

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний факультет
Кафедра виробництва приладів

«На правах рукопису»
УДК 621.9.04:515.12

«До захисту допущено»

в.о. Завідувача кафедри

 Антонюк В.С.

«12» 12 2019 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології виробництва приладів»

на тему: «Моделювання геометричної моделі деталі методами
генеративного дизайну»

Виконав:

студент VI курсу, групи ПБ-81мп
Іванов Дмитро Євгенійович

Керівник:

к. т. н., доцент
Барандич К.С.

Консультант стартап-проекту:

д. е. н., доцент
Бояринова К.О.

Рецензент:


к.т.н. доц. Курчишук Ю.В.

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент



Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

Кафедра виробництва приладів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів» («Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва приладів»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

в.о. Завідувача кафедри

 Антонюк В.С.

«10» 09 2019р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Іванову Дмитру Євгенійовичу

1. Тема дисертації «Моделювання геометричної моделі деталі методами генеративного дизайну», науковий керівник дисертації к. т. н., доц. Барандич К.С., затверджені наказом по університету від «04» листопада 2019 р. № 3848-с

2. Термін подання студентом дисертації «10» грудня 2019 р.

3. Об'єкт дослідження – геометрична модель деталі.

4. Вихідні дані: креслення деталі, умови її експлуатації в механізмі.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Провести аналіз стану питання досліджень та виконати огляд літературних джерел.

5.1.1. Проаналізувати основні напрямки використання генеративних технологій.

5.1.2. Визначити основні поняття генеративного дизайну, топологічної оптимізації та адитивних технологій, принципи 3D друку.

5.1.3. Проаналізувати алгоритм та основні етапи генеративного дизайну

5.1.4. Визначити основні CAD системи, що включають модулі генеративного дизайну, та дослідити їх можливості.

5.2. Виконати моделювання удосконаленої конструкції деталі за допомогою методів генеративного дизайну.

5.2.1. Виконати аналіз отриманих рішень.

5.2.2. Виконати комп'ютерне моделювання напружень в матеріалі отриманих моделей методом скінченних елементів.

5.2.3. Зробити висновки про придатність отриманих моделей.

5.3. Вивчити конструкцію, принцип роботи лабораторного дельтавидного 3D принтеру та виконати 3D-друк змодельованих деталей.

5.4.1. Розробити методику моделювання удосконаленої конструкції деталі.



5.4.2. Виконати впровадження результатів дисертаційних досліджень.

5.5. Розробити стартап-проект «Моделювання геометричної моделі деталей методами генеративного дизайну»

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентаційні слайди за результатами дисертаційних досліджень.

7. Орієнтовний перелік публікацій: статті та тези доповідей на науково-технічних конференціях.

8. Консультанти розділів дисертації

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Розділ 5. Стартап проект «Моделювання геометричної моделі деталей методами генеративного дизайну» | Бояринова К.О., д. с. н., доцент |  |  |

9. Дата видачі завдання 25.02.2019 р.

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|---|--|-----------------|
| 1. | Аналіз стану питання досліджень та виконати огляд літературних джерел. | 18.03.2019 | <i>виконано</i> |
| 2. | Моделювання удосконаленої конструкції деталі за допомогою методів генеративного дизайну. | 15.04.2019 | <i>виконано</i> |
| 3. | Аналіз отриманих рішень методом скінченних елементів | 20.05.2019 | <i>виконано</i> |
| 4. | Вивчення конструкції, принципу роботи лабораторного дельтавидного 3D принтеру та 3D-друк змодельованих деталей. | 07.10.2019 | <i>виконано</i> |
| 5. | Розробка методики моделювання удосконаленої конструкції деталі | 04.11.2019 | <i>виконано</i> |
| 6. | Розробка стартап-проекту «Моделювання геометричної моделі деталей методами генеративного дизайну» | 06.12.2019 | <i>виконано</i> |
| 7. | Оформлення пояснювальної записки | 09.12.2019 | <i>виконано</i> |

Студент

Науковий керівник дисертації

 Д.С. Іванов

 К.С. Барандич

АНОТАЦІЯ

Основною метою магістерської дисертації є розробка методики для вдосконалення геометричної моделі деталей приладів та забезпечення їх експлуатаційних характеристик за рахунок використання технологій генеративного дизайну.

В даній роботі опрацьовано та проведено аналіз основних визначень генеративного дизайну, адитивних технологій та 3D друку. Розроблено структурну схему класифікації сфер застосування генеративного дизайну. Проаналізовано основні типи та принципи роботи 3D-принтерів та використовувані матеріали. Результатом аналізу літературних джерел було опрацювання алгоритму та основних етапів генеративного дизайну, що дозволило дослідити та визначити основні САД системи, які включають модулі генеративного дизайну.

Виконано моделювання удосконаленої конструкції деталі за допомогою методів генеративного дизайну. Завдяки результатам виконання комп'ютерного моделювання напружень в матеріалі методом скінченних елементів, зроблено висновки про придатність отриманих моделей.

Проаналізовано конструкцію та принцип роботи лабораторного дельтавидного 3D принтеру, що дозволяє виконати 3D-друк змодельованих деталей.

В результаті дослідження розроблено методику моделювання удосконаленої конструкції деталей методами генеративного дизайну та наведено приклади її використання.

Розроблено стартап-проект, де вказано опис ідеї проекту та її технічний аудит. Проведено аналіз ринкових можливостей для запуску стартап-проекту. В результаті чого розроблено ринкову стратегію та маркетингову програму.

ABSTRACT

The main purpose of the master's thesis is to develop a methodology for improving the geometric model of parts of devices and to ensure their operational characteristics through the use of technologies of generative design.

In this paper the basic definitions of generative design, additive technologies and 3D printing are analyzed and analyzed. The structural scheme of classification of spheres of application of generative design is developed. The basic types and principles of operation of 3D printers and the materials used are analyzed. The result of the analysis of the literary sources was the elaboration of the algorithm and the basic stages of the generative design, which made it possible to investigate and identify the major CAD systems that include the generative design modules.

Advanced workpiece modeling was performed using generative design methods. The results of computer simulation of finite element material stresses the conclusions about the suitability of the models obtained.

The design and working principle of a laboratory delta-shaped 3D printer are analyzed to allow 3D printing of the modeled parts.

As a result of the research, a method for modeling the advanced design of parts by methods of generative design is developed and examples of its use are given.

A startup project has been developed with a description of the project idea and its technical audit. The market opportunities for launching a startup project are analyzed. The result is a market strategy and marketing program.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 9 |
| РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 11 |
| 1.1 Основні поняття генеративного дизайну та адитивних технологій . | 11 |
| 1.2 Основні напрямки використання сучасних генеративних технологій | 13 |
| 1.3 Основні принципи 3D друку | 18 |
| 1.4 Алгоритм та основні етапи генеративного дизайну..... | 30 |
| 1.5 Використання 3D CAD систем автоматизованого проектування в генеративних технологіях | 32 |
| Висновки до розділу 1 | 36 |
| РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБУ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ | 38 |
| 2.1 Методика моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну | 38 |
| 2.2 Початкова інформація для дизайну..... | 39 |
| 2.3 Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану деталі з початковою геометрією | 40 |
| 2.4 Комп'ютерне моделювання удосконаленої конструкції виробу за допомогою генеративних технологій..... | 46 |
| Висновки до розділу 2 | 65 |
| РОЗДІЛ 3 ВИГОТОВЛЕННЯ ЗМОДЕЛЬОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВИРОБУ ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ..... | 66 |
| 3.1 Методика проведення експериментальних досліджень..... | 66 |
| 3.2 Опис лабораторного 3D принтеру, його можливості та використовувані матеріали | 68 |
| 3.3 Початкова інформація для виконання 3D друку | 71 |
| 3.4 Виконання 3D друку змодельованих конструкцій виробу на дельтавидному 3D-принтері..... | 79 |
| Висновки до розділу 3 | 86 |
| РОЗДІЛ 4 ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЕТАЛІ | 87 |
| 4.1 Методика моделювання удосконаленої геометричної моделі деталі за допомогою генеративного дизайну в середовищі Solid Edge ST10..... | 87 |

| | |
|--|-----|
| 4.2 Приклади результатів використання методики генеративного дизайну в середовищі Solid Edge ST10 | 94 |
| Висновки до розділу 4 | 102 |
| РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ» | 103 |
| 5.1 Опис ідеї проекту | 103 |
| 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту | 105 |
| 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту | 106 |
| 5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту | 111 |
| 5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту | 113 |
| Висновки до розділу 5 | 117 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 118 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 119 |
| ДОДАТКИ | 122 |

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГД – генеративний дизайн;
ТО – топологічна оптимізація;
SLA – Stereolithography Apparatus;
SLS – Selective Laser Sintering;
MJM – Multi Jet Modeling;
DLP – Digital Light Projector;
FDM – Fused Deposition Modeling;
ABS – Acrylonitrile butadiene styrene;
PLA – polylactide;
PET – Polyethylene terephthalate;
TPE – Thermoplastic Elastomers;
TPU – Thermoplastic polyurethane;
TPC – Thermoplastic copolyester;
STL – stereolithography;
ПКМ – права кнопка миші;
САПР – система автоматизованого проектування;
CAD – computer aided design.

ВСТУП

Актуальність роботи. З появою нових технологій виробництва, таких як 3D друк, знімається багато технологічних обмежень на процеси конструкторсько-технологічної підготовки та виробництва деталей та виробів. Розвиток сучасного промислового виробництва знаходиться на етапі, коли технології масового промислового виробництва поступаються місцем персональному виробництву, а багато речей можна створювати на персональних 3D принтерах. У цих умовах потреба в автоматизації таких розрахунків, як конструкційна міцність виробу стає особливо важливою. Генеративний дизайн стане одним з основних інструментів і помічників в руках промислового дизайнера. Технології генеративного дизайну (ГД) дозволяють створювати проекти з урахуванням тих фізичних властивостей і явищ, які пов'язані з функціональністю продукту. Цей процес пошуку форм часто повторює рішення, що створені природою, при цьому з'являються органічні обриси, які навряд чи були можливими без використання автоматизованих алгоритмів, що допомагають в роботі з проектом. Ці форми з'являються в результаті численних ітерацій, на виході яких створюється дизайн, оптимізований для виконання поставлених завдань. Інтуїція і естетика, які протягом тисячоліть залишалися ключовими факторами при роботі над дизайном, вже не грають своєї первісної ролі, оскільки дизайн створюється в цифровому вигляді і фактично вже знаходиться за межами можливостей лише одного дизайнера, який не володіє інструментами.

Можливості генеративного дизайну дозволяють працювати з великими масивами інформації і на їхній основі обирати найкращі моделі й рішення, а також створювати візуалізації цих даних.

Генеративний дизайн упевнено займає своє місце у професійному середовищі й зараз використовується для найбільш амбітних та складних проектів, які іншими засобами, можливо, навіть не вдалося б реалізувати. Адже головна особливість такого проектування полягає в тому, що інженер не займається розробкою безпосередньо сам, а тільки вводить вхідні параметри і обмеження, а комп'ютерна програма вираховує навантаження, міцність, оптимальну форму та інші параметри. В одну секунду комп'ютер може видати вже готовий проект, на який у людини могли б піти місяці і навіть цілі роки.

Таким чином, дана магістерська дисертація є актуальною тому, що генеративний дизайн дозволяє в рази зменшити масу виробу та зберегти або покращити її експлуатаційні властивості, в результаті чого зменшується вартість та час виготовлення.

Мета дослідження: вдосконалення конструкції деталей приладів та забезпечення їх експлуатаційних характеристик за рахунок використання технологій генеративного дизайну.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати основні напрямки використання генеративних технологій;
- визначити основні поняття генеративного дизайну, топологічної оптимізації та адитивних технологій принципи 3D друку;
- проаналізувати алгоритм та основні етапи генеративного дизайну;
- визначити основні CAD системи, що включають модулі генеративного дизайну, та дослідити їх можливості;
- виконати моделювання вдосконаленої конструкції деталі методами генеративного дизайну;
- перевірити якість отриманих рішень;
- виготовити прототипи змодельованих деталей на лабораторному 3D принтері;
- розробити методику вдосконалення конструкції деталей в приладобудуванні та машинобудуванні, а також рекомендації для її використання.

Об’єкт дослідження: генеративний дизайн деталей.

Предмет дослідження: вплив методів генеративного дизайну на параметри геометричної моделі деталі.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Виконано класифікацію сфер використання генеративного дизайну та адитивних технологій.
2. Запропоновано методику використання генеративного дизайну для створення удосконаленої геометричної моделі деталі.

Практична цінність одержаних результатів:

- розроблено алгоритм моделювання та оптимізації геометрії за допомогою генеративного дизайну;
- результат моделювання удосконаленої конструкції виробу «Коромисло» з використанням алгоритмів генеративного дизайну;
- надано методичні рекомендації, щодо використання генеративного дизайну для створення удосконаленої геометричної моделі деталі в системі Solid Edge ST10;
- результати створеного стартап-проекту за темою дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

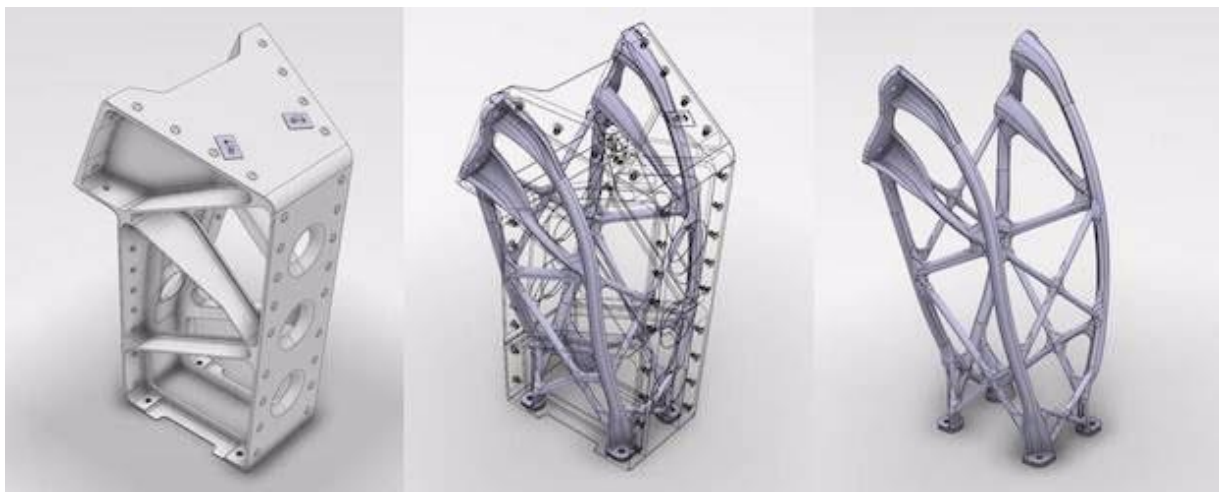
1.1 Основні поняття генеративного дизайну та адитивних технологій

Генеративний дизайн (англ. Generative Design; син. «Породжує дизайн») – підхід до проектування і дизайну цифрового або фізичного продукту (сайт, зображення, мелодія, архітектурна модель, деталь, анімація і т.д.), при якому людина делегує частину процесів комп'ютерним технологіям і платформам [1].

В цьому випадку дизайнер, інженер або інший замовник безпосередньо не шукає рішення поставленої задачі, а описує її параметри і обмеження програмі, після чого створює (генерує) варіанти рішення, які формують бачення продукту [2].

На відміну від традиційних інструментів дизайну і проектування, генеративні технології, а саме їх програмна реалізація, напівавтономно створюють і первинно відбирають варіанти рішень, що змінює характер взаємодії людини з системою: програма сприймається не як засіб, а як повноцінний учасник творчого процесу – «партнер» [3].

Деякі генеративні системи дозволяють користувачеві переформулювати, коригувати та уточнювати завдання за проміжними результатами, а також виконувати самонавчання в процесі пошуку рішень [4]. Приклад генеративного дизайну представлений на рис. 1.1.



а)

б)

в)

Рис. 1.1 – Приклад виконання генеративного дизайну:
а) тривимірний модель деталі; б) результат генеративного дизайну;
в) результат конструкторського рішення

Адитивні технології (3D-друк) – одна з форм технологій адитивного виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання

послідовних шарів матеріалу (друку, вирощування) за даними цифрової моделі. Друк здійснюється спеціальним пристроєм – 3D-принтером, який забезпечує створення фізичного об'єкта шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу на основі віртуальної 3D-моделі. 3D-принтери, як правило, швидші, більш доступні і прості у використанні, ніж інші технології адитивного виробництва. 3D-принтери пропонують розробникам продуктів можливість друку деталей і механізмів з декількох матеріалів та з різними механічними і фізичними властивостями під час одного процесу друку.

3D друк дозволяє перетворювати моделі, які отримано в CAD-системах, в готові вироби. У реальності процес 3D-друку вимагає також багато ручної праці, що включає попередню підготовку і подальшу обробку надрукованих деталей для досягнення їх бажаної якості [5].

Топологічна оптимізація (ТО) – це математичний метод, який оптимізує компоновку матеріалів в заданому просторі проектування для заданого набору навантажень, граничних умов і обмежень з метою максимізації продуктивності системи. ТО відрізняється від оптимізації форми і оптимізації розмірів тим, що дизайн може досягати будь-якої форми в просторі, замість того, щоб мати зумовлені конфігурації.

Зазвичай оцінювання ефективності проектування з використанням ТО здійснюється методом кінцевих елементів. Тобто, конструкція оптимізується з використанням методів математичного програмування на основі градієнта, таких як алгоритми критеріїв оптимальності і методи переміщення асимптот або використання алгоритмів на основі неградієнта, таких як генетичні алгоритми [6].

Топологічна оптимізація має широкий спектр застосувань в аерокосмічній, механічній, біохімічній та будівельній техніці. В даний час інженери в основному використовують ТО на рівні концепції процесу проектування. Зазвичай через форми отриманого виробу, які схожі на природні, їх важко виготовити. З цієї причини виріб, що виходить з ТО, часто налаштовується на технологічність. Додавання обмежень в формулювання для підвищення технологічності є активною областю досліджень.

1.2 Основні напрямки використання сучасних генеративних технологій

За Ф. Кін [7] «Генеративний дизайн – це безліч нових інструментів автоматичного проектування, які застосовуються для оптимізації виготовлення, зниження ваги виробів та економії використовуваних матеріалів. Результатом застосування цих інструментів стають органічні і навіть позаземні на вигляд деталі, які дозволяють скоротити вартість виробництва».

Технології в конструюванні і прототипуванні

Для швидкого прототипування, тобто швидкого виготовлення прототипів моделей і об'єктів для подальшого їх доопрацювання. Вже на етапі проектування можна кардинальним чином змінити конструкцію вузла або об'єкта в цілому. У інженерії такий підхід здатний істотно знизити витрати у виробництві і освоєнні нової продукції.

Для створення наочних 3D-моделей. Конструкція з прозорого матеріалу дозволяє побачити роботу механізму «зсередини», що зокрема було використано інженерами Porsche при вивченні руху мастила в трансмісії автомобіля ще при розробці. Для виготовлення деталей в технічних видах спорту, наприклад, 3D друк у авіамодельному спорті (рис. 1.2). Для аматорського виготовлення дрібних деталей та конструкцій у домашніх умовах.

