу призначається двійкове значення:

- $\rho_{(e)} = 1$ , де потрібен матеріал (чорний)
- $\rho_{(e)} = 0$ , де матеріал видалений (білий)

Наприклад, на рис. 3.1 представлений оптимізований макет навантаженої конструкції. Тверді елементи із щільністю  $\rho_{(e)} = 1$  є чорними, порожні елементи із  $\rho_{(e)} = 0$  видалені.



Рисунок 3.1 – Оптимізований макет конструкції

Подання постійної функції розподілу відносної щільності уникає появи двійкових помилок двопозиційної природи. Для кожного елемента призначена відносна щільність може відрізнитися між мінімальним значенням  $\rho_{\min}$  і 1, що

дозволяє призначати елементам проміжні щільності (характеризуються як пористі елементи):  $\rho_{\min}$  – це мінімальне допустиме значення відносної густини для порожніх елементів більше за нуль. Це значення щільності забезпечує числову стабільність аналізу кінцевих елементів.

Оскільки відносна щільність матеріалу може змінюватися безперервно, модуль Юнга матеріалу на кожному елементі може також постійно змінюватися. Для кожного елемента «e» є зв'язок між коефіцієнтом відносної щільності матеріалу  $\rho_e$  і модулем Юнга для пружності, призначеної ізотропної моделі матеріалу  $E_0$ , що обчислюється степеневим законом:

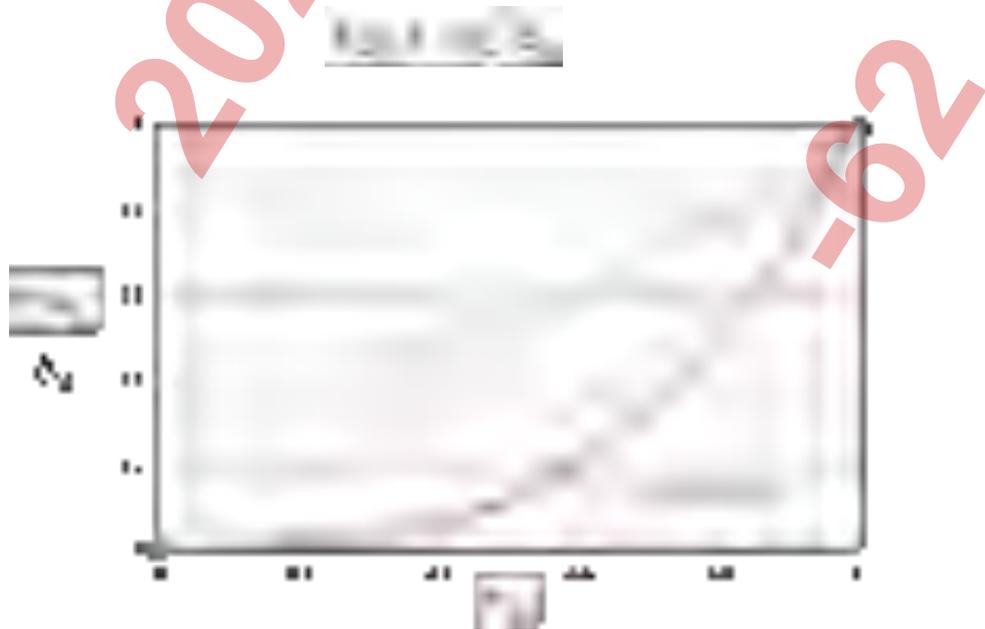


Рисунок 3.2 – Залежність модуля Юнга від коефіцієнта відносної щільності матеріалу

Поправка на втрати  $\rho$  знижує вклад елементів із проміжними щільностями (сірі елементи) до загальної жорсткості. Поправка на втрати контролює рішення оптимізації для елементів, які представлені суцільним чорним ( $\rho_e = 1$ ) або порожнім білим ( $\rho_e = \rho_{\min}$ ). Численні експерименти показують, що підходить значення виправлення на втрати  $\rho = 3$ .

Зменшення модуля еластичності матеріалу елемента призводить до зменшення жорсткості елемента. З урахуванням методу *SIMP* глобальна жорсткість модулюється відповідно до:

$$K_e = \sum_{i=1}^N \rho_e^i K_i$$

де  $K_e$  – це матриця жорсткості елемента,  $\rho_{\min}$  є мінімальною відносною жорсткістю,  $\rho_e$  є відносною щільністю елемента,  $p$  - поправка на втрати, а  $N$  - кількість елементів в домені проектування.

Наприклад, для елемента з призначеною відносною густиною  $\rho_e = 0,5$ , поправка на втрати = 3, а  $\rho_{\min} = 0,001$ , глобальна матриця жорсткості масштабується коефіцієнтом  $(0,001 + (1 - 0,001) * 0,5^3) = 0,12587$ .

Популярна мета оптимізації полягає у максимальному збільшенні загальної жорсткості структури або мінімізації її податливості при видаленні зазначеного обсягу маси.

Податливість – це показник загальної гнучкості чи м'якості структури, який є зворотною величиною жорсткості. Глобальні умови податливості дорівнюють сумі пружності елементів або енергій деформації. Мінімізація глобальної податливості (C) еквівалентна максимізації глобальної жорсткості. Алгоритм оптимізації за допомогою ітеративного процесу намагається вирішити значення густини елементів (які є розрахунковими змінними оптимізації), які мінімізують глобальну податливість структури.

$$C = \sum_{e=1}^N \frac{1}{K_e} \cdot \rho_e^3$$

де  $[u_e]$  – це вектор вузлового переміщення елемента  $e$ ;

$[K_e]$  – жорсткість елемента  $e$ , а вектор  $\{\rho\}$  містить значення відносної щільності елемента  $e$ .

Під час кожної ітерації оптимізації мають бути задоволені цільове обмеження маси, глобальна рівновага сили та жорсткості та необхідні функціональні обмеження:

$$m_e \leq m_{\max}$$

де  $v_e$  – об'єм елемента;

$M_{\text{target}}$  – цільова маса оптимізації.



де  $[K\{\rho\}]$  – глобальна матриця жорсткості, змодульована вектором відносної густини;

$\{u\}$  – вектор зміщення, а  $\{F\}$  є вектором зовнішньої сили.



Формула вище містить обмеження відгуку проектування, наприклад, граничні значення напруги, зміщення, власні частоти і т.д.

Під час кожної ітерації алгоритми оптимізації виконують аналіз чутливості з метою оцінки впливу різновидів щільності матеріалу на цільові показники з максимального підвищення жорсткості.

Математично, аналіз чутливості виражається як похідна від цільової функції щодо щільності матеріалу:



Під час аналізу чутливості елементи, зважені з низькими коефіцієнтами щільності матеріалу, зрештою втрачають свою структурну релевантність і виключаються під час наступних ітерацій.

При розрахунку чутливості для кожного незалежного елемента та без урахування підключення між елементами це може призвести до розриву матеріалу та відключення обсягів від основної геометрії. Це відомо як ефект "шахової дошки". Для зниження ефекту "шахової дошки" для схеми фільтрації застосовуються радіус впливу елемента та усереднення значення чутливості кожного елемента усередині його області впливу.

Ітерації оптимізації продовжуються до сходження відмінностей цільової функції та досягнення ітераціями їхнього критерію збіжності.

Якщо у дослідженні топології на компонент впливає кілька навантажень, то в *SOLIDWORKS* Використовуйте формулювання «Мін. Макс.».

Якщо об'єкт зазнає множинних навантажень, формулювання "Мін. Макс" з метою оптимізації «Найкраще відношення жорсткості до маси» шукає спосіб максимального збільшення жорсткості компонентів або мінімального зменшення його відповідності незалежно для кожного випадку навантаження.

Наприклад, для компонента під впливом трьох незалежних навантажень стандартним формулюванням оптимізації параметра Найкраще відношення жорсткості до маси для зазначеного обмеження зменшення маси є мінімальне обмеження загальної відповідності. Податливість - це показник загальної гнучкості чи м'якості структури, який є зворотною величиною жорсткості. Загальна відповідність є сумою трьох відповідностей  $C_1$ ,  $C_2$  і  $C_3$ , обчислених незалежно від кожного навантаження.



Рисунок 3.3 – Модель сітки оболонки для пластини з трьома незалежними навантаженнями:  $LC_1$ ,  $LC_2$  та  $LC_3$ . Шість ступенів свободи на кутах є фіксованими.



Рисунок 3.4 – Оптимізована форма із стандартного складу. Мінімальна мета оптимізації ( $C_1 + C_2 + C_3$ ) у межах 40% обмеження скорочення маси.

Формулювання оптимізації «Мін. Макс» шукає спосіб мінімізації максимальної відповідності, обчисленої незалежно від навантажень та максимального збільшення жорсткості компонента для кожного навантаження. Оптимізована форма компонента має максимальну жорсткість для кожного варіанту навантаження, які можуть діяти незалежно один від одного.



Рисунок 3.5 – Оптимізована форма з формулювання «Мін. Макс.»

«Мін. Макс.» мета оптимізації ( $C1 + C2 + C3$ ) у межах 40% обмеження зменшення маси. Оптимізована форма має однакову жорсткість для кожного незалежного навантаження.

Для усунення проблем збіжності при використанні формулювання «Мін. Макс.» рекомендується вибирати Опції топології > Додатково > Перевірка збіжності (чорнова якість) [3-5, 14, 15].

## 4. ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В СЕРЕДОВИЩІ *SOLIDWORKS*

### 4.1. Загальна послідовність процесу топологічної оптимізації в *SOLIDWORKS*.

Оптимізація топології була додана в *SolidWorks* 2018. Вона доступна в модулі *SolidWorks Simulation* редакцій *Professional* та *Premium*. Інженер вказує навантаження, умови оптимізації – наприклад, найкраще відношення жорсткості до маси, і запускає дослідження топології. За завершення процесу, для підготовки до виробництва, виконується згладжування сітки оптимізованої деталі

Виконання топологічної оптимізації конструкції моделі в *SolidWorks* влаштовано наступним чином (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Схема процесу топологічної оптимізації виробу в середовищі *SolidWorks*

На початковому етапі виконується створення та модифікація тривимірної моделі деталі в системі *CAD*. На другому етапі створюється розрахункова модель і задаються змінні проектування. Після цього виконується розрахунок моделі з урахуванням обмежень та цільової функції. Згідно алгоритму оптимізації виконується оновлення змінних проектування та вносяться зміни у скінченно-елементну модель. У випадку досягнення оптимального результату засобами *CAD*-системи модель змінюють відповідно до одержаних результатів геометрії та повертаються до першого етапу.

Якщо ж оптимального результату не було досягнуто, засобами *CAD*-системи змінюють геометрію деталі та в середовищі *CAE*-системи знову створюють розрахункову модель, після чого аналіз проводять з першого етапу.

За допомогою дослідження топології можна поставити ціль проекту, щоб знайти найкраще співвідношення міцності та маси, мінімізувати масу або зменшити максимальне переміщення компонента.

Почнемо з параметра «Найкраще відношення жорсткості до маси», щоб отримати початкову оптимізовану форму компонента.

На додаток до мети оптимізації можна визначити обмеження для відповідності необхідним механічним властивостям (наприклад, максимальному відхиленню, відсотку видаленої маси) та виробничим процесам. Для ефективного виконання дослідження топології пропозиція варіанта проекту створюється за допомогою процесу ітеративної оптимізації, в якому виконуються всі задані структурні та виробничі вимоги.

У вікні *PropertyManager* вибирають «Дослідження топології». Для налаштування дослідження топології, визначають наступне.

**Модель максимального розміру.** Вибирають одне тіло для оптимізації топології. Початкова геометрія тіла позначається як модель максимального розміру.

**Одна мета.** Мета оптимізації керує математичним формулюванням алгоритму оптимізації. У дереві дослідження топології натисніть правою

кнопкою миші «Цілі та обмеження». У вікні *PropertyManager* «Цілі та обмеження» потрібно вибрати одну з таких цілей оптимізації:

- «Найкраще відношення жорсткості до маси»,
- «Гранично зменшити масу»,
- «Гранично зменшити максимальне зміщення».

Якщо як ціль вибрано значення «Найкраще відношення жорсткості до маси», то алгоритм намагається мінімізувати глобальні умови відповідності моделі, які є мірою загальної гнучкості (зворотна величина жорсткості). Умови відповідності визначаються сумою енергій деформації всім елементів.

**Обмеження.** Обмеження визначають межу рішень проектного простору. Обмеження поширюються на: відсоток віддаленої маси, цілі продуктивності для напруження (запасу міцності), зміщення або власну частоту моделі. Обмеження оптимізації визначаються користувачем у вікні *PropertyManager* «Цілі та обмеження». Інтерфейс користувача фільтрує типи обмежень, які можна застосувати залежно від вибраної мети.

**Збережені області.** Це області моделі, які виключені із процесу оптимізації та зберігаються в остаточній формі. Геометричні об'єкти, до яких застосовуються навантаження та кріплення, зберігаються за умовчанням. Щоб вибрати області для виключення з оптимізації, потрібно перейти до «Топологія > Установки > Установки збереженої (замороженої) області». Щоб вибрати додаткові межі для збереження, натискають правою кнопкою миші «Виробничий контроль» та вибирають «Додати збережену область».

**Виробничий контроль.** Геометричні обмеження, застосовані виробничим процесом, забезпечують можливість для оптимізованої деталі. Натисканням правою кнопкою миші на елемент «Виробничий контроль» визначають необхідні елементи керування, наприклад:

- «Напрямок вилучення з прес-форми»,
- «Управління товщиною»,
- «Управління симетрією».

У вікні PropertyManager «Напрямок вилучення з прес-форми» можна також застосувати обмеження штампів для створення отворів за товщиною деталі. За допомогою параметра «Керування симетрією» можна застосувати половину, чверть або одну восьму симетрії для оптимізації форми компонентів.