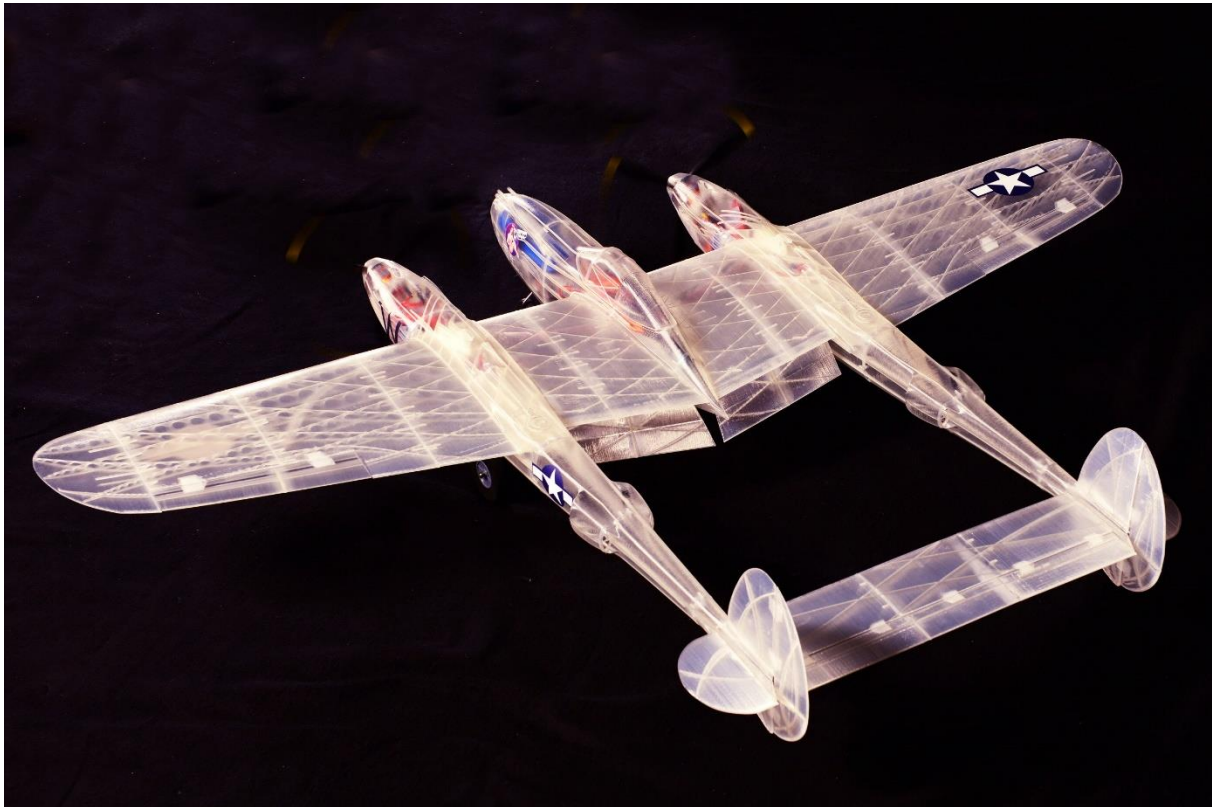


Рис. 1.2 – 3D модель літака з прозорого матеріалу

Технології у промисловому виробництві

Для швидкого виробництва – виготовлення готових деталей з матеріалів, які використовуються для друку 3D-принтерами. Це відмінне рішення для малосерійного виробництва.

Для виробництва складних, масивних, міцних і головне недорогих систем. Для поліпшення характеристик і виду своїх продуктів використовують Toyota, Boeing і інші корпорації [8]. Прикладом є безпілотний літак Polecat компанії Lockheed, велика частина деталей якого була виготовлена методом швидкісного тривимірного друку.

Для виготовлення ракетних двигунів [9] та космічних ракет. Прикладом є розробки американської компанії Rocket Lab [10, 11].

Для виготовлення моделей і форм для ливарного виробництва.

Медицина

При зубному протезуванні (рис. 1.3) та вирощуванні повноцінних органів. Використання 3D-друку в стоматології дозволяє створювати якісні та довговічні моделі вкладок, накладок, коронок, вінірів та мостів для їх подальшого впровадження в організм. Різні матеріали, що використовуються для друку пломб, не тільки володіють високим рівнем біосумісності, а й можуть застосовуватися для лікування злегка пошкоджених зубів [12].

Прикладом є розробки Університету Міссурі, які дозволяють наносити на спеціальний біогель згустки клітин заданого типу.



Рис. 1.3 – Результат генеративного дизайну протезу щелепи з частковим використанням ґратчастих структур

Імпланти і протези, що надруковані на 3D-принтері, також застосовуються при операціях на ключицях, лопатках, тазостегнових кістках і т.д. Наприклад, не так давно американська компанія Conformis вперше імплантувала пацієнтові колінний суглоб нового покоління (рис. 1.4) [12].

Раніше для заміни колінного суглоба довго підбирали протез, а потім обточували кістку, щоб впровадження імпланта завершилося успішно. Тепер же ця процедура виконується лише за допомогою комп'ютерної томографії та друку відповідного протеза.



Рис. 1.4 – Результат генеративного дизайну протезу колінного суглобу [12]

Надрукований на 3D-принтері колінний суглоб не підлягає обов'язковій заміні через 15-20 років, що характерно для традиційних пластикових або сталевих протезів.

Озброєння та безпека

Під час військових навчань НАТО Trident Juncture 18 було проведено оперативний експеримент з використання адитивних технологій для виготовлення запчастин (рис. 1.5) у польових умовах та їх трансферу у підрозділи за допомогою БПЛА [4].

З борту одного з морських кораблів англійського Королівського флоту – HMS Mersey, було запущено безпілотник, що виконаний за допомогою технології 3D-друку. Апарат створювався у співпраці з Саутгемптонським університетом [13].

Приклад застосування 3D-друку продемонстрували морські піхотинці зі штату Меріленд. Використовуючи 3D-моделювання та 3D-друк, вони виготовили деталь для винищувача F-35, що коштує \$70000, витративши всього 9 центів.

Армія США спроектувала і надрукувала на 3D-принтері повністю функціональний гранатомет, який називається "R.A.M.B.O". Розробка гранатомета зайняла близько шести місяців. Стріляє він гранатами виготовленими також за допомогою 3D-друку.



Рис. 1.5 – Приклад 3D друку запчастин зброї

Дослідники з Массачусетського університету Лоуелл розробили новий спосіб 3D-друку електропровідних компонентів для радіолокаційних систем. Вони створили новий тип чорнила, які дозволяють виготовляти радари за допомогою 3D-друку.

Технологія 3D-друку все активніше застосовується в армії. Основну роль в її просуванні відіграє необхідність зниження витрат. 3D-друк деталей на місці допомагає вирішити проблеми логістики і забезпечення, дозволяючи економити час і кошти на доставці, що актуально для армії і авіації, і тим більше для флоту.

Отже, проаналізувавши основні сфери застосування адитивних технологій, їх можна зобразити у вигляді схеми, яку представлено на рис. 1.6.

Також можна виділити такі основні переваги застосування адитивних технологій та генеративного дизайну в різних сферах:

- зниження ваги окремих елементів – спільна програма Airbus і Autodesk зі зниження ваги окремих елементів цивільних літаків [14];
- синтез форми – спільна програма Toyota і Materialise з розробки супер легкого автомобільного крісла з незвичайною структурою [15];
- створення медичних імплантатів – застосування генеративного дизайну дозволяє точно відтворювати трабекулярні структури (мікроскопічні елементи тканини), розподіляючи крихітні пори за матеріалами і відтворюючи шорсткість поверхні при імітації кісток [7].

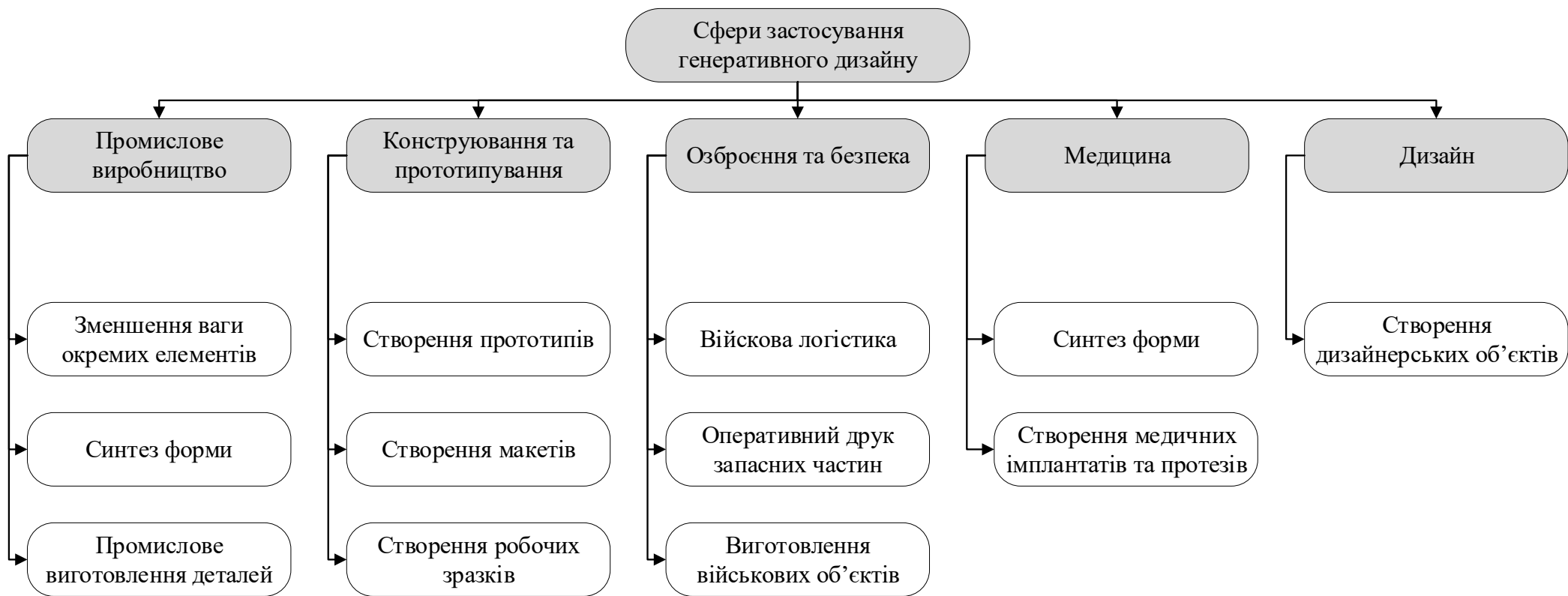


Рис. 1.6 – Схема класифікації сфер застосування генеративного дизайну

1.3 Основні принципи 3D друку

Найбільшого поширення в застосуванні отримало всього 5 технологій [16], які і розглянемо більш детально.

SLA (Stereolithography Apparatus) технологія – стереолітографія

Принцип цієї технології полягає у впливі лазера, УФ або ІК на фотополімер (рідину). В результаті чого, рідина перетворюється в досить твердий пластик. На рис. 1.7 представлено загальну схему 3D-принтеру, що працює за SLA технологією – стереолітографією.

Зверху в полімер занурюється на задану глибину платформа, далі промінь проходить по шару рідини над платформою, що призводить до затвердіння і прилипання його до платформи, таким чином, відбувається створення одного шару. В результаті повторення такої процедури безліч разів утворюється необхідний макет [16].

До основних переваг такого друку відносяться:

- точність;
- швидкість друку;
- мінімальний відсоток виникнення технічних помилок, таких як перегрів, відшарування, збій роботи друкуючої головки, відлипання, відшарування кутів.

До недоліків відносяться:

- висока вартість;
- невелика кольорова палітра;
- невисока фізична міцність готового виробу.

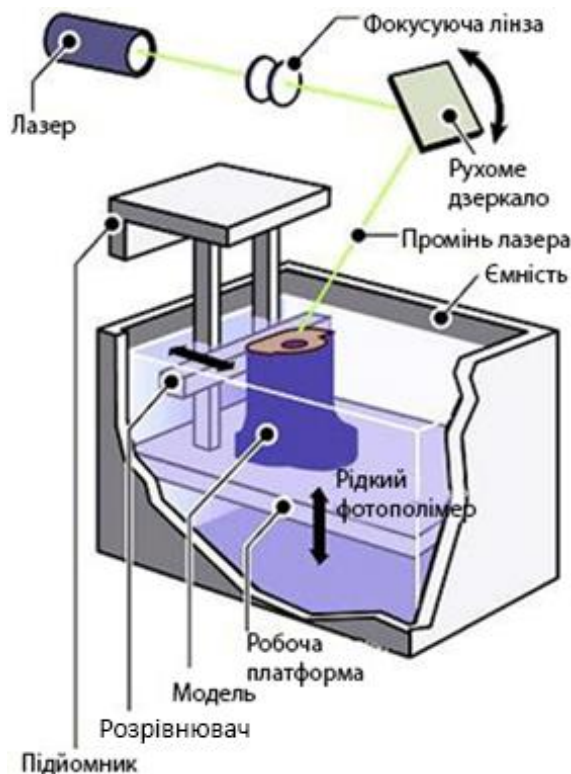


Рис. 1.7 – Схема SLA технології – стереолітографії [17]

SLS (Selective Laser Sintering) – селективне лазерне спікання

Технологічний процес створення моделі дуже близький за принципом роботи з попереднім. Основною відмінністю є відсутність можливого самостійного розподілу матеріалу для друку, в даному випадку – порошку, який часто є композитом. Тому це завдання виконує спеціальний валик, який рівномірно розподіляє порошок по поверхні об'єкта, яких друкується.

Основний принцип роботи полягає в розпиленні різнобарвного згущувача на тонкий шар дрібнодисперсного порошку в задані ділянки, як це показано на рис. 1.8. Така процедура повторюється багаторазово, і в результаті утворюється необхідний елемент. Слід зауважити, що шари настільки тонкі, що під ними видно попередні. В результаті збільшення кількості шарів дно ємності поступово опускається вниз. Час отримання готового виробу прямо залежить від складності виконання самого об'єкта.

Після закінчення робочого процесу, готову модель акуратно витягують з композиту і переміщують в кабінку для очищення від порошку за допомогою щіток і повітряного потоку з компресора. Після закінчення очищення необхідно провести просочення виробу спеціальним клеєм. Слід зауважити, що залишковий порошок буде повторно використано для створення наступної моделі. В результаті чого можна зробити висновки про безвідходне використання матеріалу.

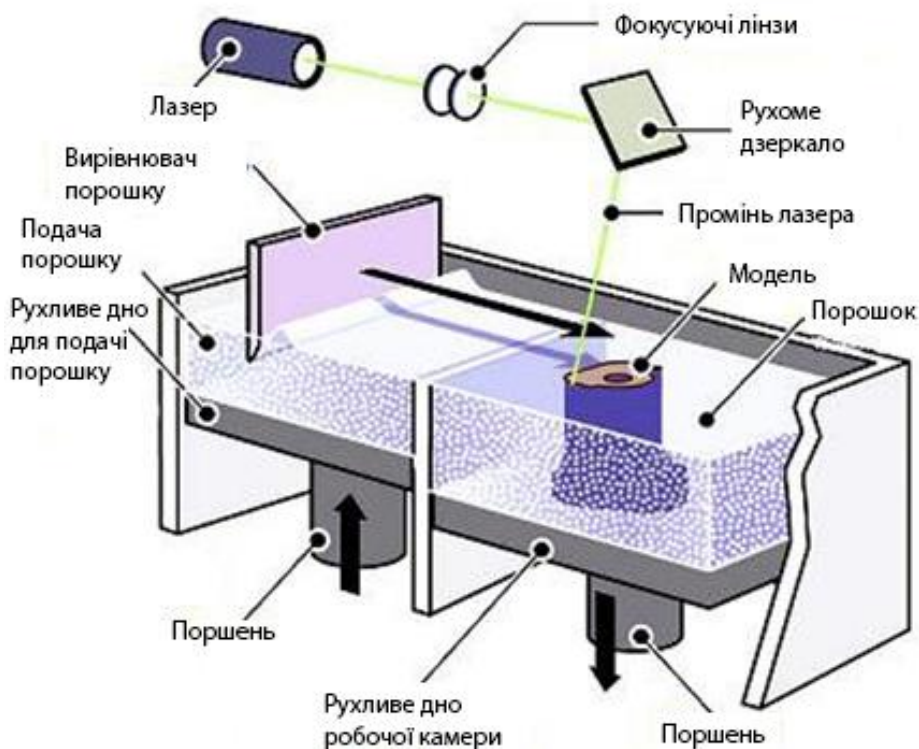


Рис. 1.8 – Схема SLS- селективного лазерного спікання [17]

MJM (Multi Jet Modeling) – метод наплавлення

У цьому методі світлозатвердіння полімеру здійснюється за допомогою впливу ультрафіолетового спалаху. Розплавлений акриловий фотополімер (пластик) наноситься на друкуючу платформу за допомогою головки (рис. 1.9). На цій платформі пластик піддається впливу освітлення галогенною лампою, в результаті чого відбувається затвердіння матеріалу. Процедура повторюється багаторазово для досягнення необхідного результату. Важливою деталлю є підтримка виступаючих або нависаючих частин, яка здійснюється за допомогою побутового воску. Цей матеріал наноситься одночасно з полімером і видаляється в результаті нагрівання в печі, при цьому, не залишаючи слідів.

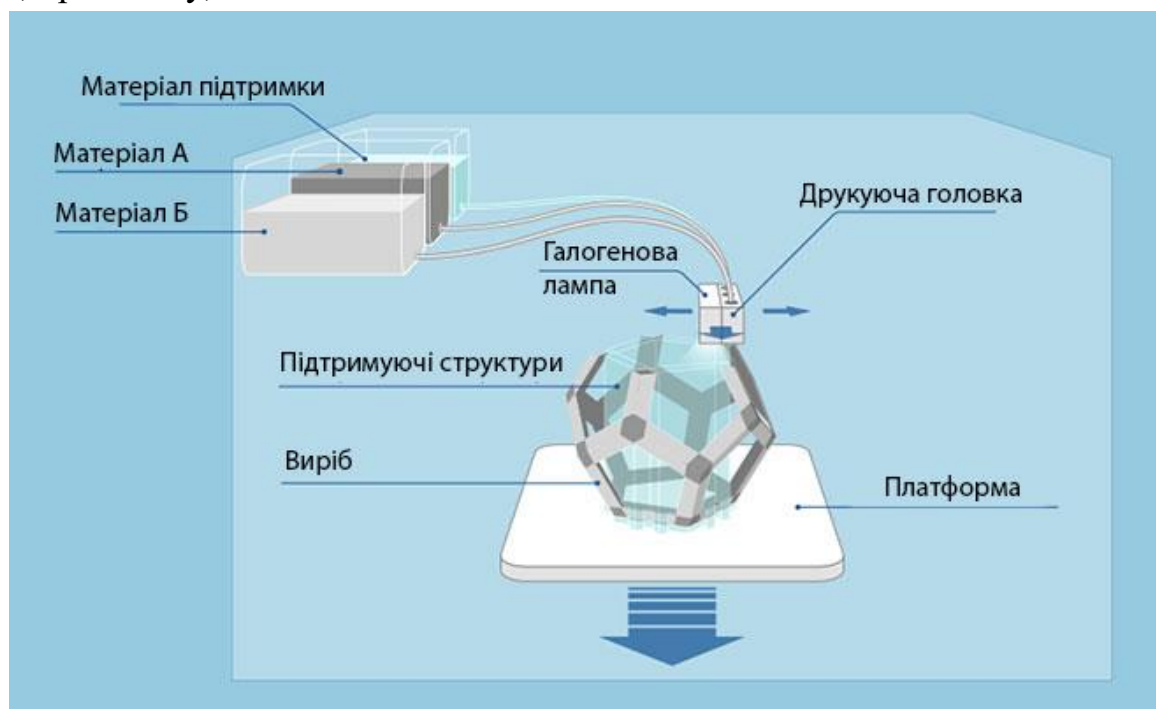


Рис. 1.9 – Схема MJM – методу наплавлення [17]

DLP (Digital Light Projector) – технологія наплавлення

DLP технологія досить схожа за своїм технологічним процесом на MJM. Як видно з рис. 1.10, значною відмінністю є вплив проектора звичайним світловим потоком на модель для затвердіння фотополімеру. Фотополімер доливається в кювету по мірі його витрачання. Під час процесу друку апарат закривається, щоб уникнути засвічення моделі.