Залежно від налаштувань мети оптимізації, елементів виробничого контролю, сітки, навантажень та граничних умов процес оптимізації створює допустимий проект, який є похідним від максимального простору вихідного проекту.

#### **4.2. Цілі та обмеження**

У вікні PropertyManager «Цілі та обмеження» можна задати мету оптимізації та геометричні обмеження, що визначають математичне формулювання алгоритму оптимізації.

Щоб отримати доступ до вікна *PropertyManager* «Цілі та обмеження», виконують наведені нижче дії.

У дереві досліджень топології правою кнопкою миші натискають на вузол «Цілі та обмеження» та вибирають одну з трьох цілей оптимізації: найкраще відношення жорсткості до маси, гранично зменшити масу або гранично зменшити максимальне зміщення.

##### **Вибір мети**

##### ***Найкраще відношення жорсткості до маси (за замовчуванням).***

Алгоритм оптимізації визначає форму компонентів з найбільшою жорсткістю при заданій кількості маси, яка буде видалена з максимального початкового проектного простору. Якщо як ціль вибрано значення «Найкраще відношення жорсткості до маси», то алгоритм намагається мінімізувати глобальні умови відповідності моделі, які є мірою загальної гнучкості (зворотна величина жорсткості). Умови відповідності визначаються сумою енергій деформації всім елементів.

***Гранично зменшити максимальне усунення.*** Алгоритм оптимізації визначає форму з граничним зменшенням максимального усунення одному вузлі (розраховується з урахуванням статичного дослідження). З заданим

відсотком матеріалу, що видаляється з компонента, оптимізація призводить до конструкції, яка важить менше вихідної і гранично зменшує максимальне зміщення.

**Гранично зменшити масу з обмеженням зміщення.** Алгоритм оптимізації визначає форму, яка важить менше моделі максимального розміру та не порушує заданого цільового обмеження зміщення. Даний алгоритм прагне зменшити масу компонента з одночасним обмеженням зміщення (макс. значення компонента або значення, що визначається користувачем в одному вузлі) в рамках певного граничного обмеження.

### 4.3. Обмеження

Обмеження визначають межу рішень проектного простору шляхом застосування відсотка маси, яку можна усунути в рамках певного значення, або шляхом вказівки продуктивності для максимального зміщення, що спостерігається в моделі. Для однієї мети оптимізації можна визначити два обмеження. Інтерфейс користувача фільтрує типи обмежень, які можна застосувати залежно від вибраної мети.

Обмеження маси «Завдання цільової маси», до якої деталь зменшуватиметься у процесі оптимізації. Можна вибрати один із наведених нижче варіантів.

«Зменшити масу на (відсоток)» – вводять цільовий відсоток зниження маси.

«Зменшити масу на (абсолютне значення)» – вводять точне значення маси, що видаляється з максимального проектного простору деталі.

Алгоритм оптимізації спробує досягти цільового зниження маси кінцевої форми у вигляді ітеративного процесу.

Обмеження зміщення Задання верхньої межі для обраної складової зміщення. У вікні «Компонент» потрібно вибрати потрібну змінну зміщення. Обирають один із наведених нижче варіантів.

«Вказане значення» – вводять цільове значення вибраної змінної зміщення та вказують необхідні одиниці вимірювання у списку «Одиниці вимірювання».

«Вказаний коефіцієнт» – вводять коефіцієнт для множення на максимальне зміщення, обчислене на основі статичного дослідження.

Вибирають один із наведених нижче варіантів розташування довідкової вершини для заданого обмеження зміщення:

«Автоматично (одна максимальна точка)» – програма за замовчуванням вибирає вершину максимального усунення, виявленого в моделі.

«Налаштування користувача» – вибирають у графічній області довідкову вершину для обмеження зміщення.

#### **4.4. Виробничий контроль**

У процесі оптимізації створюється компонування матеріалу, яке задовольняє цілі оптимізації та всім геометричні обмеження, які визначено користувачем. Тим не менш, може бути неможливе створення моделі стандартними методами виробництва, таких як лиття та формування.

Застосування правильних елементів керування геометрією запобігає формуванню витоків і порожніх деталей. Виробничі обмеження гарантують успішне вилучення оптимізованої форми з прес-форми та можливість штампування за допомогою інструментів та штамсів.

**Вікно *PropertyManager* «Збережена область».** Додають до моделі збережені області, які змінюватимуться у процесі оптимізації топології.

Можна «заморозити» області моделі, що контактують з іншими деталями, такими як області опори та області, які утворюють несучу поверхню. Ці області не беруть участь в оптимізації топології та залишаються без змін.

Щоб отримати доступ до вікна *PropertyManager* «Збережена область», виконують наведені нижче дії.

Натискають правою кнопкою миші «Виробничий контроль» та вибирають «Додати збережену область».

«Грані для набору 2» – вибирають межі, які залишаться незмінними під час оптимізації.

«Глибина збереженої області» – встановлюють глибину області, яка залишиться незмінною під час оптимізації.

Вказують глибину збереженої області з необхідними одиницями вимірювання.

«Перегляд геометрії» – вибирають, щоб переглянути вказану геометрію, яка зберігається під час оптимізації. Відобразиться «Попередній перегляд» геометрії для вибраної межі з глибиною збереженої області (рис. 4.1).

Перегляд елемента сітки – вибирають для перегляду елементів сітки вказаної геометрії, які будуть збережені під час оптимізації. Відображається «Перегляд елементів сітки» для вибраної межі із збереженою областю певної глибини (рис. 4.2).



Рисунок 4.1 – Відображення попереднього перегляду геометрії для межі з глибиною збереженої області



Рисунок 4.2 – Відображення «Перегляду елементів сітки» для вибраної межі із збереженою областю певної глибини

### **Параметр «Управління симетрією»**

Управління симетрією робить оптимізований проект симетричним стосовно зазначеної площини. До оптимізованого проекту можна застосувати половину, чверть або одну восьму площинної симетрії (рис. 4.3).

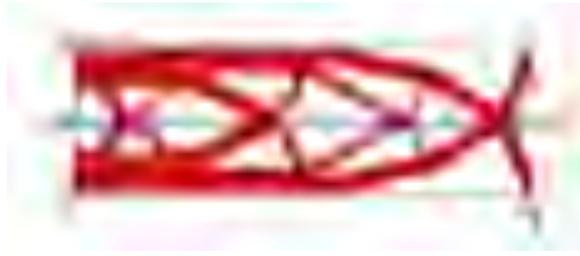


Рисунок 4.3 – Застосування площинної симетрії для моделі

Для відображення вікна *PropertyManager* «Управління симетрією» потрібно у дереві дослідження топології клікнути правою кнопкою миші «Виробничий контроль» та натиснути «Вказати симетрію (площини)».