Виступаючі частини також підтримуються за допомогою використання воску. Технологія видалення якою така ж як і для MJM.

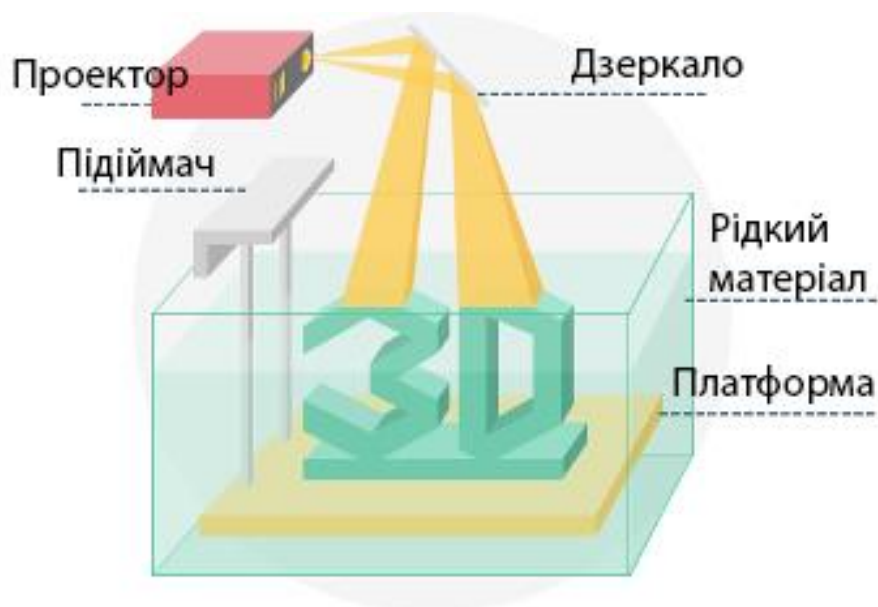


Рис. 1.10 – Схема DLP технології наплавлення [17]

FDM (Fused Deposition Modeling) – пошарове укладання полімеру

FDM – це моделювання методом осадження розплавленої нитки. При використанні цієї технології робота принтера відбувається безпосередньо від пластикових катушок, заправлених в екструдер (рис. 1.11). Основним принципом роботи є розплавлення пластикового прута, формування з нього краплі і нанесення її на рухому платформу в заданому місці.

Зразки моделей за цією технологією є досить міцними, що не піддаються деформації від фізичного впливу людини.

Головні переваги використання даного методу:

- доступність витратних матеріалів (пластик, скотч);
- великий асортимент пластику;
- зрозумілі технологічні процеси.

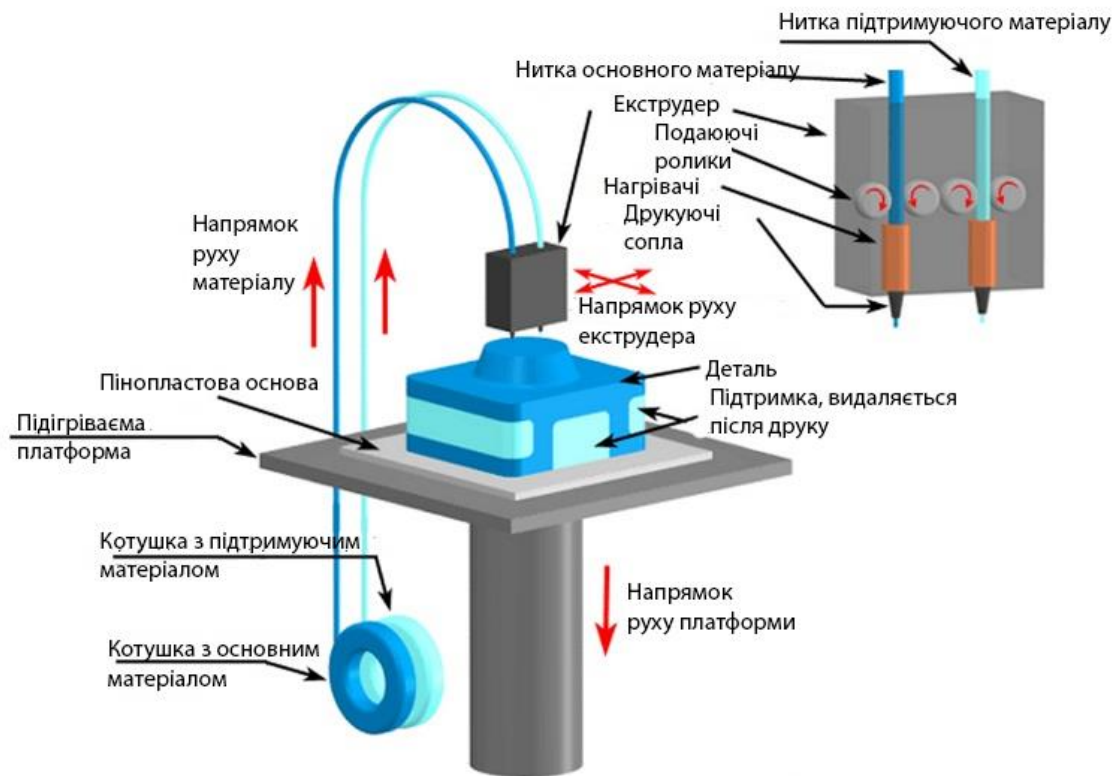


Рис. 1.11 – Схема FDM – пошарового укладання полімеру [17]

Типові конструкції 3d-принтерів

Індустрія 3D-друку переживає зараз етап бурхливого зростання і розвитку, що призвело до того, що на сьогоднішній день на ринку присутня широка і досить різноманітна гамма зразків обладнання: від аматорських принтерів, зібраних своїми руками в одиничному екземплярі з підсобних деталей і елементів, до промислових зразків, здатних створювати високоточні копії об'єктів з досить складною геометрією.

В цілому, конструкція 3D-принтерів не складна. Основними складовими апарату для 3D-друку є:

- статичні і рухомі елементи (механіка) – корпус, направляючі, ремені, гвинти, підшипники і т.д. Від того, наскільки правильно будуть підібрані ці деталі, залежить, яка якість буде у надрукованих виробів;
- деталі, завдяки яким принтер запускається і працює. Це двигуни, плати управління, драйвери, блок живлення і т. д.

Головна проблематика при виготовленні принтерів – забезпечити точність складання і подальшу точність позиціонування за всіма осями переміщення рухомих частин принтеру, з метою забезпечення необхідної якості та точності друку.

Розглянемо типову конструкцію 3D-принтера (рис. 1.12, 1.13), що базується на використанні технології об'ємного друку – FDM (метод пошарового наплавлення) та отримала на даний час найбільше поширення.

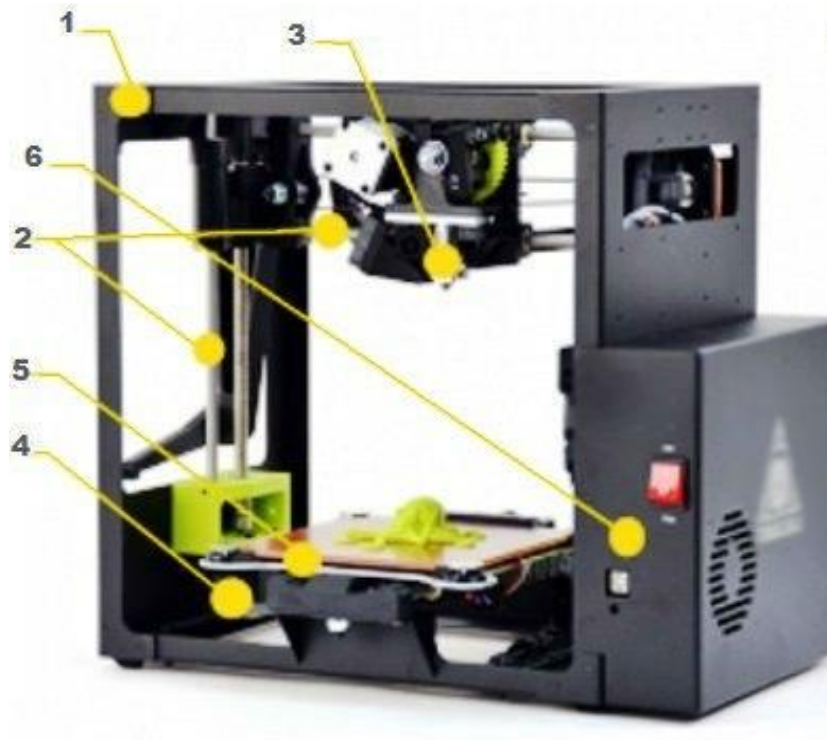


Рис. 1.12 – Загальний вигляд 3D-принтера, що базується на використанні технології об'ємного друку – FDM [18]

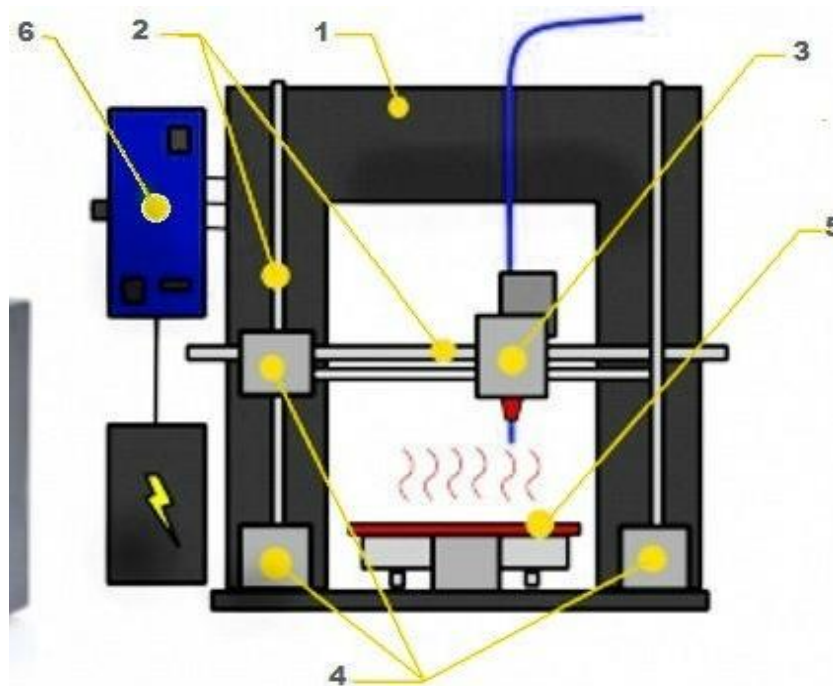


Рис. 1.13 – Типова конструкція 3D-принтера [18]

Основними складовими частинами 3D-принтеру (рис. 1.13) є:

1. Корпус, який є основою для монтажу конструкційних елементів.
2. Осі, які є направляючими для переміщення друкуючої головки в просторі.

3. Друкуюча головка (екструдер) – група частин, що виконують подачу, нагрів і витіснення (екструзію) витратного матеріалу через сопло на робочу поверхню.

4. Крокові двигуни – елементи конструкції 3D-принтера, що відповідають за рівномірне переміщення друкуючої головки в просторі.

5. Робочий стіл – платформа 3D-принтера, на якій і здійснюється безпосереднє створення тривимірного об'єкту.

6. Електроніка – набір елементів, який відповідає за управління та координацію дій принтера в процесі друку.

Детальніше зупинимося на деяких найбільш важливих елементах базової конструкції 3D-принтера [19].

Екструдер (друкуюча головка) 3D-принтера

Найбільш важливим елемент конструкції даного виду обладнання є екструдер. Екструдер 3D-принтера – це вузол, який забезпечує подачу розплавленого пластику в робочу зону апарату. На сьогоднішній день вже є величезна кількість різних конструкторських рішень.

Зокрема, є зразки обладнання, які оснащені змінними соплами різного діаметру. Також є варіанти принтерів з двома екструдерами в конструкції. Такі принтери здатні друкувати двома кольорами або здійснювати друк різними видами пластиків (друк підтримок пластиком PVA або HIPS).

Обслуговування екструдера 3D-принтера полягає в його очищенні зовні від налипання в процесі друку шматків пластику. Іноді, звичайно при роботі з неякісними витратними матеріалами, сопло екструдера може бути засміченим, в цьому випадку доводиться його чистити.

Робочий стіл 3D-принтера

Робочий стіл може бути як з нагрівальним елементом, так і без нього. Для калібрування його положення застосовуються або автоматичні приводи (автоматичне калібрування) або підпружинені болти (ручне калібрування). Виготовляють робочі столи зазвичай зі скла, хоча у деяких моделях 3D принтерів в якості платформи використовується перфорована поверхня з крихітними отворами, які заповнюються гарячим пластиком під час друку. Таким чином, об'єкт буде міцно триматися на місці під час друку, але потім виникає проблема видалення його з цих отворів.

Обслуговування даного елемента конструкції полягає в його калібруванні і регулярному очищенні поверхні.

Система координат 3D-принтера

Залежно від використовуваної системи координат, платформа може бути рухомою або статичною.

Як правило, в принтерах, що використовують Декартову систему координат, рух платформи в вертикальній площині відповідає за вертикальне позиціонування екструдера щодо самої платформи.

Деякі моделі додають і рух платформи по одній з осей в горизонтальній площині, що дозволяє дещо зменшити габарити пристрою за умови наявності відкритого корпусу.

Принтери дельтавидної конфігурації («дельта-роботи», дельта-принтери) використовують статичні платформи.

Позиціонування друкованої головки у всіх трьох вимірах здійснюється виключно за рахунок пересування самого екструдера.

Як правило, переміщення екструдера здійснюється каретками, що рухаються по трьом направляючим. Кареткам рух передається від двигунів за допомогою ремінної передачі.

Асиметричний рух регулює позиціонування екструдера по горизонталі за рахунок зміни кута нахилу кареток, а симетричний – по вертикалі (рис. 1.14). Таким чином, позиціонування екструдера в трьох площинах здійснюється виключно за рахунок руху трьох кареток, робоча платформа дельта-принтерів при цьому залишається на місці.

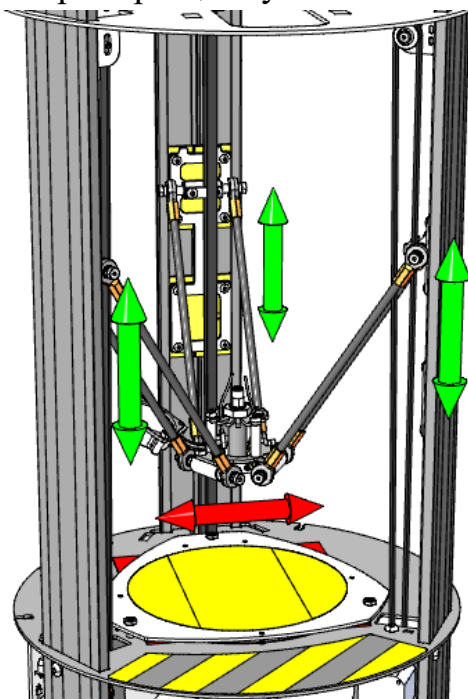


Рис. 1.14 – Загальна схема дельта-принтеру

Альтернативою може бути використання рухомої платформи і стаціонарного екструдера, але такі рішення поки не отримали широкого застосування.

Електроніка та управління

Плата управління встановлюється зазвичай в корпусі. Більшість 3D-принтерів мають плату на основі RAMPS. Зазвичай достатньо перевірити чи працює кулер охолодження (якщо він необхідний в даній конструкції).

Що стосується екрану управління 3D-принтером, то він, слід зазначити, присутній не на всіх моделях даної категорії обладнання. Зазвичай він є там, де є можливість друкувати з SD карти.

Використовувані матеріали

Для друку використовують різні пластики. Найпопулярніші це ABS, з якого виготовляють більшість пластмасових виробів, і PLA – біорозкладаний пластик, з якого виготовляють упаковку і одноразовий посуд. Крім того, використовується спеціальний вид пластику, який з недавніх пір з'явився на ринку – PVA-пластик (полівінілацетат). Фактично, це клей ПВА, правда в даному випадку з сухого стану, ПВА розбавляється водою до певної консистенції. А потім, за допомогою спеціального обладнання, розплавляється і формується в спеціальні гранули або ПВА-нитки для 3D-друку. Відомо, що PVA-пластик застосовується, як роздільник для надрукованих деталей (рис. 1.15), завдяки тому, що добре розчиняється у воді. Для прикладу можна друкувати гайку, яка накручена на болт, використовуючи PVA-пластик і будь-який інший пластик (ABS або PLA). А після друку готовий прототип виробу занурити на короткий час в воду, після чого можна легко зняти гайку. Таким чином, за допомогою PVA-пластика отримуємо за один друк кілька готових деталей.

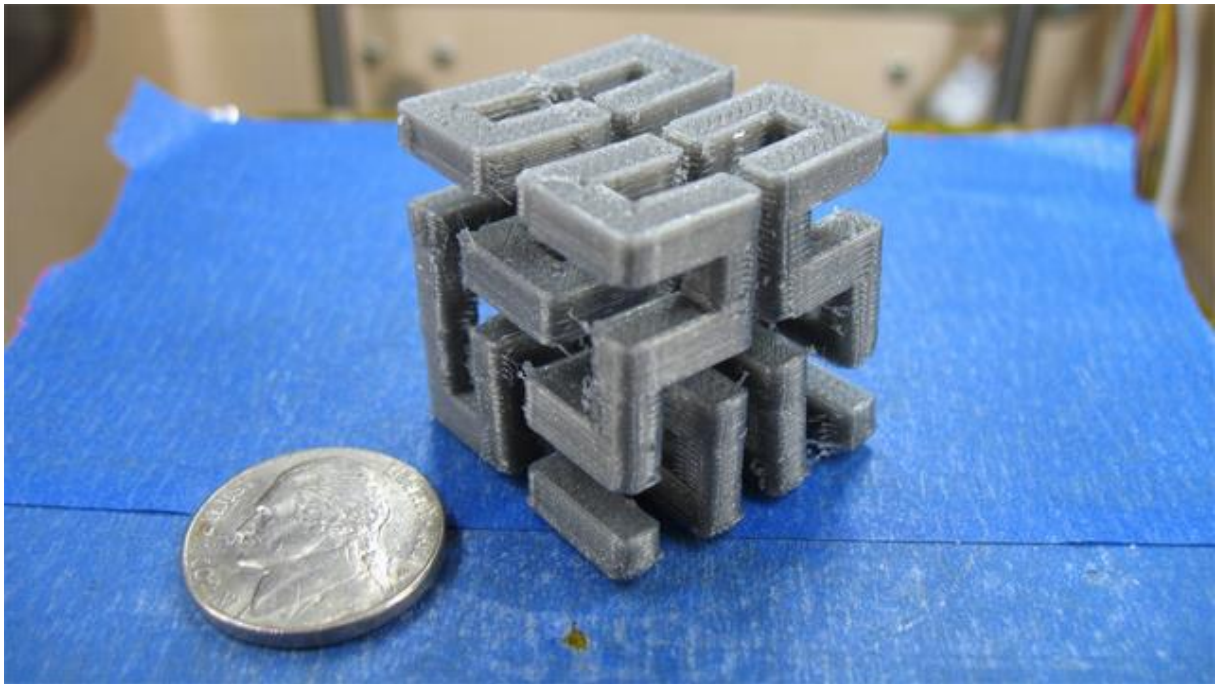


Рис. 1.15 – Результат друку з PVA пластику

Одним з головних мінусів даного матеріалу є його висока ціна і розчинність в воді, оскільки в окремих випадках це корисно, а в інших – абсолютно неприпустимо. Робота з PVA-пластиком проходить при температурі $+190^{\circ}\text{C}$, а температура його плавлення становить $+160-+170^{\circ}\text{C}$, температура застигання (склеювання) – $+45-+55^{\circ}\text{C}$.

Ще більш новим матеріалом для 3D-друку вважається Nylon (Нейлон). Матеріал стійкий до впливу широкого спектру розчинників і хімікатів. Особливо сьогодні популярний Nylon фірми Taulman 3D [20]. Відомо, що нейлон успішно використовується в різних галузях:

- у медицині – для регенерації і заміни кістки, а також для виготовлення міцних індивідуальних протезів з креативними перфораційними візерунками;

- для виготовлення прототипів виробів на верстатах з ЧПУ – з надрукованих нейлонових блоків, або для доопрацювання вже надрукованих нейлонових прототипів на зазначених верстатах;

- для друку сполучних елементів для металевих конструкцій;

- у ливарному виробництві для створення ливарних форм (не для крем'яних прототипів), за допомогою створення моделі форми в STL форматі для перетворення заданої моделі в цифровий G-код прийнятний для 3D-друку;

- в електрохімічній промисловості для створення акумуляторних сепараторів полімерних батарей;

- у музиці (наприклад нейлонові струни).

Polyethylene terephthalate (PET) – найпоширеніший вид пластика в світі. Він відомий як полімер, який використовується для пляшок з-під води, контейнерів для їжі.

"Чистий" PET рідко використовується для 3D друку, але його різновид PETG – досить поширений матеріал. "G" означає "glycol-modified", що робить матеріал чистішим, менш крихким і, що найважливіше, його простіше використовувати для 3D друку ніж стандартний PET. PETG часто позиціонують, як щось середнє між ABS і PLA, два найпоширеніших матеріали для 3D друку. PETG більш пластичний за PLA і їм легше друкувати ніж ABS пластиком.

Три пункти, які слід пам'ятати при використанні PETG:

- PETG абсорбує вологу з повітря. Це негативно позначається на подальшому процесі 3D друку, тому потрібно зберігати цей пластик в прохолодному, сухому місці;

- PETG просідає під час друку, тому потрібно бути уважним при друці перших шарів.

- Хоч PETG і не крихкий, він дряпається сильніше ABS.

Polyethylene co Trimethylene Terephthalate (PETT) – другий різновид PET. Цей матеріал більш жорсткий ніж PETG, знайшов популярність через те, що він прозорий.

Thermoplastic Elastomers (TPE) – це гнучкий, зносостійкий матеріал. У зв'язку з цим, TPE часто використовують для виготовлення медичних пристосувань, частин автомобіля, побутових приладів (рис. 1.16).

Насправді, TPE – це підклас сополімерів, але його часто використовують для комерційної назви матеріалів для 3D друку. М'які, з гарним розтягненням, ці матеріали можуть витримувати навантаження більше ніж ABS і PLA. З іншого боку, 3D друк може викликати труднощі, так як TPE важко подавати через екструдер.



Рис. 1.16 – Приклад деталі з термопластичного еластомеру [21]

Thermoplastic polyurethane (TPU) – різновид TPE. Матеріал, який заслужив окрему популярність в 3D друці. У порівнянні з TPE, TPU більш жорсткий. Отже, їм легше друкувати. Крім того, він більш зносостійкий і більш еластичний при низьких температурах.

Thermoplastic copolyester (TPC) – ще один різновид TPE. Використовується не так широко як TPU. Більшість характеристик схожі з TPE. Основні переваги – кращий опір хімічним і світловим випромінюванням, велика термостійкість (до +150°C) [21].

Для друку двома кольорами або одним кольором з допоміжним матеріалом використовується принтер з подвійним екструдером. На сьогодні ця технологія в аматорських принтерах ще не відпрацьована. STL формат представлення 3D-моделей друкованих виробів, обраний в якості стандартного серед любителів, не підтримує кілька кольорів. Але конструктивні рішення для таких принтерів вже доступні, так що ці проблеми вже в процесі вирішення.

На сьогоднішній день, існує безліч вихідних матеріалів для об'ємного друку, які можуть бути представлені у вигляді пластику ABS, піску, металу, паперу, воску і так далі.

Варіантів поставки пластику є декілька, але в основному це катушки (бухти), на які намотано пластикових прутків певного діаметру (рис. 1.17). Вартість пластику для друку варіюється від 150 грн. до 200 грн. за кг, водорозчинний коштує дорожче – 1400-1800 грн.

У різних видів пластику різний діапазон робочих температур. Для підтримки оптимальної температури використовується термодатчик.



Рис. 1.17 – Загальний вигляд поставки PLA пластику для друку [18]

Для забезпечення точності друку деталь має бути стабільно зафіксованою, нерухомою відносно поверхні робочого столу. Тобто необхідно забезпечити адгезію друкованої деталі та робочої поверхні (платформи). Адгезія має бути досить сильною, щоб не дати відірватися деталі від платформи при її охолодженні, але з іншого боку – досить слабкою, щоб відірвати надруковану деталь руками по закінченні процесу, не пошкодивши при цьому саму деталь. Для цього на практиці використовують термоскотч, малярний скотч та навіть PVP клей [22].

Так, як виріб на 3D-принтері може друкуватися довго (декілька годин чи діб), то і охолоджується він нерівномірно: шари надруковані раніше – охолоджуються раніше. Якщо друк виконується пластиком, який є чутливим до швидкої зміни температури (наприклад, ABS), виріб може деформуватися – згинатися. Саме для цього платформа для роботи з пластиком ABS підігрівається і на платформу наклеюють термоскотч (каптонова стрічка), а для роботи з пластиком PLA на платформу наклеюється малярський скотч або використовується PVP клей. У професійних 3D-принтерах процес друку взагалі відбувається в закритому боксі, де підтримується стабільна температура, що забезпечує повільне поступове охолодження і краще прилипання пластика. Так що, скотч та клей – це ще одні витратні матеріали при 3D-друку.

1.4 Алгоритм та основні етапи генеративного дизайну

Поняття «генеративний дизайн» є напрямком проектної діяльності на основі методу синтезу, який реалізується у промисловому дизайні. Завдяки можливості комп'ютерів обробляти великі масиви даних, конструктор може визначати форми і об'єкти за рахунок створення і варіювання параметрів і алгоритмів, що визначають якість моделі [23].

Напрямок генеративного дизайну, в основному, має на увазі способи «кодування» процесів. Найчастіше, це програми, алгоритми, процедури та ін. Оцінка цих процесів проводиться комп'ютером. Конструктор встановлює параметри, алгоритми, які можна використовувати, щоб варіювати процесом і те, як він обчислюється. При модифікації цих параметрів можна створювати нові елементи і форми дизайну, які створюються під час процесу. Перевіряючи результати і зміни в процесі, виконуючи знову і знову «перекодування», генеративний дизайнер удосконалює процес і, можливо, остаточний результат.

Алгоритм генеративного дизайну представлений на рис. 1.18.

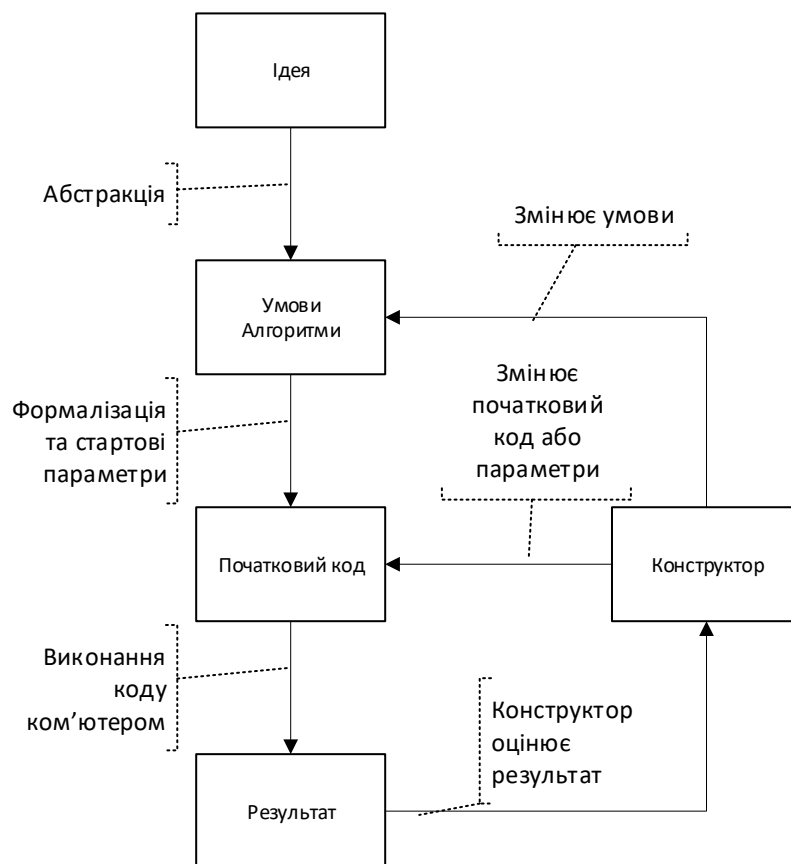


Рис. 1.18 – Алгоритм генеративного дизайну [23]

Основними етапами в генеративному дизайні виділяють:

- Установка параметрів;
- Побудова алгоритмів і правил;
- Програмування процесів;

- Варіювання результатами моделювання;
- Візуалізація процесів.

В роботі відкриваються два шляхи для реалізації проектів:

1. Ідея -> Алгоритм -> Результат;
2. Експеримент -> Несподівана ідея -> Результат.

Замість того щоб замислюватися про результат, дизайнери, конструктори зосереджені на процесі, від якого залежить підсумковий вид проекту. Під час цього процесу у конструктора може з'явитися безмежна кількість результатів, які можуть миттєво змінюватися при зміні параметрів, фактори випадковості і варіативності можуть призвести до абсолютно несподіваних результатів.

Одним з інструментів в роботі в області генеративного дизайну виступає мова програмування Processing – середовище для розробки алгоритмів з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, що дозволяє конструкторам без спеціальної підготовки в області програмування реалізовувати свої ідеї і проекти [24].

1.5 Використання 3D CAD систем автоматизованого проектування в генеративних технологіях

Програми на зразок AutoCAD і Photoshop вже автоматизували багато в роботі спеціалістів різних професій. На зміну їм приходить покоління генеративного програмного забезпечення, що дає змогу навчатися і самостійно створювати нові гіпотези того, як може виглядати готовий продукт.

Поки такі нові програми найчастіше зустрічаються у фахівців, ніж в руках аматорів, але в перспективі, доступ до них може отримати кожен.

Компанії, що створюють генеративні програми і сервіси

Adobe – відомий розробник програмного забезпечення (ПЗ) для дизайнерських команд, який впроваджує елементи машинного навчання і генеративного дизайну в пакет платних сервісів Creative Cloud.

Autodesk – один з найвідоміших та популярних постачальників CAD-рішень для будівельного і промислового виробництва, кілька років розвиває нове покоління ПЗ, що використовує генеративні алгоритми, в рамках проекту Dreamcatcher [25], який дозволяє вирішувати прикладні завдання конструювання і проектування з урахуванням різних вимог до матеріалів, способу виробництва, ефективності: користувач задає вимоги до конструкції, система знаходить безліч алгоритмічно синтезованих рішень і пропонує їх користувачеві для оцінювання або коригування завдання. Результати вбудовуються в галузеві продукти. Прикладом може служити Within Medical – генеративне ПЗ для створення ортопедичних імплантів.

Google – компанія активно досліджує можливості машинного навчання і генеративних технологій в рамках проекту DeepMind. Серед доступного ПЗ, можна виділити редактор AutoDraw – онлайн-додаток.

Siemens – німецький концерн містить підрозділ PLM Software, що створює ПЗ для підприємств (близько 14 тис. клієнтів і 15 млн. ліцензій по світу). В пакети PLM входить програма для моделювання Solid Edge, в останню версію якої додані генеративні алгоритми.

Altair Inspire – це потужне та просте у використанні ПЗ генеративного проектування/оптимізації топології та швидкого моделювання для інженерів-дизайнерів. Його використання покращує процес розробки концепції, дозволяючи керувати імітаційним дизайном для підвищення ефективності, міцності та технологічності продукції. Це може призвести до скорочення витрат, часу розробки, витрат матеріалів і ваги виробу. У порівнянні, наприклад, з Ansys Mechanical – це більш доброзичливе ПЗ, яке розраховане на рішення декількох вузьких завдань – моделювання взаємодії деталей в збірках, простого ескізного проектування, топологічної оптимізації. Об'єкти, з якими необхідно працювати, можуть бути як створені в Inspire, так і імпортовані з інших

CAD-систем. Крім топологічної оптимізації, Inspire здатна формувати сітчасте заповнення замість суцільного, ця функція стане в нагоді при необхідності ще більше знизити масу деталі.

ANSYS – лінійка продуктів ANSYS Inc. дозволяє вирішити практично будь-яке завдання механіки деформованого твердого тіла або отримати поєднане рішення задачі механіки з вирішенням завдань інших областей фізики, наприклад гідрогазодинаміки, теплопереносу або електромагнетизму. Даний продукт пропонує можливість створення єдиної фундаментальної (мультифізичної) матриці взаємодії полів, підтримуючи акустичний, п'єзоелектричний, термотримкий і термоелектричний типи аналізу [38]. ANSYS Mechanical дозволяє моделювати деформацію конструкцій під навантаженням, розраховувати вплив вібрацій і виникнення резонансів. Для проведення автоматизованої топологічної оптимізації необхідно імпортувати модель-заготовку деталі, вказати точки кріплення і прикладання навантажень, задати граничні умови, такі як мінімальна товщина. Можливо моделювання як традиційних матеріалів, так і анізотропних – композити, 3D-друковані деталі.

Генеративне моделювання в Solid Edge ST10

Для приладобудування особливий інтерес представляє оптимізація топології, оскільки вона приносить миттєвий ефект у вигляді економії матеріалів і енергоресурсів, а також збільшення продуктивності. Саме цей вид генеративного дизайну реалізований в Solid Edge ST10 [26].

Процес топологічної оптимізації – це пошук оптимальної форми деталі при заданих умовах закріплення і навантаження. Підкреслимо, що оптимальною в даному випадку вважається форма, що забезпечує найменшу вагу.

В Solid Edge ST10 при запуску генеративного проектування конструктор вказує область, в межах якої буде формуватися деталь. Для цього задається її приблизна форма. На ній фіксується розташування елементів кріплення; вказуються області, які не повинні змінюватися, а також робочі навантаження. Далі у діалоговому вікні конструктор задає відсоток зниження маси, коефіцієнт запасу по міцності.

У цьому ж вікні задається ще один важливий параметр генеративного моделювання – час роботи програми. Від цього залежить точність одержуваної моделі, адже це обмежує кількість ітерацій.

Рішення, отримане в результаті топологічної оптимізації (рис. 1.19), можна відразу ж відправити на 3D-друк, але функціонал Solid Edge ST10 цим не обмежується. У десятій версії вперше застосовується технологія об'єднаного моделювання (Convergent Modeling): BREP і фасетне уявлення об'єднуються в одній моделі, що дає можливість редагувати продукт генеративного дизайну.

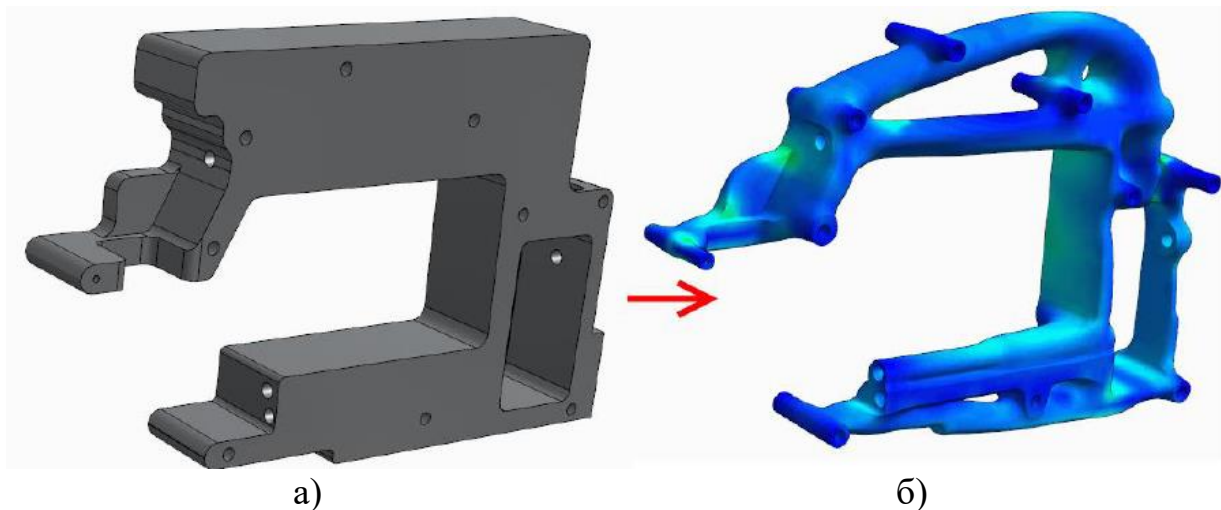


Рис. 1.19 – Результат генеративного дизайну реалізований в Solid Edge ST10 де: а) початкова модель; б) результат генеративного дизайну [23]

По завершенні процесу оптимізації робота над деталлю може бути продовжена. Ніяких дій, пов'язаних з «проблемним» представленням сітки в точне уявлення, не потрібно. Конструктор може додавати і прибирати елементи, можуть виконуватися булеві операції; якщо йде робота над складанням, то можливо віднімання тіла однієї деталі з іншого і т.д. Сіткове уявлення при цьому постійно оновлюється.

Таким чином, Solid Edge ST10 не просто забезпечує застосування якісно нової технології генеративного моделювання, але ще і пропонує зручну можливість модифікації результату.

Комп'ютерна оптимізація топології дає дивовижні і абсолютно незвичайні варіанти геометрії. Вона дозволяє знизити вагу виробів без погіршення характеристик міцності, оптимізувати витрати матеріалу, відповідно знижуючи вартість виробу. Однак при всьому цьому відразу ж виникає питання про технологічність продукту та технології його виготовлення.