**Тип.** Половинна симетрія – оптимізований проект має бути симетричним стосовно зазначеної площини; четвертинна симетрія – оптимізований проект має бути симетричним по відношенню до двох ортогональних площин; симетрія однієї восьмої – оптимізований проект має бути симетричним по відношенню до трьох ортогональних площин.

**Вибір площини симетрії.** Потрібно вибрати довідкову площину, яка визначає площину симетрії. Для цього необхідно вказати одну площину для «Половинної симетрії», дві ортогональні площини для «Четвертинної симетрії» та три ортогональні площини для «Симетрії однієї восьмої».

#### **Параметр «Управління товщиною»**

Для оптимізації топології, що не допускає створення дуже тонких або товстих областей, які можуть ускладнити процес виготовлення, застосовують обмеження розміру конструкції.

Щоб отримати доступ до вікна *PropertyManager* «Управління товщиною», виконують наведені нижче дії.

Кінцева оптимізована конструкція дотримуватиметься зазначених розмірних обмежень конструкції.

Натискають правою кнопкою миші «Виробничий контроль» та вибирають «Вказати елемент керування товщиною».

Мінімальна товщина елемента – встановлює мінімальний розмір оптимізованої підструктури та необхідні одиниці виміру. Мінімальний розмір

конструкції повинен бути більшим у два або три рази середнього розміру елемента.

Груба сітка та дрібна сітка призводять до однієї й тієї ж оптимізованої топології, якщо мінімальна товщина конструкції в обох випадках має однакове абсолютне значення.

Максимальна товщина елемента – встановлює максимальний розмір оптимізованої підструктури та необхідні одиниці виміру (додатково). Рекомендується, щоб середній розмір елемента-сітки був у три або чотири рази менший за необхідну максимальну товщину конструкції.

Час для розрахунку збільшується квадратично, якщо сітка стає занадто точною після застосування елементів керування товщиною конструкції. Для економії часу розрахунку обмеження товщини повинні бути визначені лише в областях моделі, де необхідно уникати використання дуже товстих або тонких елементів деталі. Для визначення цих областей першим етапом є виконання оптимізації без обмежень розміру конструкції.

### **Параметр «Маса матеріалу»**

Під час оптимізації топології програма починає із заданого максимального фізичного простору компонента з усіма елементами та за допомогою ітеративного процесу визначає новий розподіл матеріалу, що призводить до більш легкої, але все ще жорсткої форми.

Після завершення ітеративного процесу оптимізації отриману форму компонента можна переглянути в епюрі «Маса матеріалу».

Щоб відкрити епюру «Маса матеріалу», необхідно виконати наведені нижче дії.

У дереві досліджень топології у вузлі «Результати» двічі натиснути на елемент «Маса матеріалу».

### ***Відображення***

Елементи з низькою відносною густиною маси (менше 0,3) розглядаються як «м'які» елементи. Ці елементи не впливають на загальну жорсткість компонента та можуть бути безпечно видалені. Елементи з високою

відносною густиною маси (більше 0,7) розглядаються як «тверdotілі». Ці елементи найбільше впливають на загальну жорсткість (як міри вантажопідйомності) компонента та залишаються у підсумковому проекті без змін. Повзунок значення *ISO* регулює включення елементів в епюру «Маса матеріалу» відповідно до їх значення відносної щільності маси.

«За замовчуванням» – якщо повзунок *ISO* знаходиться в положенні «За замовчуванням», елементи зі значенням відносної масової щільності менше 0,3 видаляються.

«Маса матеріалу – щільна» – якщо повзунок помістити в положення «Щільна», включаються всі елементи.

«Маса матеріалу – скорочена» – якщо повзунок перевести в положення «Скорочена», включаються лише тверdotільні елементи (з відносною масовою щільністю 1,0), які не можуть бути видалені.

Елементи, вибрані алгоритмом як елементи, які слід залишити, відображаються жовтим кольором. Елементи, вибрані для видалення (з відносною масовою щільністю менше 0,3) мають темно-фіолетовий колір. Варіанти кольорів за замовчуванням для епюри «Маса матеріалу» вибрані так, щоб ефективніше допомагати користувачам із колірною сліпотою. Для параметра графіка > Параметри кольору за замовчуванням вибрано «Оптимізовано для маси матеріалу». Власну карту кольорів можна вибрати в розділі «Визначається користувачем».

«Показати епюру маси матеріалу» – створення епюри «Маса матеріалу» з урахуванням поточного положення повзунка. Обчислену загальну масу елементів можна переглянути в епюрі «Маса матеріалу» під повзунком (як абсолютне значення і як відсоток від вихідної маси).

«Розрахувати згладжену сітку» – створення більш плавної сітки поверхні на основі активної епюри «Маса матеріалу» (видалення або зміна елементів, що створюють нерівні кромки та гострі кути). Щоб зберегти дані згладженої сітки оптимізованої деталі як нову геометрію, правою кнопкою миші потрібно натиснути епюру «Маса матеріалу» та вибрати пункт «Експорт

згладженої сітки». Дані сітки можна зберегти в новій конфігурації або у файлі нової деталі.

Додаткові параметри згладжування сітки:

Груба – поверхні згладжуються циклами. Якщо повзунок перемістити в положення Грубо, до епюри Маса матеріалу застосовується лише один цикл згладжування.

«Плавна» – якщо повзунок перемістити в положення «Плавно», застосовується більша кількість циклів згладжування і збільшується час розрахунку.

«Вказати колір згладженої сітки» – встановити прапорець, щоб вказати колір геометрії згладженої сітки. За замовчуванням використовується колір деталі.

«Властивість» – увімкнути текст заголовка «Введіть заголовок епюри».

«Зв'язати епюру з орієнтацією іменованого виду» – зв'язати попередньо певну орієнтацію виду з активною епюрою.

Після цього відображається епюра «Маса матеріалу» оптимізованого компонента (рис. 4.4). «М'які» елементи видаляються з вихідної геометрії (максимальний фізичний простір).



Рисунок 4.4 – Епюра «Маса матеріалу» оптимізованого компонента збірки

#### 4.5. Експорт згладженої сітки

Дані згладженої сітки для оптимізованої форми можна експортувати як нову геометрію.

Щоб відкрити вікно *PropertyManager* «Експорт згладженої сітки», необхідно виконати наведені нижче дії. Правою кнопкою миші натиснути «Епюра маси матеріалу» в розділі «Результати» та вибрати «Експорт згладженої сітки».

«Зберегти інформацію про сітку» – поточна активна конфігурація збереження даних згладженої сітки у поточну конфігурацію. «Нова конфігурація» – збереження даних згладженої сітки у новій конфігурації. «Новий файл деталі» – збереження даних згладженої сітки у новому документі.

«Ім'я деталі» – ввести ім'я нового файлу. «Зберегти файл у:» – ввести шлях до файлу, щоб зберегти новий документ.

##### ***Розширений експорт***

«Графічне тіло» – експорт даних згладженої сітки у скороченому форматі подання геометрії границь. Цей варіант обирають, щоб імпортувати документ «Графічне тіло» у вихідний документ деталі або збірку, щоб його можна було використовувати як копію для зміни геометрії вихідного компонента.

«Тверде тіло» – експорт даних згладженої сітки у вигляді твердого тіла (формат файлів *\*sldprt*). Цей варіант обирають для 3D-друку. Для цього варіанта розрахунок потребує більше часу.

«Тіло поверхні» – експорт даних згладженої сітки, які відносяться лише до геометрії поверхні (формат файлів *\*.STL*).

#### 4.6. Параметри топології

У діалоговому вікні «Параметри топології» встановлюються параметри аналізу для досліджень топології. Щоб відкрити діалогове вікно «Параметри топології», необхідно виконати наведені нижче дії.

Правою кнопкою миші натиснути на верхній значок дослідження топології та вибрати пункт «Властивості».

### **Вирішальна програма**

«Автоматичний вибір вирішальної програми» – програмне забезпечення вибирає вирішальну програму виконання дослідження топології.

Як вирішальна програма з високою продуктивністю для декількох варіантів навантажень рекомендується *Intel Direct Sparse*. *Intel Direct Sparse* не підтримується для досліджень топології.

«Виконати статичний аналіз перед запуском дослідження топології» – цей прапорець за промовчанням встановлено. Програмне забезпечення виконує статичний аналіз перед запуском алгоритму оптимізації топології.

«Облік впливу навантажень на частоти» – при розрахунку жорсткості враховується вплив навантаження в площині.

«Використовувати податливу пружину для стабілізації моделі» – додаються м'які пружини, прикріплені до основи, для запобігання нестійкості. Якщо прикласти навантаження до нестійкої конструкції, вона переміщається та/або обертається як тверде тіло. Потрібно застосувати відповідні обмеження, щоб запобігти руху твердого тіла.

«Використовувати інерційне розвантаження» – прикладаються інерційні сили, щоб урівноважити незбалансоване зовнішнє навантаження. Коли цей прапорець встановлений, можна вирішувати структурні завдання без необхідності застосовувати обмеження або активізувати функцію «м'яка пружина», щоб стабілізувати модель від переміщень твердого тіла.

«Використовувати формулювання «мін-макс» (для навантажень)» – цей прапорець слід встановити, якщо на компонент можуть діяти кілька варіантів навантаження незалежно один від одного (визначаються з допомогою менеджера навантаження). Алгоритм оптимізації прагне мінімізувати відповідність (зворотний розмір жорсткості) для кожного незалежно від прикладеного навантаження. Остаточна форма компонентів має максимальну жорсткість для прикладених варіантів навантаження, які можуть діяти незалежно один від одного.

### ***Налаштування збережених (заморожених) областей***

«Області лише з навантаженнями» – цей прапорець встановлюють, щоб виключити з оптимізації грані із застосованими навантаженнями.

«Області лише з кріпленнями» – цей прапорець встановлюють, щоб виключити з оптимізації грані із застосованими кріпленнями.

«Області з навантаженнями та кріпленнями» – варіант за замовчуванням. Під час оптимізації зберігаються грані із застосованими навантаженнями та кріпленнями.

«Ні (визначається користувачем)» – можна вибрати області, що зберігаються. Щоб вибрати межі, що зберігаються під час оптимізації, потрібно натиснути правою кнопкою миші на елемент «Виробничий контроль» та вибрати «Додати збережену область».

«Папка результатів» – визначається розташування папки, в якій зберігаються результати аналізу.

### ***Додатково***

«Перевірка збіжності (чорнова якість)» – якщо цей прапорець встановлений, у кожній ітерації вирішальна програма перевіряє збіжність цілі чи обмеження, щоб зупинити пошук рішення. Числові допуски між наступними ітераціями ослаблені задля досягнення збіжності. За замовчуванням вирішальна програма використовує нижчий числовий допуск (вища точність), а зупинення вирішальної програми потрібно досягти задовільного відповідності мети і обмеження.

### ***Максимальна кількість ітерацій***

«Автоматично» – максимальна кількість ітерацій, необхідна збіжності, визначається автоматично.

«Налаштування користувача» – встановлюється максимальна кількість ітерацій для алгоритму оптимізації, щоб досягти збіжності [3-5, 14, 15].

## 5. РЕЗУЛЬТАТИ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ В СЕРЕДОВИЩІ *SOLIDWORKS*

### 5.1. Топологічна оптимізація рульового важеля *DONGFENG 354/404*

Для дослідження процесу оптимізації топології конструкції деталі обрано лівий рульовий трапецієвидний важіль мінітрактора *DONGFENG 354/404* (рис. 5.1) [16].



Рисунок 5.1 – Мінітрактор *DONGFENG 354/404*

Матеріал важеля (рис. 5.2) – сталь Ст3, розрахункове навантаження – 1300 Н.



Рисунок 5.2 – Передній ведучий міст (а) мінітрактора *DONGFENG 354/404* (ліва сторона) та рульовий важіль (б)

В середовищі CAD-системи *SolidWorks* створено тривимірну модель важеля (рис. 5.3) масою 0,74 кг.



Рисунок 5.3 – Тривимірна модель важеля рульового мінітрактора *DONGFENG 354/404*

Виконаємо статичний міцнісний аналіз важеля. Для цього запускаємо модуль *SolidWorks Simulation*, створюємо нове дослідження, вибираємо тип досліджень «Статичний». Задаємо обмеження на модель – фіксована геометрія, вказавши отвори кріплення важеля до корпусу лівої головної передачі трактора (рис. 5.4).



Рисунок 5.4 – Задання обмежень для моделі важеля

Навантаження 1300 Н прикладемо до отвора з'єднання важеля з пальцем лівої кульової тяги (рис. 5.5). Попередньо під час створення моделі важеля задано додаткову площину, уздовж якої діятиме зовнішнє навантаження, та створено лінію роз'єму в отворі для коректного задання прикладеного зусилля.



Рисунок 5.5 – Прикладення зовнішнього навантаження до важеля

Після цього створюємо сітку на основі змішаної кривизни. Максимальний розмір елементів – 9,12 мм, мінімальний – 0,46 мм (рис. 5.6). Натиснувши кнопку «Run», запускаємо дослідження.



Рисунок 5.6 – Сіткова модель важеля з параметрами сітки

На підставі проведеного статичного міцнісного аналізу було визначено максимальне значення напружень, максимальне значення переміщення, а також мінімальне значення коефіцієнта запасу міцності [3, 4, 14]:

- напруження – 65 МПа;
- переміщення – 0,1 мм;
- коефіцієнт запасу міцності – 3,2.

Відповідні епюри зображено на рис. 5.7-5.9.



Рисунок 5.7 – Епюра напружень важеля



Рисунок 5.8 – Епюра переміщень важеля



Рисунок 5.9 – Епюра коефіцієнта запасу міцності важеля

Виконаємо аналіз топології конструкції важеля. Для цього створимо нове дослідження – «Дослідження топології». Обмеження та зовнішнє навантаження задамо, як і в статичному аналізі. У вікні *PropertyManager* «Цілі

та обмеження» вибираємо «Найкраще співвідношення жорсткості та маси» і встановлюємо параметр зменшення маси на 60% (рис. 5.10).