Маючи оптимізовану модель (рис. 1.19, б) можна переконатися в непридатності традиційних способів обробки металів різанням і тиском. Єдине, на що можна розраховувати, – це лиття, технологію досить енергоємну і проблемну з точки зору екології.

Виготовлення таких виробів можливе за допомогою адитивних технологій, які за останнє десятиліття отримали неймовірний поштовх розвитку [27]. Можливість створювати вироби складних геометричних конфігурацій відкрило перед тривимірним друком дорогу в промислові і наукові сфери. Моделі, побудовані за цифровими аналогами, не поступаються за якістю традиційним деталям. З 3D-технологією промислове виробництво отримало можливості значно прискорити робочі процеси, а витрати на реалізацію готового виробу знизити в рази. Технологія 3D-друку стала протилежністю звичним фрезерним та різальним верстатам. За традиційного виробництва деталь формується шляхом видалення зайвого матеріалу. У 3D-принтерах ситуація будується

протилежним способом [28]. Тут відсутні відходи матеріалів і досягається максимальна точність виготовлення. Саме це дозволяє комерційним підприємствам і заводам звертати все більшу увагу на економічно вигідну технологію виробництва.

Вже сьогодні завдяки технологіям 3D-друку можна створювати складні предмети (деталі, комплектуючі, тощо), які практично неможливо виготовити за допомогою традиційних промислових процесів.

Раніше 3D-принтери використовували для створення прототипів і продуктів тестування. Сьогодні, у зв'язку зі стрімким розвитком подібних технологій і їх впровадженням в різні сфери життя і діяльності, навіть великі промислові компанії, такі як General Electric, EADS і Siemens, впроваджують 3D-друк у власне виробництво. І не тільки в випробувальних лабораторіях, а й в цехах. Наприклад, німецька компанія Siemens використовує тривимірний друк для виробництва певних частин і деталей для газових турбін. Саме ця компанія є однією з перших міжнародних корпорацій, що використовують у виробництві власної продукції технологію 3D-друку [29].

Подібні новаторства використовуються і в авіації, і навіть в космічній галузі, що значно знижує кількість відхідних матеріалів і, звичайно ж, витрат на дорогі матеріали, наприклад, такі як титан.

Про масштабні перспективи стрімкого розвитку і використання технології 3D-друку в промисловості свідчить і те, що принтери стають доступними навіть для середніх і дрібних підприємств. Такі машини працюють швидше, ніж будь-які інші пристрої і, що не менш важливо, практично повністю виключається людський фактор, що часто ускладнює і уповільнює виробничі процеси.

Висновки до розділу 1

Виконано огляд та аналіз поняття генеративного дизайну та адитивних технологій. Основними напрямками використання сучасних генеративних технологій вважається застосування технологій в конструюванні і прототипуванні, промисловому виробництві та військовій справі. Основними принципами 3D друку вважаються 5 технологій, що отримали найбільшого поширення. Виконано огляд та аналіз типової конструкції 3D принтеру, що дозволило розглянути основні складові частини 3D принтерів та використовуваних для них матеріалів. Розглянуто алгоритм та основні етапи генеративного дизайну. Виконано огляд систем автоматизованого проектування в генеративних технологіях та компанії, що створюють генеративні програми і сервіси. Даний аналіз дозволив встановити, що генеративний дизайн та топологічна оптимізація – безсумнівний крок вперед, а Solid Edge ST10 – проривна система автоматизованого проектування. Вже в межах найближчого десятиліття збільшаться можливості і стане масово доступний 3D-друк. Генеративний дизайн надає кращі рішення для виробництва, але через складність своєї форми та неможливість виготовлення традиційними методами, вони вимагають застосування 3D-друку. Застосування генеративного дизайну і 3D-друку якісно змінює продукцію приладобудування, машинобудування, авіаційної та космічної галузей, медицини та інших галузей, але потрібні САПР, що забезпечують їх інтеграцію в звичайний процес проектування. Siemens PLM Software створила таку САПР – Solid Edge ST10. Це перша САПР, що дає можливість в повній мірі використовувати переваги генеративного дизайну і адитивних технологій.

Отже, метою дисертаційних досліджень є використання технологій генеративного дизайну для вдосконалення конструкції деталей приладів та забезпечення їх експлуатаційних характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати основні напрямки використання генеративних технологій;
- визначити основні поняття генеративного дизайну, топологічної оптимізації та адитивних технологій принципи 3D друку;
- проаналізувати алгоритм та основні етапи генеративного дизайну;
- визначити основні САПР системи, що включають модулі генеративного дизайну, та дослідити їх можливості;
- виконати моделювання вдосконаленої конструкції деталі методами генеративного дизайну;
- перевірити якість отриманих рішень;

- виготовити прототипи змодельованих деталей на лабораторному 3D принтері;
- розробити методику вдосконалення конструкції деталей в приладобудуванні та машинобудуванні, а також рекомендації для її використання.

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБУ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ

2.1 Методика моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну

Генеративні технології, які складають важливий розділ інтегрованих технологій, в останнє десятиліття отримали значний розвиток і охопили такі галузі промислового виробництва як авіація, автомобілебудування, приладобудування, медицина, археологія тощо [30].

Генеративний дизайн – це процес конструювання структури деталі та її параметрів при заданому критерії оптимальності зі збереженням або поліпшенням її функціональних можливостей.

На відміну від традиційних технологій проектування, генеративний дизайн дозволяє змінити стандартну геометрію на геометрію, спеціально адаптовану під певну технологію виготовлення. І це може бути, як традиційна технологія (наприклад, лиття), так і адитивний процес [2].

Програмне забезпечення для генеративного дизайну (топологічної оптимізації) перебудовує початкову геометричну модель об'єкта. При цьому завантажується геометрична модель виробу, яка раніше створена іншим методом. Завантажуючи модель в програмне забезпечення з можливостями генеративного дизайну, ми маємо змогу відзначити місця, які не будуть підлягати змінам, наприклад, це можуть бути місця для кріплення.

Все інше, що не потрапило в ці зони, але також належать деталі, називаються *design space*, тобто це ті зони деталі, де програма генерує нову геометрію [31].

Відповідно до службового призначення виробу та умов експлуатації прикладаються навантаження, які деталь повинна витримувати, тобто створюється силова схема навантажень. І далі, на основі заданих параметрів, програма створює нову оптимізовану геометрію, де критерієм оптимізації є мінімальна маса деталі. Між незмінними місцями для кріплення вона вибудовує нову модель.

Процес побудови нової моделі досить витратний за часом і вимагає великих обчислювальних ресурсів. Далі для верифікації отриманої моделі виконується аналіз напруження в кожному перетині деталі, з метою визначення допустимості отриманої геометрії. При цьому використовується метод скінченних елементів. Для кожного елемента виробу програма генерує та вирішує інтегральні рівняння, враховуючи при цьому взаємозв'язок між усіма перетинами.

У випадку негативного висновку виконується перебудова геометрії деталі. Потім геометрія затверджується і може бути передана на наступний етап підготовки виробництва.

Генеративний дизайн, як правило, має аморфні форми, в яких немає плоских, прямих ліній, а можуть бути сплайни другого порядку. При дотриманні тих же самих експлуатаційних властивостей деталі таке моделювання дозволяє зменшити масу виробу, що є дуже важливим при проектуванні та виготовленні багатьох механізмів та машин. Зниження маси виробу при збереженні функціоналу виробу – це завдання номер один в літакобудуванні, авіакосмічній галузі і автомобілебудуванні тощо [32].

2.2 Початкова інформація для дизайну

Для топологічної оптимізації обирають деталі в механізмах приладів та машин, які припускають та потребують зменшення маси при збереженні їх експлуатаційних властивостей.

Як приклад розглянуто деталь «Коромисло», яка виготовлена зі сталі 40Х ДСТУ 7806:2015 та має масу 102 г, є відповідальною деталлю при роботі поворотного механізму (рис. 2.1). Зрозумілим є те, що дане конструктивне рішення орієнтоване для виготовлення деталі «Коромисло» традиційними методами виробництва на універсальному обладнанні.

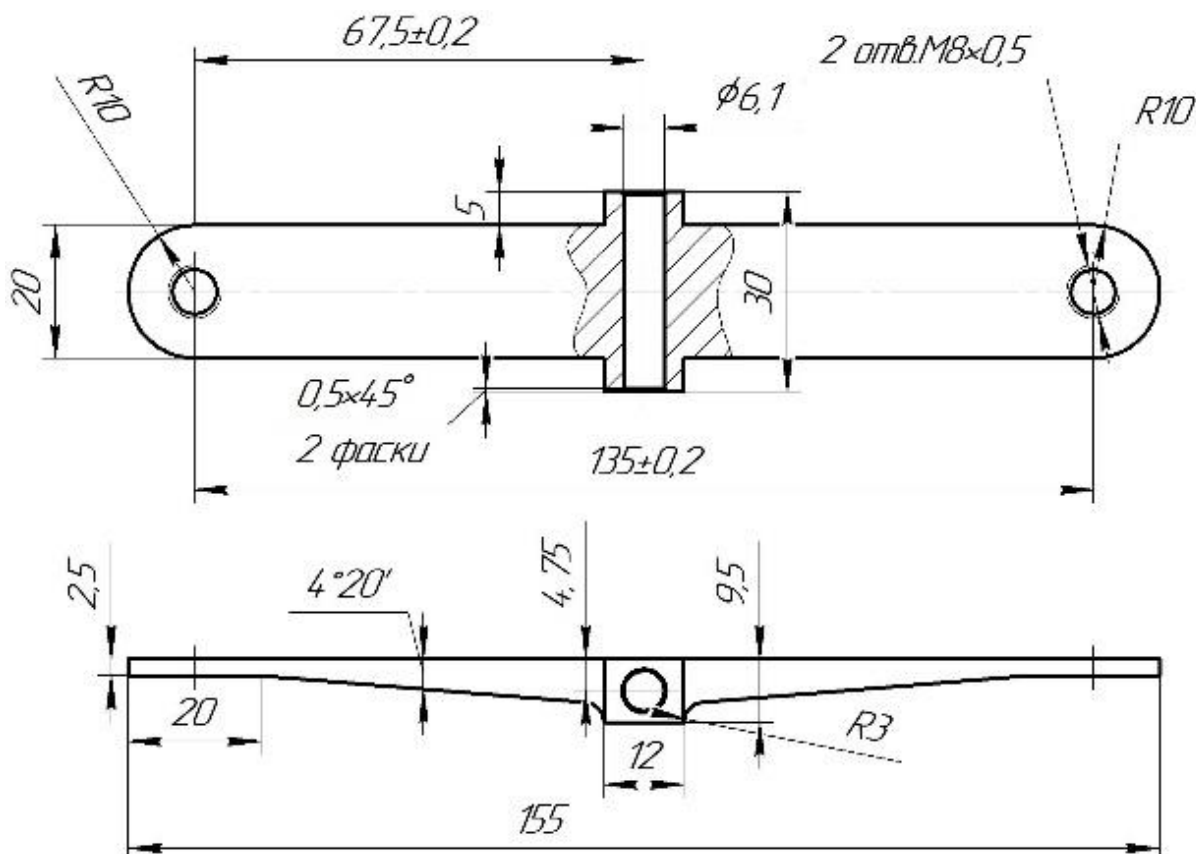


Рис. 2.1 – Ескіз деталі «Коромисло»

Відповідно до конструкторських даних, в процесі експлуатації поворотного механізму передбачається силове навантаження на зони бокових отворів деталі «Коромисло» в межах до 500 Н.

2.3 Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану деталі з початковою геометрією

На першому етапі виконували аналіз напружено-деформованого стану деталі з початковою геометрією та визначали можливість експлуатації деталі без руйнування чи пластичних деформацій.

Тривимірну модель деталі (рис. 2.8, *a*) створювали в програмному середовищі Solid ST 10, яку в подальшому імпортували в ANSYS Workbench. Використання програмного забезпечення ANSYS обумовлено необхідністю аналізу стану деталі в процесі її експлуатації. Програма дозволяє моделювати закріплення та прикладені сили на деталь, що в свою чергу дає можливість визначити розподіл напружень та деформації в матеріалі деталі.

Початковим етапом було створення нового проекту «File → New Project» і додавання в робоче поле модулю Static Structural (рис. 2.2).



Рис. 2.2 – Модуль Static Structural

На наступному етапі задавали властивості матеріалу деталі (сталь 40Х ДСТУ 7806:2015) та атрибути кінцевих елементів. Для введення цього матеріалу в модулі «Static Structural», що викликається командою «Engineering Data», вказували назву матеріалу та необхідні фізико-механічні властивості (рис. 2.3).

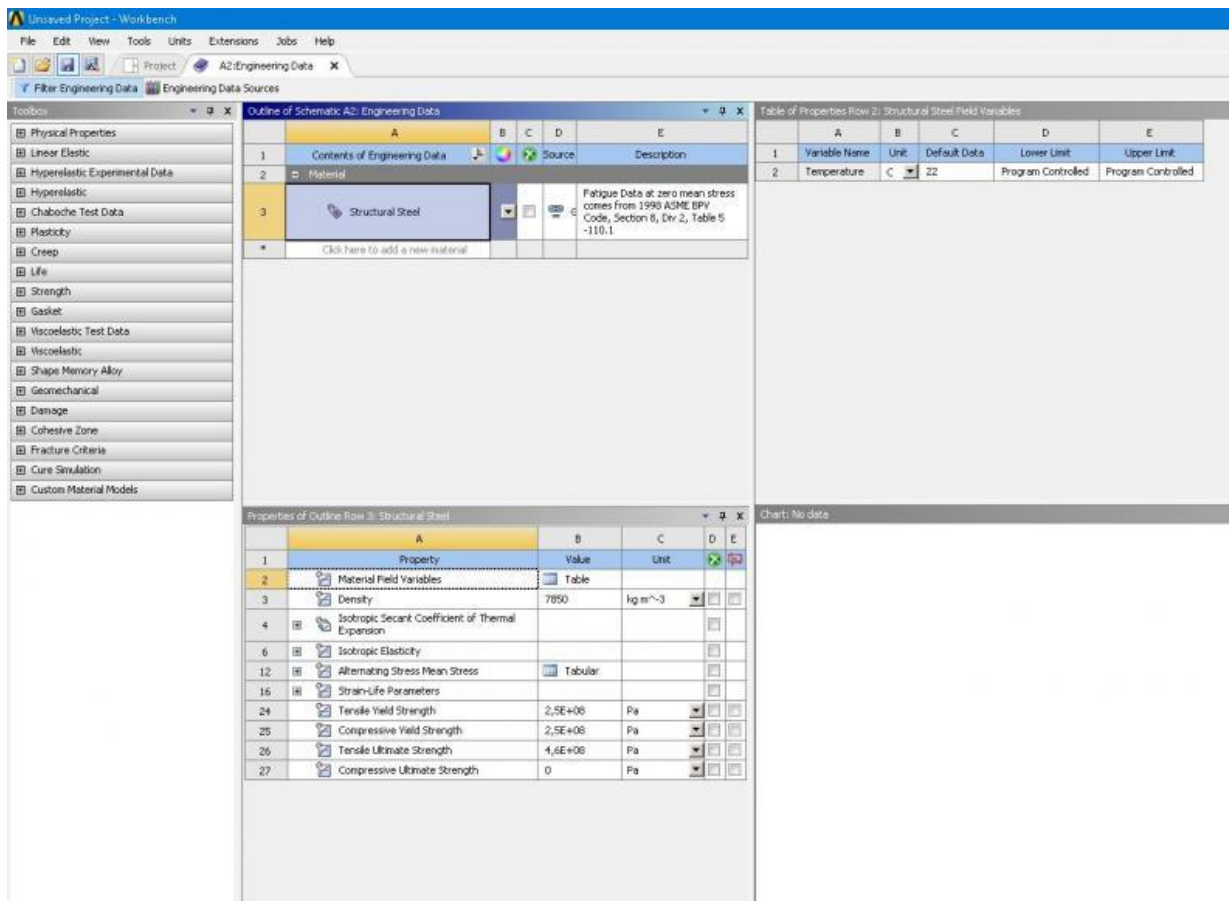


Рис. 2.3 – Вікно вибору матеріалу

Командою «Geometry» відкривається вбудований в ANSYS CAD. Він досить простий і креслити в ньому можна практично без ескізів і розмірів на них. Після імпорту деталі, закриваємо вбудований CAD, модель при цьому зберігається в тимчасових файлах. Повернулися в схему проекту, де поряд з «Geometry» з'явилася галочка. Значить з геометрією деталі все добре.

Наступним кроком використано команду «Model», яка ініціює ANSYS Mechanical. Для розрахунку напружень та деформації деталі, побудовано кінцево-елементну сітку, для того, щоб зрозуміти які напруги виникають в елементах сітки. І чим їх більше, тим точніше можна визначити напруження в деталі. Для створення тетрагональної трьохвимірної кінцево-елементної сітки на основі утвореного «твердого» тіла застосовуємо команду «Mesh». Для покращення результату, покращили сітку, для цього змінено параметр «Sizing – Resolution». Після застосування команди «Mesh → Generate Mesh» виконана генерація сітки кінцевих елементів, результат якої представлено на рис. 2.4.

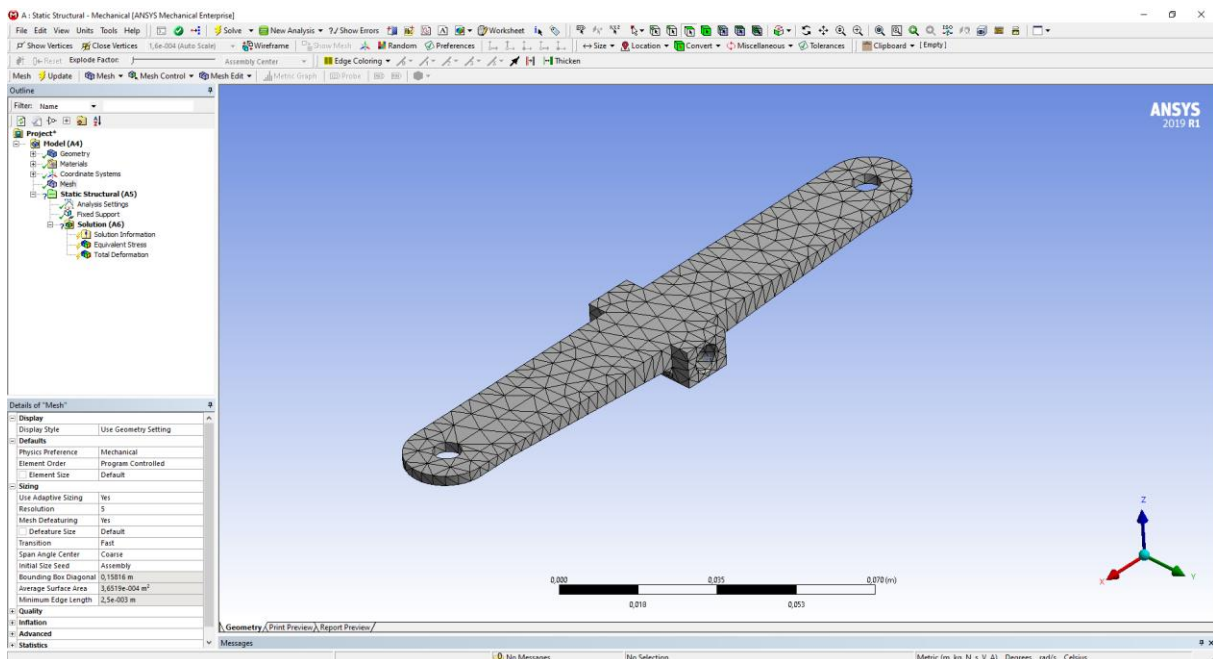


Рис. 2.4 – Загальний вигляд кінцево-елементної моделі коромисла

На наступному етапі досліджень задано граничні умови, що моделюють закріплення коромисла в механізмі його використання (граничні умови 1-го роду). Для аналізованої деталі виконано її закріплення у вигляді фіксації по внутрішній поверхні центрального отвору. Для цього обрано отвір та виконано команду «Static Structural → Insert → Fixed Support», яка представлена на рис. 2.5.

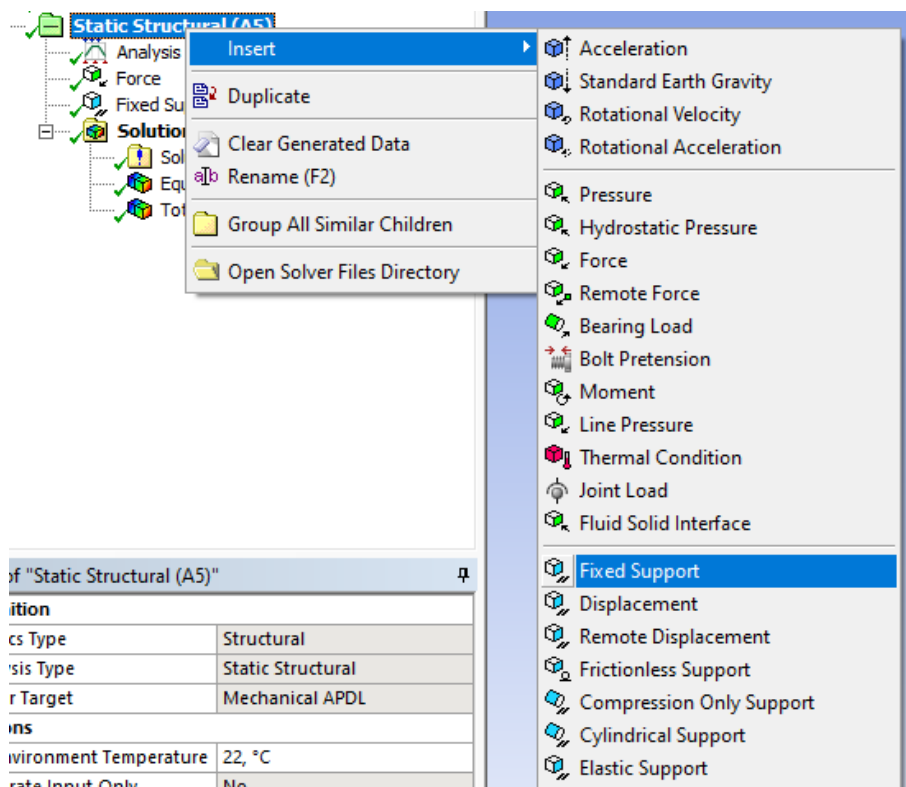


Рис. 2.5 – Команда «Fixed Support»

Прикладання робочих сил здійснено на внутрішні циліндричні поверхні отворів під кріплення командою «Static Structural → Insert → Force», яка представлена на рис. 2.6.

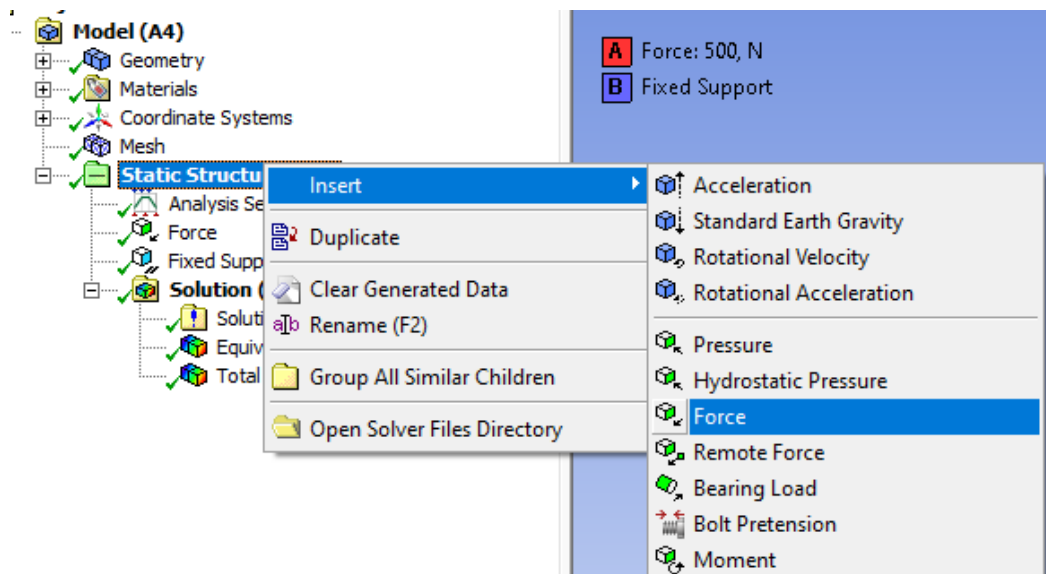


Рис. 2.6 – Команда «Force»

Момент, що діє на деталь «Коромисло», змодельовано за допомогою пари сил, при цьому задали значення експлуатаційного навантаження 500 Н, не по вектору, а по компонентам уздовж кожної осі (рис. 2.7). Навантаження на моделі представляються у вигляді стрілок за напрямком навантаження та його числовим значенням.

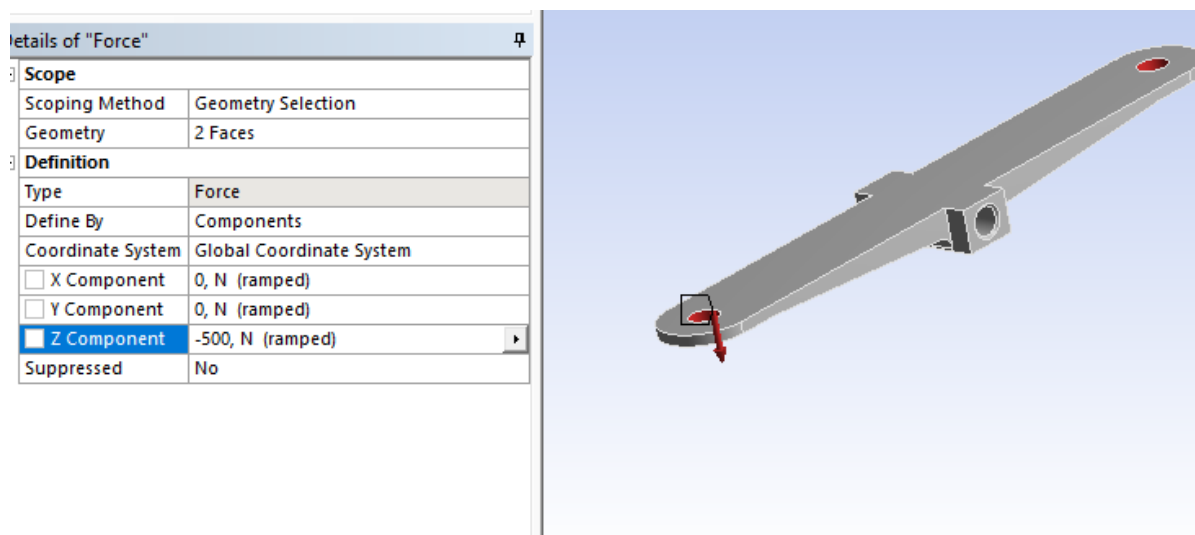
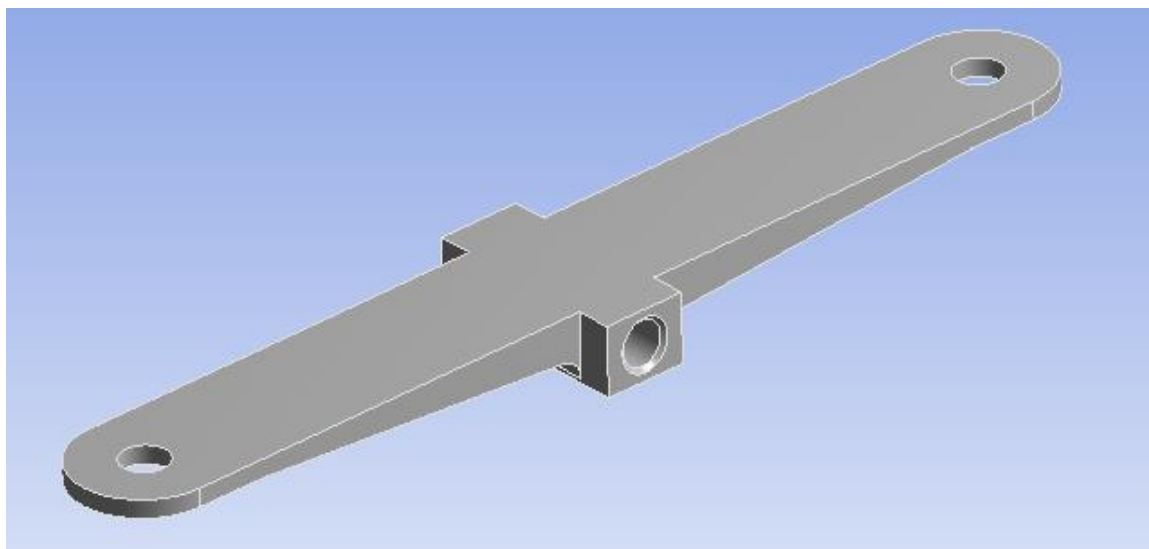


Рис. 2.7 – Схема силового навантаження

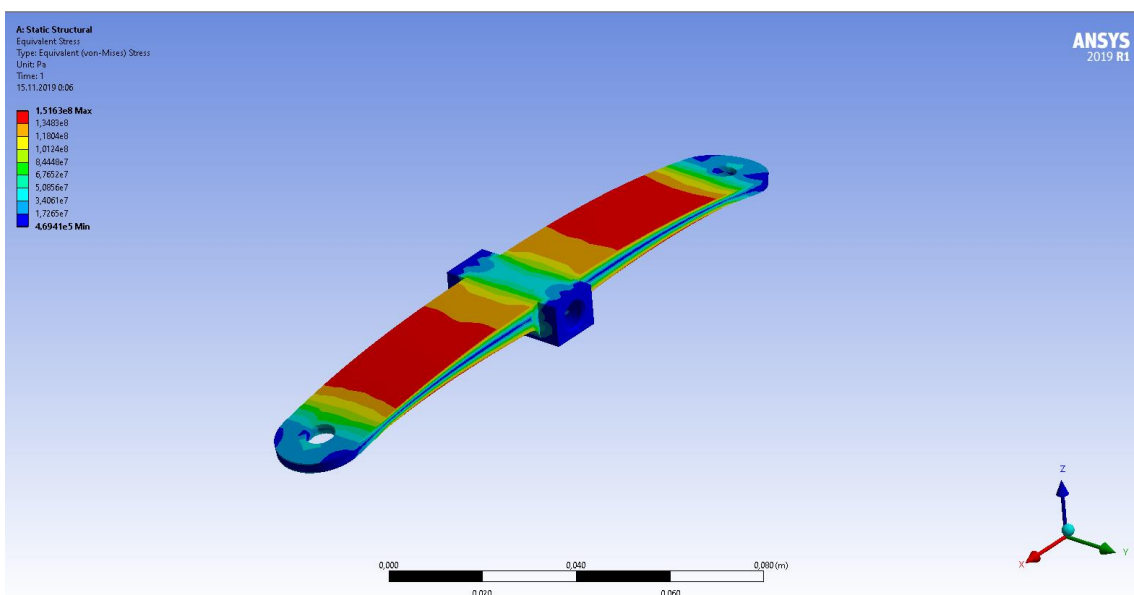
Після цього етапу модель готова до виконання розрахунку напружено-деформованого стану. Як критерій оцінки напружень в деталі було використано напруження по Мізесу. Командою «Solution → Insert → Stress → Equivalent (von-Mises)». Для оцінки тотальної деформації

використано команду «Solution → Insert → Deformation → Total». Надалі використовуємо команду «Solve» і оцінюємо результат.

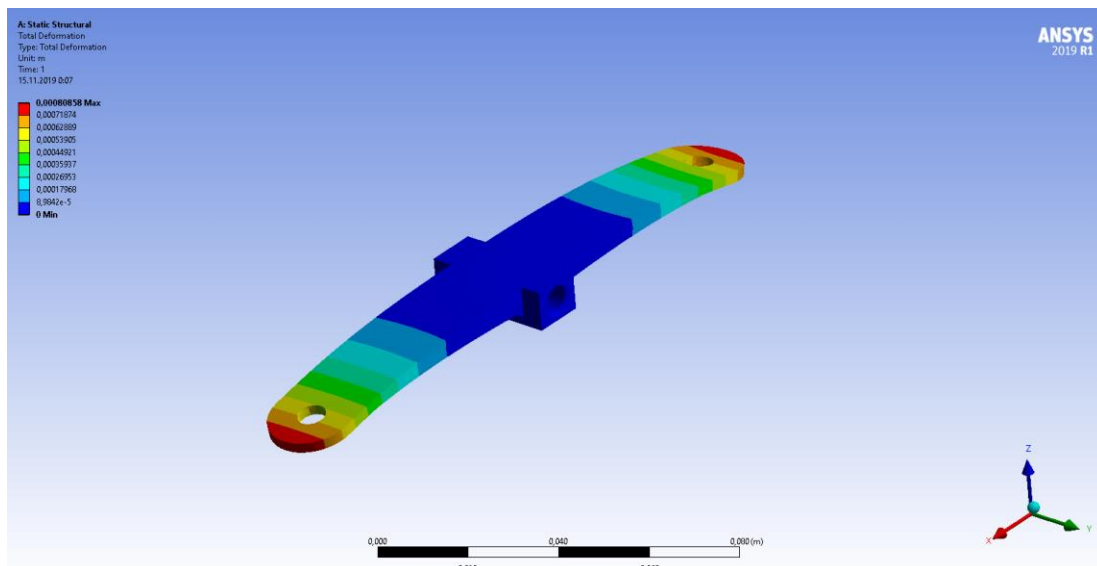
Результат аналізу моделювання напружень та деформації відповідно представлено на рис. 2.8, б та рис. 2.8, в, з яких видно, що напруження знаходяться в діапазоні від 469.41 кПа до 151.63 МПа, а деформація – від 0 до 0,80858 мм.



а)



б)



в)

Рис. 2.8 – Результат комп’ютерного моделювання напружено-деформованого стану деталі:

- а) тривимірна модель деталі «Коромисло»,
- б) результат визначення напружень;
- в) результат визначення деформацій

В лівій частині графічного інтерфейсу програми представлено кольорову діаграму, що відображає значення еквівалентних напружень за гіпотезою Мізеса для об’ємних KE.

Відповідно до експериментальних досліджень механічних властивостей сталі 40Х [33] побудовано діаграму розтягу, що показана на рис. 2.9. За отриманими числовими значеннями розраховано для трьох зразків зі сталі 40Х механічні властивості даного матеріалу(табл. 2.1).

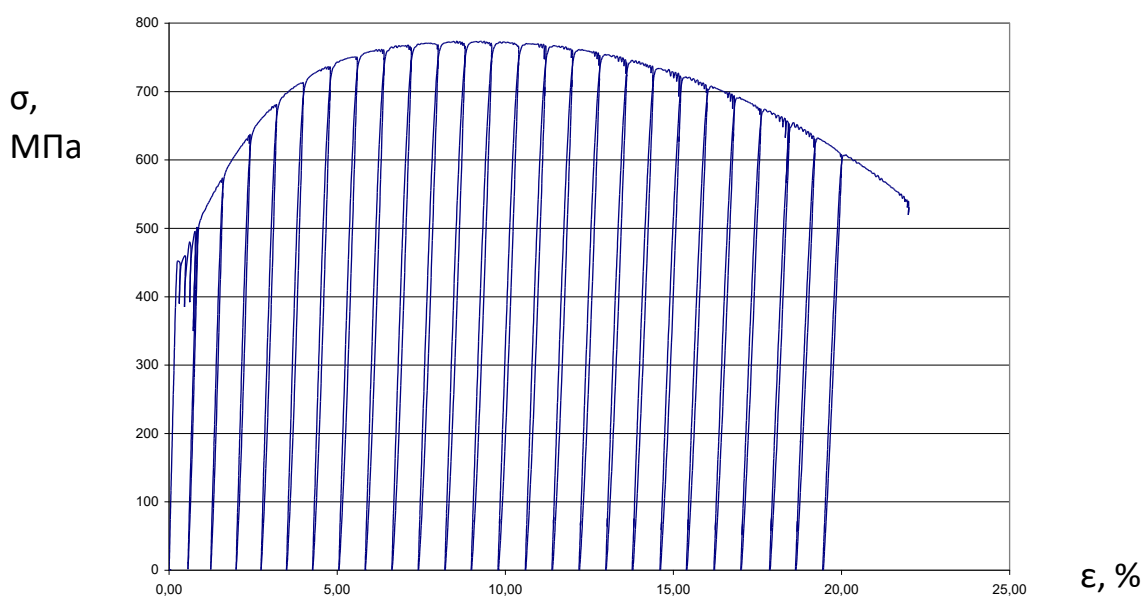


Рис. 2.9 – Діаграма розтягу для зразків зі сталі 40Х ГОСТ 4543-71 [33]

Таблиця 2.1 – Результати обробки експериментальних досліджень при статичному розтягу [33]

| № з/п зразка | σ_{σ} , МПа | $\sigma_{\sigma_{пц}}$, МПа | $\sigma_{\sigma_{тек}}$, МПа | E , МПа | Відносне звуження ψ , % | Відносне видовження δ , % |
|--------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 785 | 417 | 364 | 214952 | 66,51 | 18,09 |
| 2 | 783 | 441 | 395 | 212175 | 67,51 | 17,90 |
| 3 | 773 | 384 | 384 | 203973 | 68,83 | 18,01 |

де, σ_{σ} – границя міцності,

$\sigma_{\sigma_{пц}}$ – границя пропорційності,

$\sigma_{\sigma_{тек}}$ – границя текучості,

E – модуль пружності,

ψ – відносне звуження,

δ – відносне видовження досліджуваного матеріалу.

При цьому середніми значеннями вказаних вище параметрів є:

$\sigma_{\sigma} = 780,33$ МПа;

$\sigma_{\sigma_{пц}} = 414$ МПа;

$\sigma_{\sigma_{тек}} = 381$ МПа;

$E = 210366,6667$ МПа;

$\psi = 67,62$ %;

$\delta = 18$ %.

Результати моделювання напружень в матеріалі деталі під дією експлуатаційних навантажень (рис. 2.8, б) показують, що максимальними є напруження в 152 МПа, що нижче границі пропорційності для даного матеріалу. Це означає, що деталь не буде деформуватися пластично, тобто деформування буде лише пружне і, після зняття прикладених сил, деталь повернеться до початкового стану.

2.4 Комп'ютерне моделювання удосконаленої конструкції виробу за допомогою генеративних технологій

Далі переходили до етапу топологічної оптимізації, яка виконувалася в середовищі ANSYS Workbench, де критерієм оптимізації геометрії деталі є мінімальна вага.