В параметрах «Виробничого контролю» вказуємо всі отвори з глибиною збереженої області 3 мм (рис. 5.11).

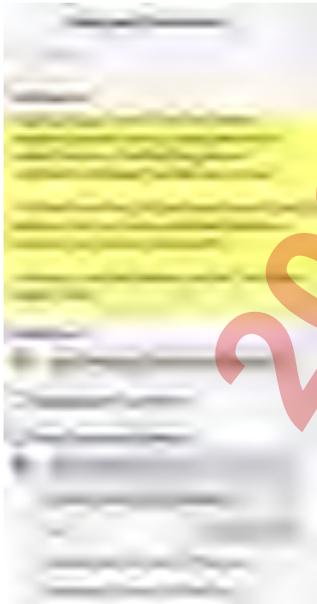


Рисунок 5.10 – Задання цілей топологічної оптимізації важеля



Рисунок 5.11 – Задання параметрів «Виробничого контролю»

Створюємо сітку з розміром елемента 2 мм (рис. 5.12).



Рисунок 5.12 – Сіткова модель важеля з параметрами сітки

Запускаємо дослідження, натиснувши кнопку «Run».

Після завершення аналізу одержуємо модель, як показано на рис. 5.13.

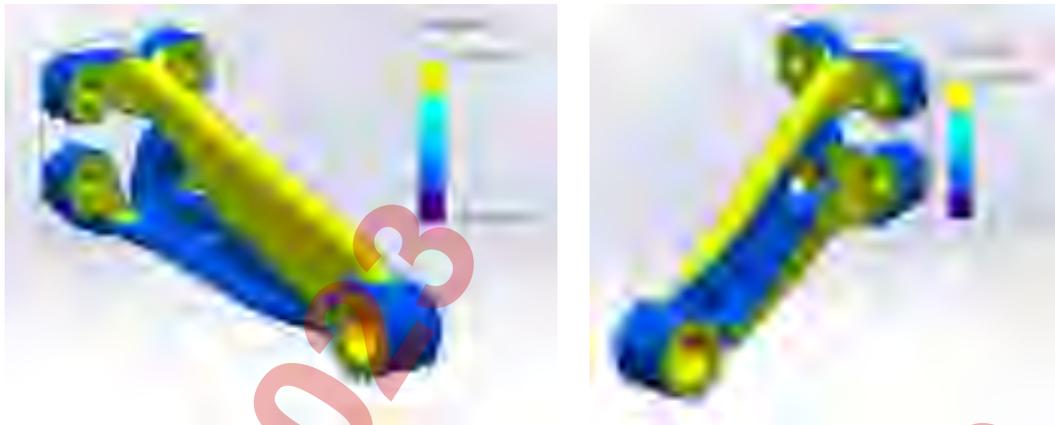


Рисунок 5.13 – Результат топологічної оптимізації важеля

Цю модель можна зберегти або в новій конфігурації файла моделі окремим файлом як сіткову модель, твердотілу модель або як графічне тіло. На основі одержаної в результаті топологічної оптимізації моделі початкову модель важеля оптимізовано в *CAD*-модулі *SolidWorks*. Оптимізовану модель важеля зображено на рис. 5.14. Маса оптимізованої деталі – 0,35 кг (рис. 5.15), що становить 47% від початкової маси моделі.



Рисунок 5.14 – Оптимізована модель важеля



Рисунок 5.15 – Визначення маси оптимізованої моделі важеля

Порівняння геометрії деталі під час процедури оптимізації важеля представлено на рис. 5.16.



*Початкова модель*

*Результат топологічної оптимізації*

*Оптимізована модель*

Рисунок 5.16 – Порівняння геометрії важеля під час процедури оптимізації

Проведено статичний міцнісний аналіз оптимізованої моделі важеля, на підставі якого було визначено максимальне значення напружень, максимальне значення переміщення, а також мінімальне значення коефіцієнта запасу міцності:

- напруження – 154 МПа;
- переміщення – 0,1 мм;
- коефіцієнт запасу міцності – 1,3.

Відповідні епюри зображено на рис. 5.17-5.19.



Рисунок 5.17 – Епюра напружень оптимізованого важеля



Рисунок 5.18 – Епюра переміщень оптимізованого важеля



Рисунок 5.19 – Епюра коефіцієнта запасу міцності оптимізованого важеля

Результати статичного міцнісного аналізу базової моделі важеля та оптимізованої подано в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняльний аналіз результатів статичного міцнісного аналізу важеля

Модель	Початкова модель важеля	Оптимізована модель важеля	Різниця, %
Параметр			
Напруження, МПа	65	154	+137
Переміщення, мм	0,1	0,1	0
Коефіцієнт запасу міцності	3,2	1,3	-59
Маса, кг	0,74	0,35	-53

Порівнявши результати, бачимо, що завдяки проведеній оптимізації топології важеля при збереженні його жорсткості вдалося зменшити його масу на 53% при задовільному значенні коефіцієнта запасу міцності. Таким чином при програмі випуску деталей 1000 шт/рік вдасться зекономити 390 кг сталі.

## 5.2. Топологічна оптимізація монтажного кронштейна гідроциліндра *Parker Hannifin*

Для дослідження процесу оптимізації топології було обрано стандартний монтажний кронштейн від *Parker Hannifin* (рис. 5.20).

Скоба з'єднана зі стрижнем-вушком за допомогою осі. Каталожний номер – 1455310000, номінальна величина навантаження 12,5 кН (рис. 15.21). Матеріал досліджуваної деталі – Сталь 25 [13].



Рисунок 5.20 – Кресленик кронштейна монтажного



Рисунок 5.21 – Об'єкт дослідження (кронштейн) у каталозі

В середовищі CAD-системи *SolidWorks* створено тривимірну модель кронштейна (рис. 5.22) масою 1,15 кг без поворотної осі та фіксуючої пластини з гвинтами.



Рисунок 5.22 – Тривимірний модель кронштейна *Parker Hannifin*

Виконаємо статичний міцнісний аналіз кронштейна [3]. Для цього запускаємо модуль *SolidWorks Simulation*, створюємо нове дослідження, вибираємо тип досліджень «Статичний». Задаємо обмеження на модель – фіксована геометрія, вказавши отвори кріплення кронштейна (рис. 5.23).

Навантаження 12500 Н прикладемо до отворів  $\varnothing 16$  мм (рис. 5.24).



Рисунок 5.23 – Задання обмежень для моделі кронштейна



Рисунок 5.24 – Прикладення зовнішнього навантаження до кронштейна

Після цього створюємо сітку на основі змішаної кривизни. Максимальний розмір елементів – 10,55 мм, мінімальний – 0,52 мм (рис. 5.25). Натиснувши кнопку «Run», запускаємо дослідження.