Бачимо модуль «Topology Optimization» і перетягуємо його на «Solution» як показано на рис. 2.10.

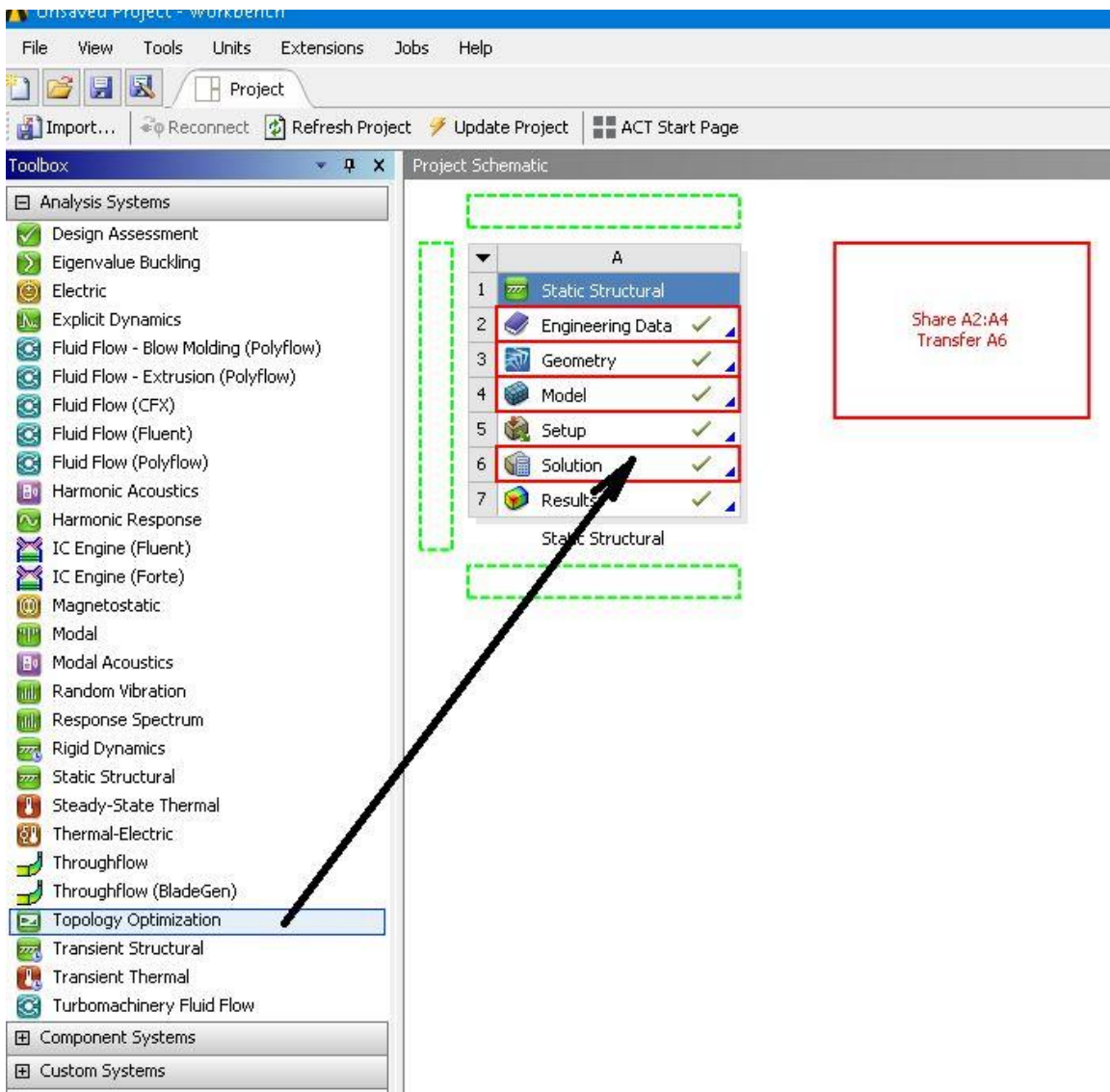


Рис. 2.10 – Схема проекту

Зв'язки самі з'являться і вийде зв'язка модулів, яка представлена на рис. 2.11.

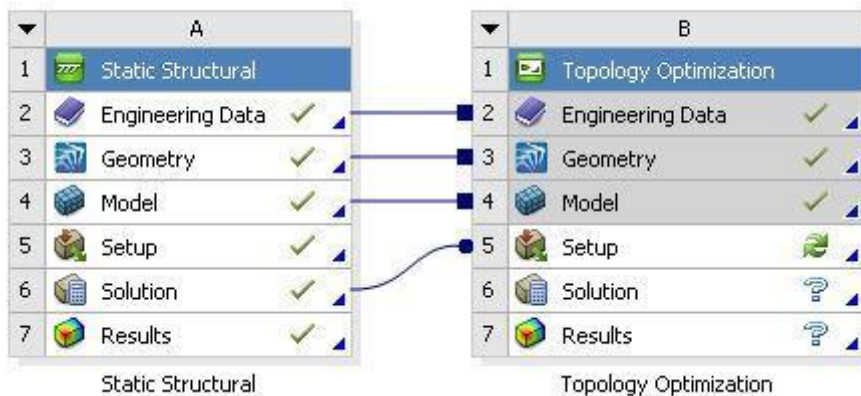


Рис. 2.11 – Зв'язка модулів

Тепер виконуємо команду «Setup» у другому модулі. Відкриється ANSYS Mechanical, тільки тепер в ньому буде доступна ще одна гілка в дереві розрахунків (рис. 2.12).

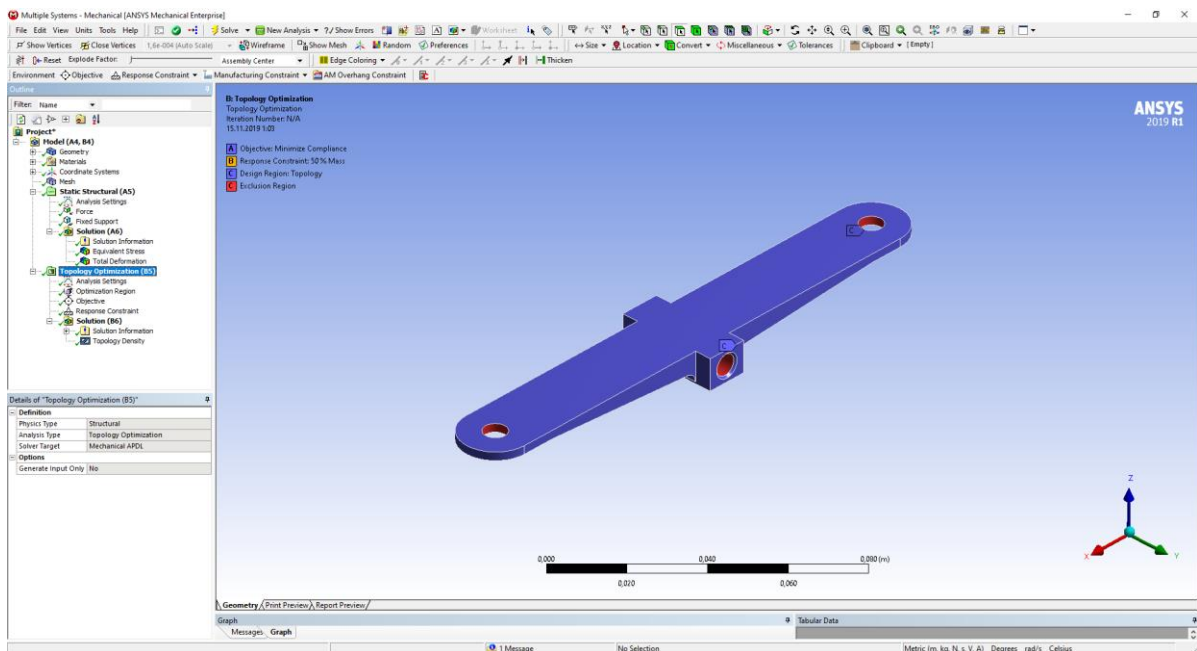


Рис. 2.12 – Вікно топологічної оптимізації

У «Analysis Settings» вказані налаштування критеріїв обрізки деталі, наближеність до геометрії вихідної деталі. У «Optimization Region» вказується місце або деталь в збірці, до якої необхідно застосувати оптимізацію. У гілці «Objective» – деталі, до яких застосовується оптимізація і методи.

У «Response Constraint» вказується скільки потрібно залишити при обрізанні деталі. Критерії є різні – маса, обсяг, напруження і т.д. У нашому випадку виконували зменшення ваги деталі на 50 %. Тепер виконуємо команду «Solve» і оцінюємо результат, який представлений на рис. 2.13.

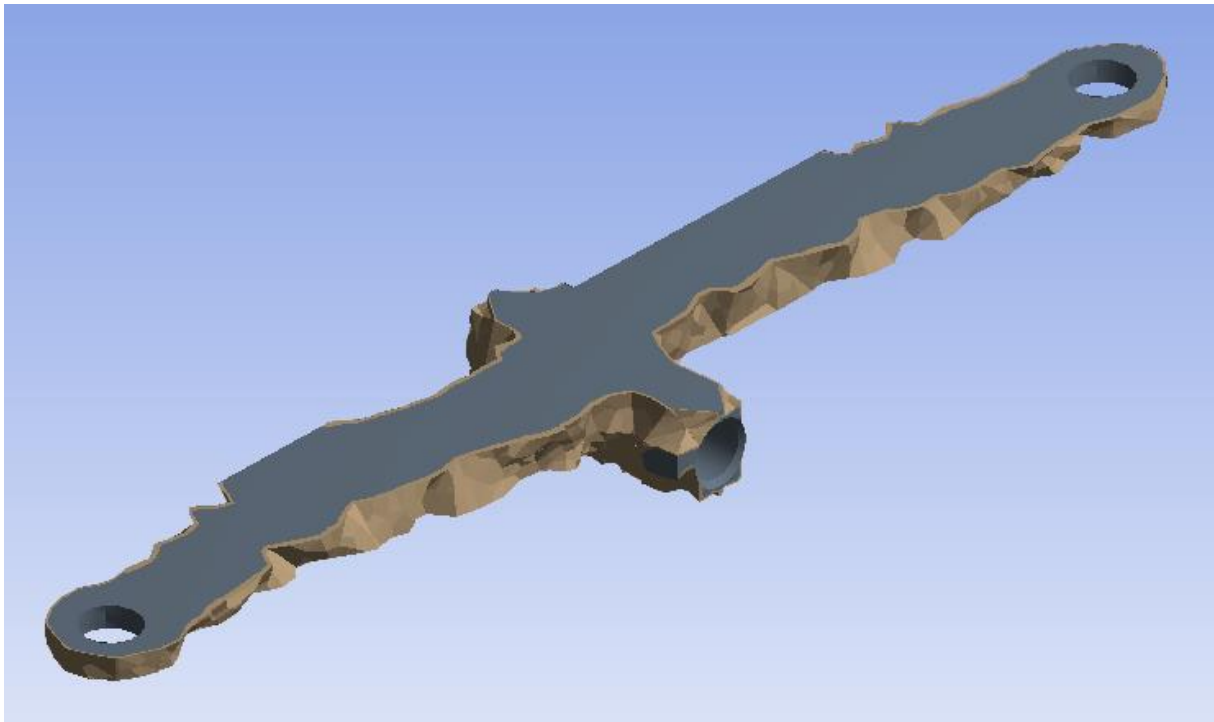


Рис. 2.13 – Результат топологічної оптимізації в ANSYS Workbench

Через негативний результат отриманої форми поверхні деталі переходимо до іншого програмного забезпечення.

Далі повторювали етап топологічної оптимізації, яка виконувалася в середовищі Altair Inspire, де критерієм для оптимізації деталі була оптимізація ваги.

Початковим етапом буде створення нового проекту «File → New Project» та імпорт готової моделі деталі.

Переходимо на вкладку «Structure», завдяки команді «Fasteners» можливо додати на отвори кріплення. Команда «Loads» дозволяє закріпити отвір та додати силу, яка діє на деталь. Команда «Materials» дозволяє обрати потрібний матеріал, з якого виготовлено деталь. Команда «Shape Controls» дозволяє зберігати симетрію при генеруванні топологічної оптимізації (рис. 2.14).

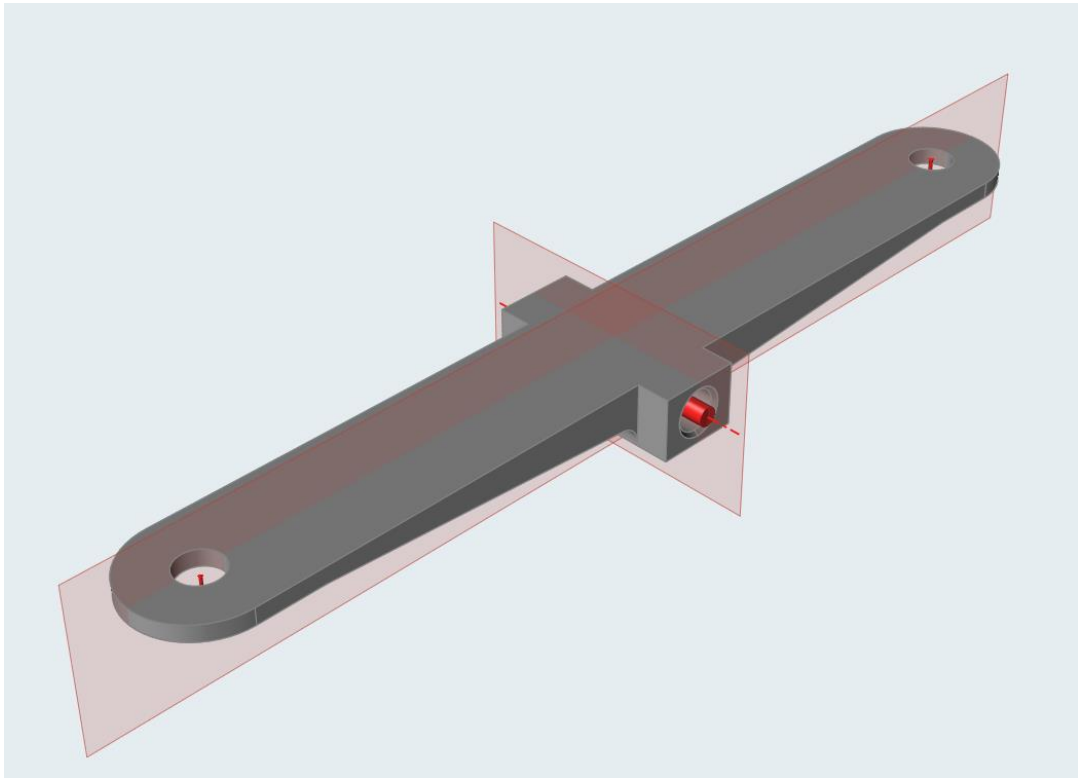


Рис. 2.14 – Налаштування симетрії

Після цього етапу модель готова до виконання оптимізації завдяки команді «Optimize» (рис. 2.15), в якій є можливість вказати відсоток зменшення маси деталі. У нашому випадку виконували зменшення ваги деталі на 50%, результати якого представлені на рис. 2.16.

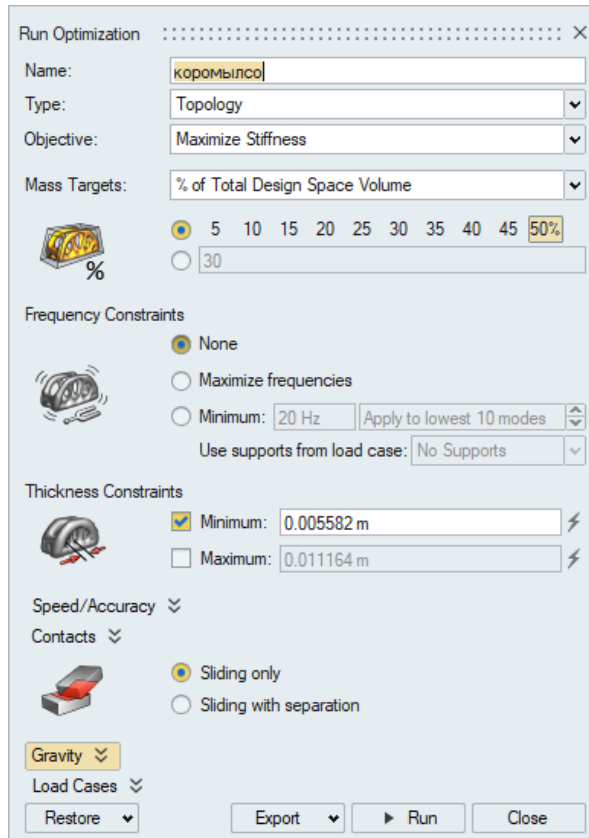


Рис. 2.15 – Панель параметрів

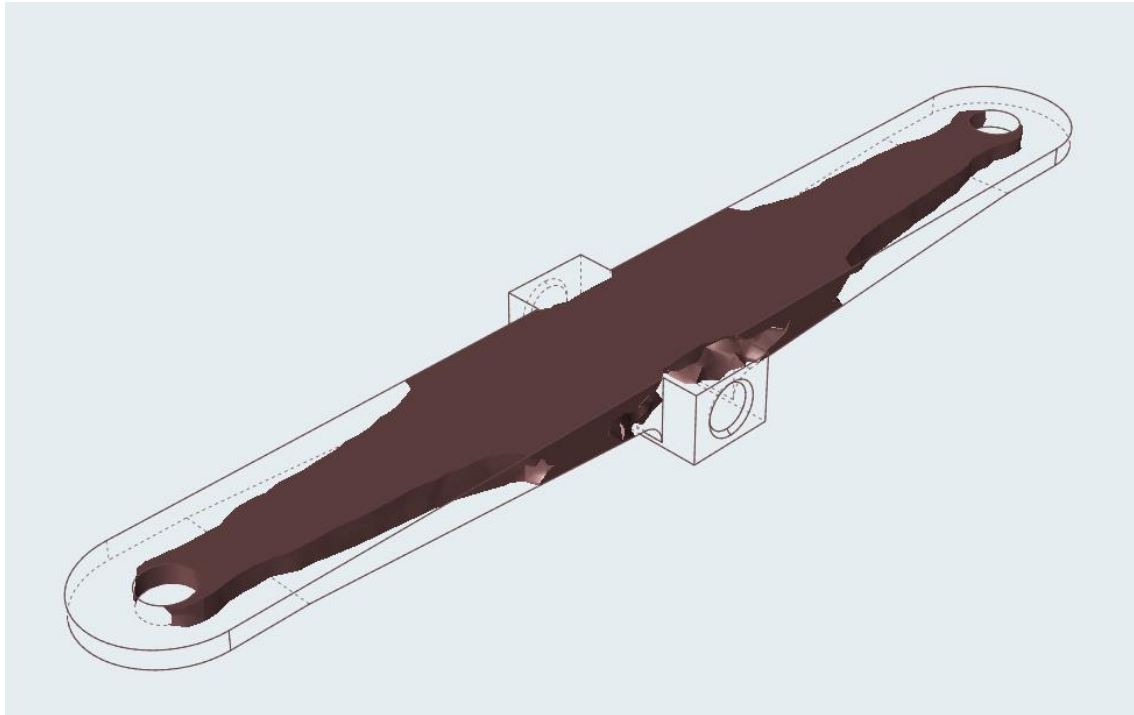


Рис. 2.16 – Результат топологічної оптимізації в Inspire

Через негативний результат отриманої форми деталі переходимо до іншого програмного забезпечення.