Рисунок 5.25 – Сіткова модель важеля з параметрами сітки

На підставі проведеного статичного міцнісного аналізу було визначено максимальне значення напружень, максимальне значення переміщення, а також мінімальне значення коефіцієнта запасу міцності:

- напруження – 98 МПа;
- переміщення – 0 мм;
- коефіцієнт запасу міцності – 3,1.

Відповідні епюри зображено на рис. 5.26-5.28.

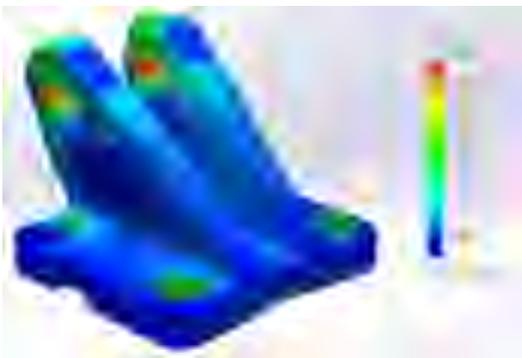


Рисунок 5.26 – Епюра напружень кронштейна

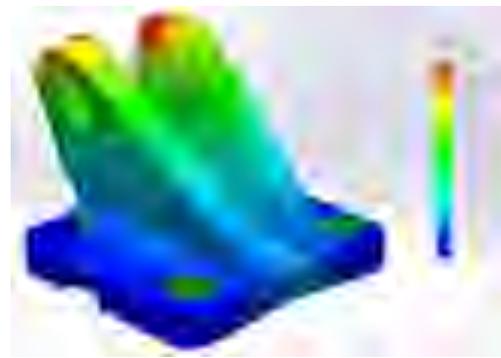


Рисунок 5.27 – Епюра переміщень кронштейна

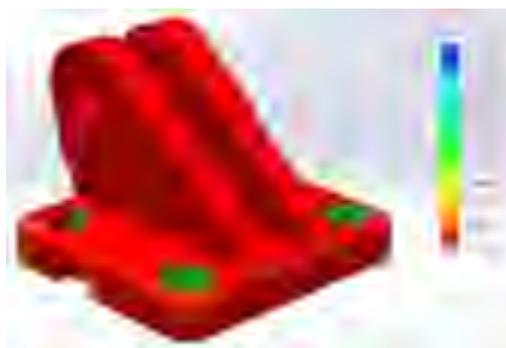


Рисунок 5.28 – Епюра коефіцієнта запасу міцності кронштейна

Виконаємо аналіз топології конструкції кронштейна. Для цього створимо нове дослідження – «Дослідження топології». Обмеження та зовнішнє навантаження задамо, як і в статичному аналізі. У вікні *PropertyManager* «Цілі та обмеження» вибираємо «Найкраще співвідношення жорсткості та маси» і встановлюємо параметр зменшення маси на 60% (рис. 5.29).

В параметрах «Виробничого контролю» вказуємо всі отвори з глибиною збереженої області 3 мм (рис. 5.30).

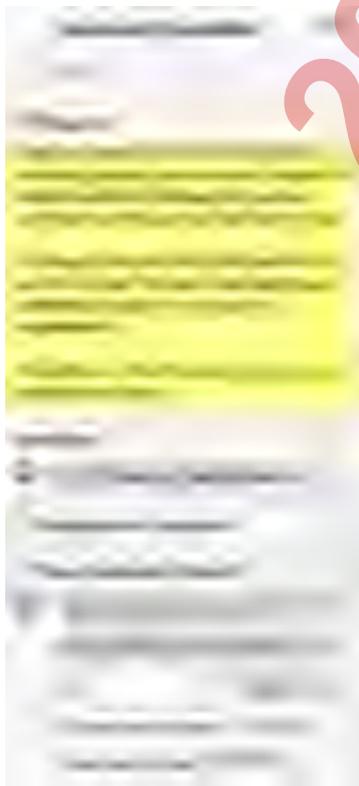


Рисунок 5.29 – Задання цілей топологічної оптимізації важеля



Рисунок 5.30 – Задання параметрів «Виробничого контролю»

Оскільки деталь є симетричною відносно однієї площини, додамо площину симетрії в параметрах «Виробничого контролю», вказавши площину «Справа» (рис. 5.31).

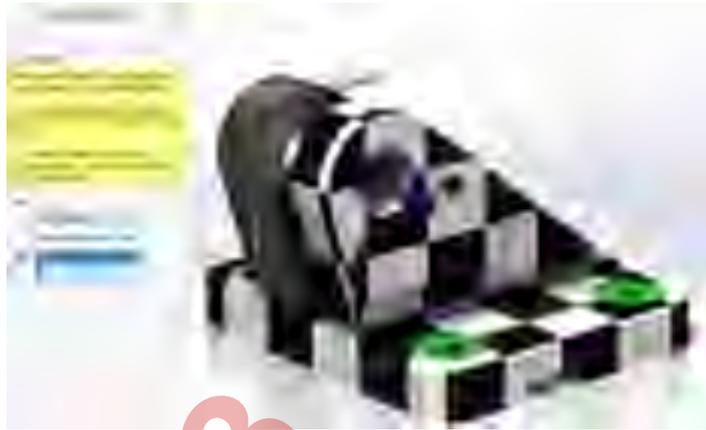


Рисунок 5.31 – Задання площини симетрії для топологічної оптимізації кронштейна

Створюємо сітку з розміром елемента 2,3 мм (рис. 5.32).



Рисунок 5.32 – Сіткова модель кронштейна з параметрами сітки

Запускаємо дослідження, натиснувши кнопку «Run».

Після завершення аналізу одержуємо модель, як показано на рис. 5.33.



Рисунок 5.33 – Результат топологічної оптимізації кронштейна

Цю модель, як і у випадку з важелем можна зберегти у новій конфігурації файла моделі, або окремим файлом як сіткову модель, твердотілу модель або як графічне тіло [1, 3-5, 10, 14]. На основі одержаної в результаті топологічної оптимізації моделі початкову модель важеля оптимізовано в *CAD*-модулі *SolidWorks*. Оптимізовану модель важеля зображено на рис. 5.34. Маса оптимізованої деталі – 0,58 кг (рис. 5.35), що становить 50% від початкової маси моделі.



Рисунок 5.34 – Оптимізована модель кронштейна



Рисунок 5.35 – Визначення маси оптимізованої моделі кронштейна

Порівняння геометрії деталі під час процедури оптимізації кронштейна представлено на рис. 5.36.



*Початкова модель*

*Результат топологічної оптимізації*

*Оптимізована модель*

Рисунок 5.36 – Порівняння геометрії кронштейна під час процедури оптимізації

Проведено міцнісний аналіз оптимізованої моделі кронштейна, та визначено максимальне значення напружень, максимальне значення переміщення, а також мінімальне значення коефіцієнта запасу міцності:

- напруження – 108 МПа;
- переміщення – 0 мм;
- коефіцієнт запасу міцності – 2,9.

Відповідні епюри зображено на рис. 5.37-5.39.

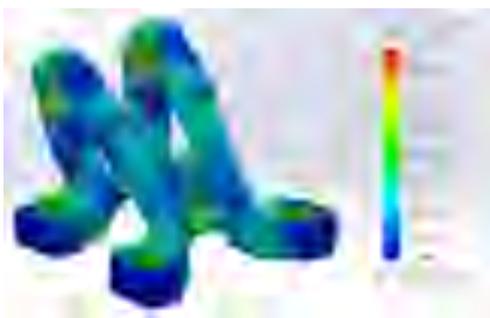


Рисунок 5.17 – Епюра напружень оптимізованого важеля



Рисунок 5.18 – Епюра переміщень оптимізованого важеля



Рисунок 5.19 – Епюра коефіцієнта запасу міцності оптимізованого важеля

Результати статичного міцнісного аналізу базової моделі важеля та оптимізованої подано в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Порівняльний аналіз результатів статичного міцнісного аналізу кронштейна

Модель	Початкова модель кронштейна	Оптимізована модель кронштейна	Різниця, %
Параметр			
Напруження, МПа	98	108	+10
Переміщення, мм	0	0	0
Коефіцієнт запасу міцності	3,1	2,9	-6
Маса, кг	1,15	0,58	<b>-50</b>

Порівнявши результати, видно, що завдяки проведеній оптимізації топології кронштейна при збереженні його жорсткості вдалося зменшити його масу на 50% при майже незмінному значенні коефіцієнта запасу міцності. Таким чином за умови випуску кронштейнів з річною програмою 1000 шт/рік вдається зекономити 570 кг сталі.

Загалом завдяки проведенню оптимізації топології в засобах *SolidWorks* вдається суттєво зменшити металомісткість деталей машин ще на етапі проєктного розрахунку.

## ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

У кваліфікаційній роботі розглянуто основні методи оптимізації топології конструкцій – такі, як методи еволюційної (*ESO*) та двоспрямованої еволюційної (*BESO*) оптимізації конструкцій, метод пеналізації для твердого ізотропного тіла (*SIMP*-метод), а також гібридний метод *ESO-SIMP*, створений завдяки об'єднанню методів *ESO* та *SIMP*, та метод встановлення рівня *Level-Set*.

Як можна помітити з прикладів застосування топологічної оптимізації при проектуванні виробів машинобудування, її використання поряд з новими технологіями дозволяє значно покращити питомі характеристики вузлів та виробів у цілому, а також суттєво зменшити витрату матеріалів, що використовуються для їх створення.

В роботі виконано топологічну оптимізацію конструкції лівого рульового трапецієвидного важеля мінітрактора *DONGFENG 354/404* та монтажного кронштейна гідроциліндра *Parker Hannifin*.

Так, за результатами топологічної оптимізації важеля в середовищі *SolidWorks* вдалося зменшити масу деталі на 53% при однаковій жорсткості оптимізованої моделі та початкової. При цьому коефіцієнт запасу міцності важеля становить 1,3. За річної програми випуску таких деталей 1000 шт/рік економія матеріалу становитиме 390 кг.

Завдяки оптимізації топології монтажного кронштейна гідроциліндра *Parker Hannifin* масу деталі зменшено на 50% при незначній втраті коефіцієнта запасу міцності, який в оптимізованому варіанті деталі становить 2,9. Жорсткість деталі в результаті топологічної оптимізації не змінилася. За річної програми випуску кронштейнів 1000 шт/рік економія матеріалу становитиме 570 кг.

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок про доцільність проведення оптимізації топології конструкції деталей машин, оскільки це дає змогу на етапі проектування суттєво зменшити металомісткість деталей без втрати їх міцнісних характеристик.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Масненко І. В., Стельмах Н. В. Застосування топологічної оптимізації при проектуванні деталі типу кронштейн // XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні», 10-11 грудня 2019 року, м. Київ, Україна : збірник праць конференції / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ, ФММ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019р. – С. 147–150.
2. Масненко І. В., Стельмах Н. В. Аналіз методів топологічної оптимізації при проектуванні елементів приладів. XIII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 року, м. Київ, Україна : збірник праць конференції / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ, ФММ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019р. – С. 109–111.
3. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів. Курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів : ЛНУП, 2022. – 109 с.
4. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем. Навч. посібник / В. Я. Ворощук, Т. М. Вітенько. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2021. 164 с
5. Довідка SolidWorks. URL : [https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/sldworks/r\\_welcome\\_sw\\_online\\_help.htm](https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/sldworks/r_welcome_sw_online_help.htm) (дата звернення: 15.10.2023).
6. Bendsoe, MP., Kikuchi N., Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 71, no. 2, pp. 197-224, 1988.
7. Bendsoe, MP. and Sigmund O., Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2003.
8. Bendsoe, MP., Optimal shape design as a material distribution problem, Structural Optimization, vol. 1, pp. 193-202, 1989.

9. Cazacu, R. and Grama L., Overview of Structural Topology Optimization Methods for Plane and Solid Structures, Annals of the University of Oradea, Issue No.3, December 2014.
10. Dassault Systèmes. URL: <https://www.3ds.com> (дата звернення 9.10.2023).
11. Pedersen, C.B.W. and Allinger, P., Industrial implementation and applications of topology optimization and future needs, IUTUAM Symposium on Topological Design Optimization of Structures, Machines, and Materials: Status and Perspectives (eds. M.P. Bendsøe, N. Olhoff and O. Sigmund), Springer, pp. 147-156, 2006.
12. Rozvany, G.I.N, Zhou M., and Birker T., Generalized shape optimization without homogenization, Structural optimization, vol. 4, no. 3-4, pp. 250-252, 1992.
13. Miller HV Series Heavy Duty Hydraulic Cylinders Catalog HY08-M1314-1/NA. URL: [https:// https://promo.parker.com/promotionsite/miller-fluid-power/us/en/homepage](https://promo.parker.com/promotionsite/miller-fluid-power/us/en/homepage) (дата звернення 18.10.2023).
14. SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com> (дата звернення 9.10.2023).
15. SolidWorks. URL: [https://www.softkey.ua/catalog/sapr/solidworks/#detail\\_text](https://www.softkey.ua/catalog/sapr/solidworks/#detail_text) (дата звернення 15.10.2023).
16. Магазин агро, мото техніки і запчастин URL: [https://udachnik.com.ua/ua/p766682673-rychag-minitraktor-pravyj.html?source=merchant\\_center&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=6736118837&utm\\_term&utm\\_content=498609509672&utm\\_position&utm\\_matchtype&utm\\_placement&utm\\_network=g&gad\\_source=1](https://udachnik.com.ua/ua/p766682673-rychag-minitraktor-pravyj.html?source=merchant_center&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=6736118837&utm_term&utm_content=498609509672&utm_position&utm_matchtype&utm_placement&utm_network=g&gad_source=1) (дата звернення 9.10.2023).