Знову повертаємося до етапу топологічної оптимізації, яку виконували також в середовищі Solid Edge ST10, де критерієм оптимізації деталі була її мінімальна вага та певна послідовність дій при генеративному моделюванні деталі «Коромисло».

Генеративне моделювання в середовищі Solid Edge ST10

Далі переходимо до моделювання в середовищі Solid Edge ST10. Як критерій оптимізації задаємо мінімальну масу деталі «Коромисло» на 50 % з урахуванням початкової геометрії (рис. 2.17), навантажень і обмежень, заданих для аналізу.

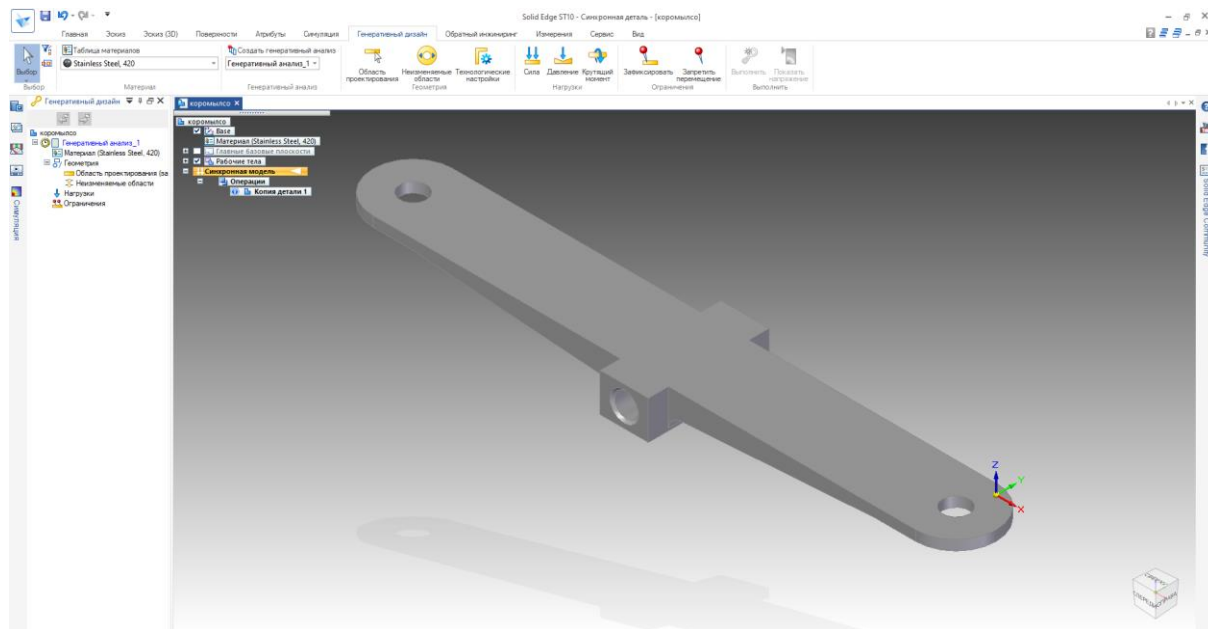



Рис. 2.17 – Інтерфейс Solid Edge ST10

Щоб задати матеріал деталі, вибирали вкладку **Генеративний дизайн** → група **Матеріал** → команда **Матеріал**. Як матеріал для деталі «Коромисло» згідно початкових даних використовували сталь 40Х ДСТУ 7806:2015.

Для початку генеративного дизайну для оптимізації маси моделі вибирали вкладку **Генеративний дизайн** → група **Генеративний аналіз** → команда **Створити генеративних аналіз** .

Ця команда дозволяє застосувати різні способи оптимізації для однієї і тієї ж моделі.

Якщо є кілька тіл, то доцільно використати команду **Область проектування**, щоб задати потрібне тіло для оптимізації. У нашому випадку є тільки одне тіло.

Далі використовували команду **Незмінні області** для завдання зон деталі, які не потрібно оптимізувати. На рис. 2.18 дані зони показані зеленим кольором. Вказуємо значення зміщення для грані або іншого конструктивного елемента, що задає глибину області, яка залишиться незмінною. У цьому прикладі зміщення дорівнює 1 мм.

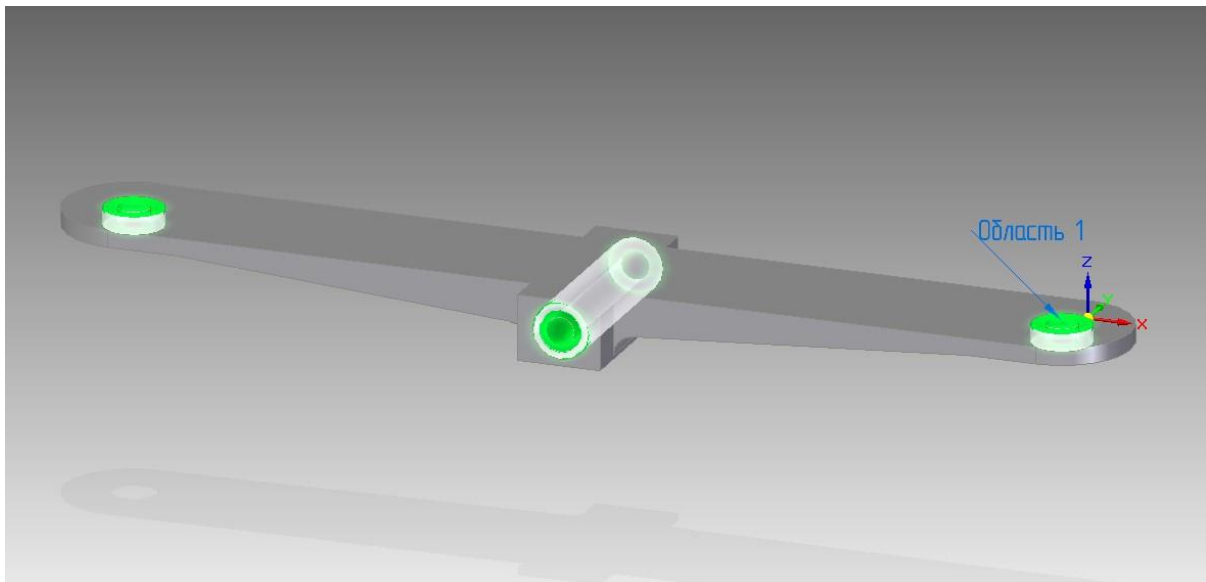


Рис. 2.18 – Зони деталі «Коромисло», які не підлягають оптимізації

Для видалення внутрішніх порожнин і виключення провисання можна використовувати команду **Технологічні параметри**. У нашому випадку задавати ці настройки не було необхідності, оскільки ми зменшуємо вагу і можемо не видаляти внутрішні порожнини.

Силкові навантаження можна застосувати у вигляді **Сили**, **Тиску** або **Крутного моменту**. Виходячи з умов експлуатації деталі силу в 500 Н прикладали на поверхню деталі кріплення, як це показано на рис. 2.19.

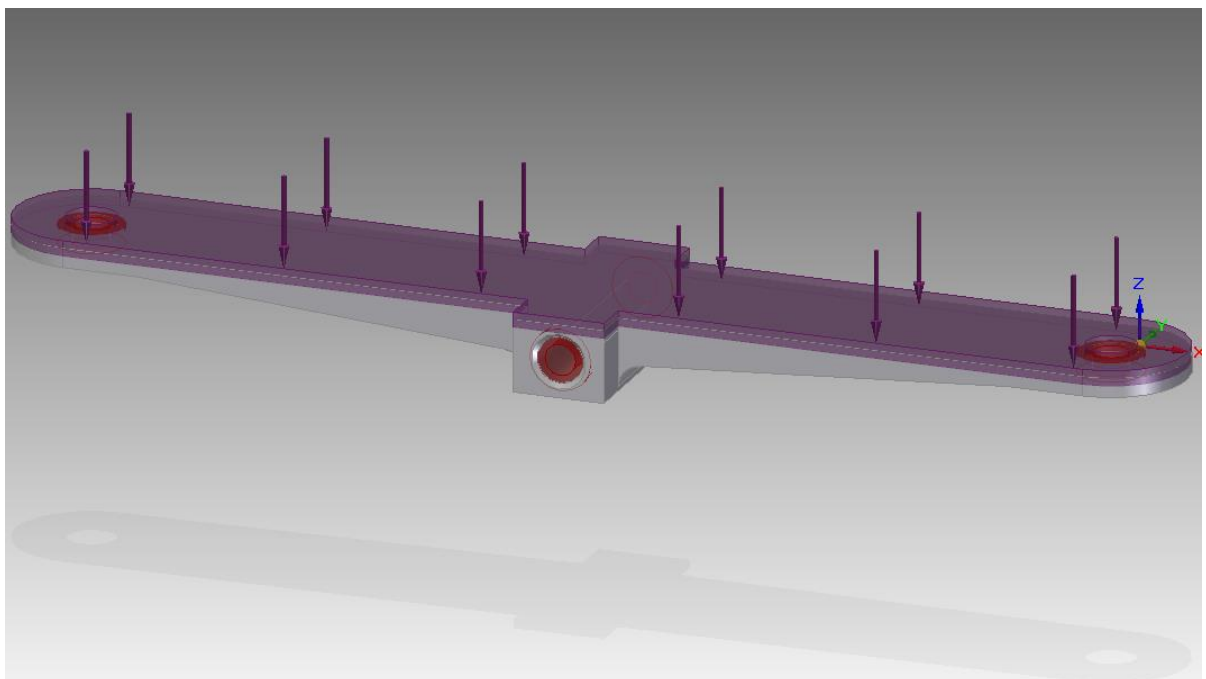


Рис. 2.19 – Схема силового навантаження

Грані або інші конструктивні елементи, які не повинні переміщатися, фіксували за допомогою команд **Зафіксувати** або **Заборонити переміщення**, вони виділені зеленим кольором на рис. 2.20.

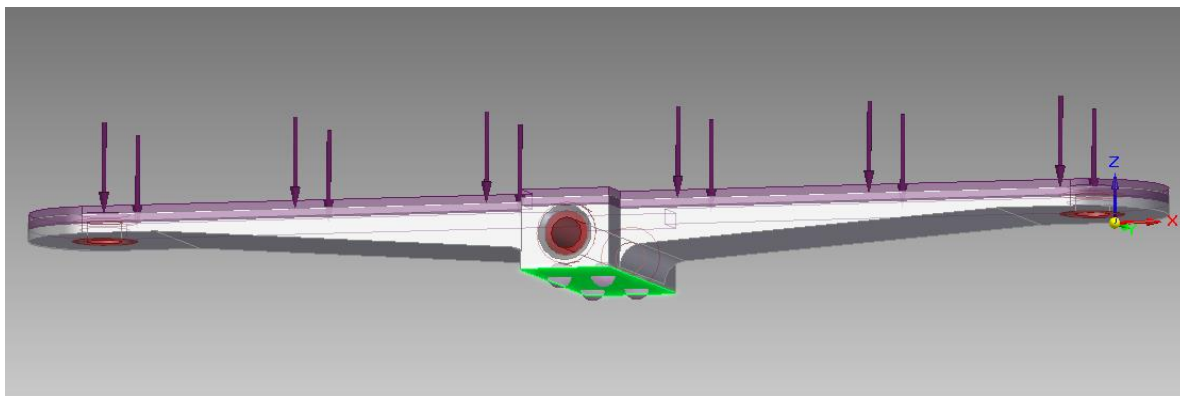
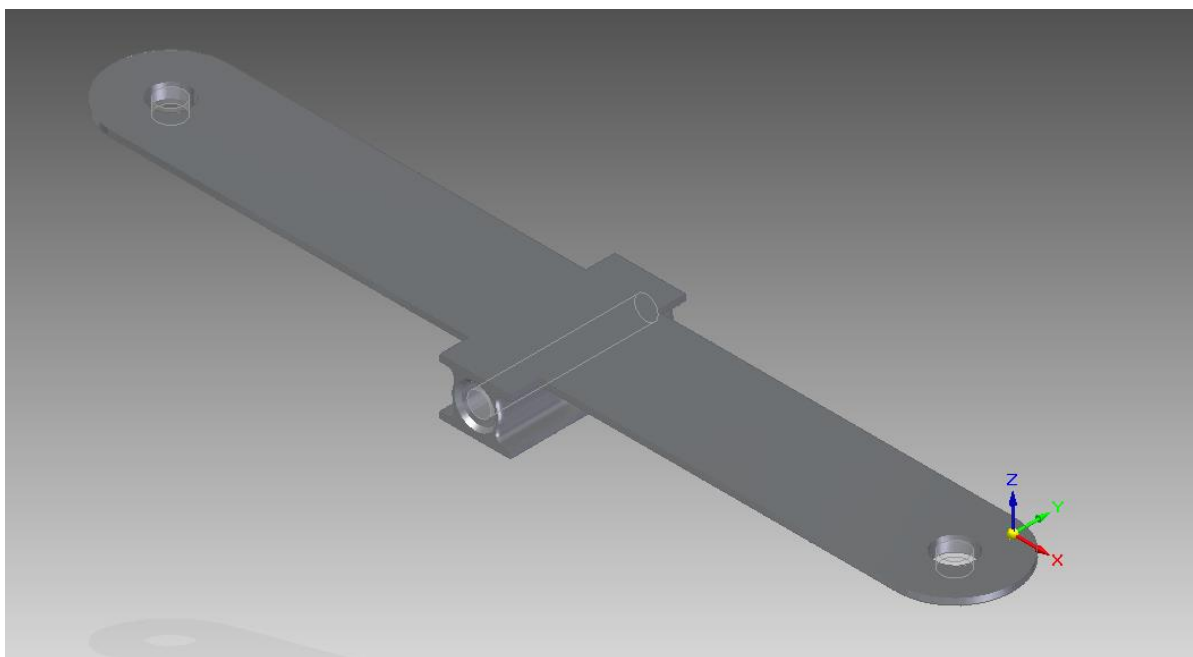


Рис. 2.20 – Фіксовані в просторі зони деталі «Коромисло»

Наступним було створення нової геометрії деталі відповідно до заданих умов за допомогою команди **Виконати**. Для параметра «Якість аналізу» задавали значення 5 в діапазоні 1-300, де 300 – найвища якість. Для параметра "Зменшення маси" задано значення 50 %. Для параметра "Запас міцності" задано значення 1.000. Значення допустимого напруження не має перевищувати границі текучості матеріалу Сталь 40Х ДСТУ 7806:2015.

Отримано результат, що представлено на рис. 2.21, а та рис. 2.21, б і значення, які використовуються для аналізу. За допомогою команди **Показати напруження** отримали зображення розподілу напружень в матеріалі досліджуваної деталі.



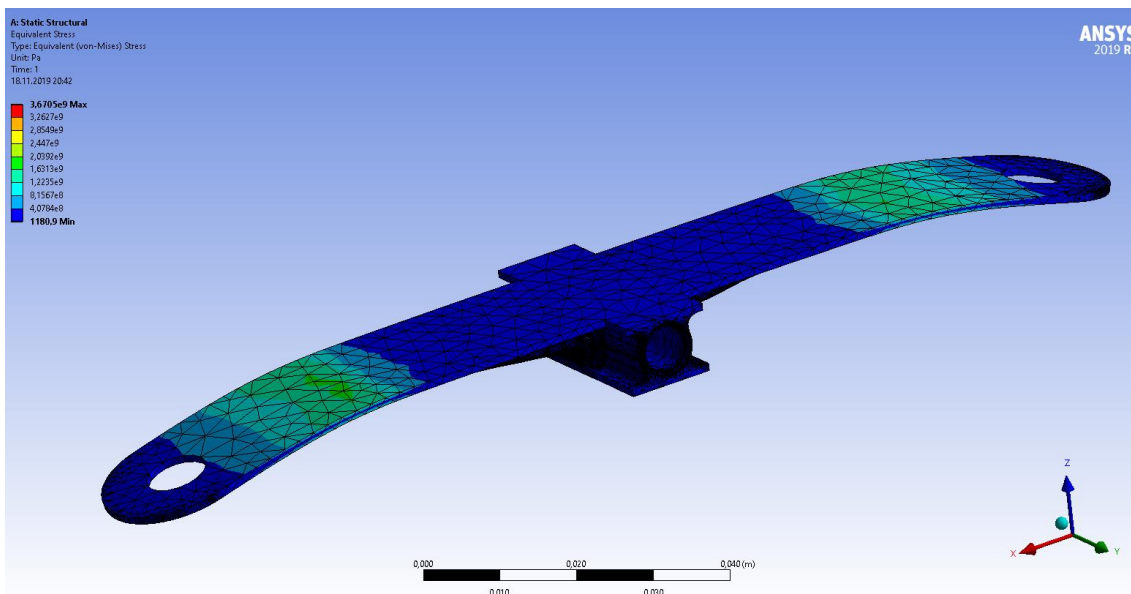
а)



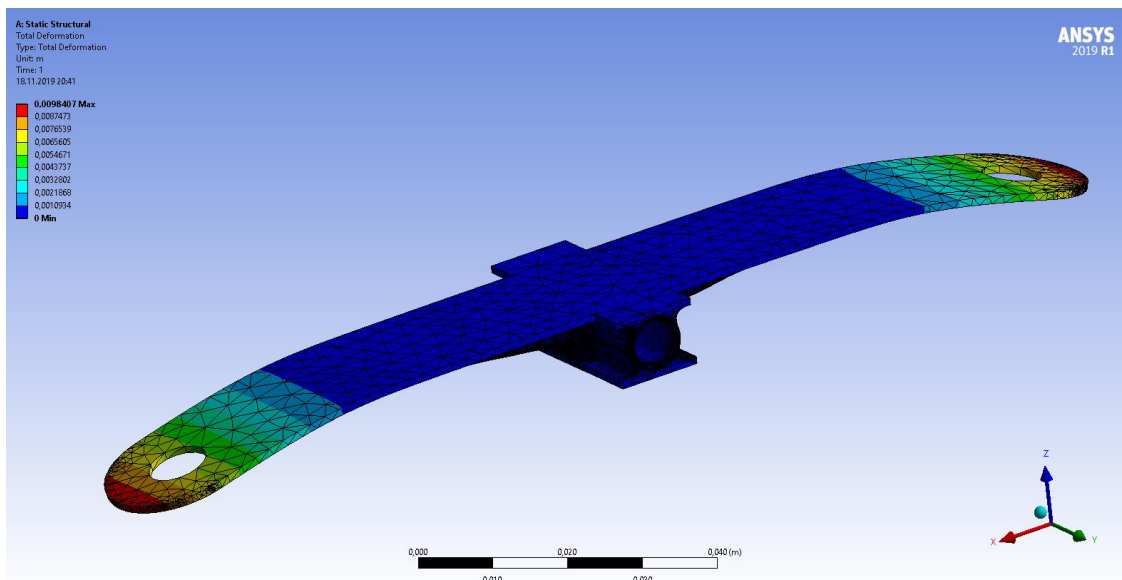
б)

Рис. 2.21 – Результат генеративного дизайну:
 а – ізометричний вид,
 б – вид зліва

Результат аналізу моделювання напружень та деформації відповідно представлено на рис. 2.22, а та рис. 2.22, б, з яких видно, що напруження знаходяться в діапазоні від 1.1809 кПа до 3.6705 ГПа, а деформація – від 0 мм до 9.8407 мм.



а)



б)

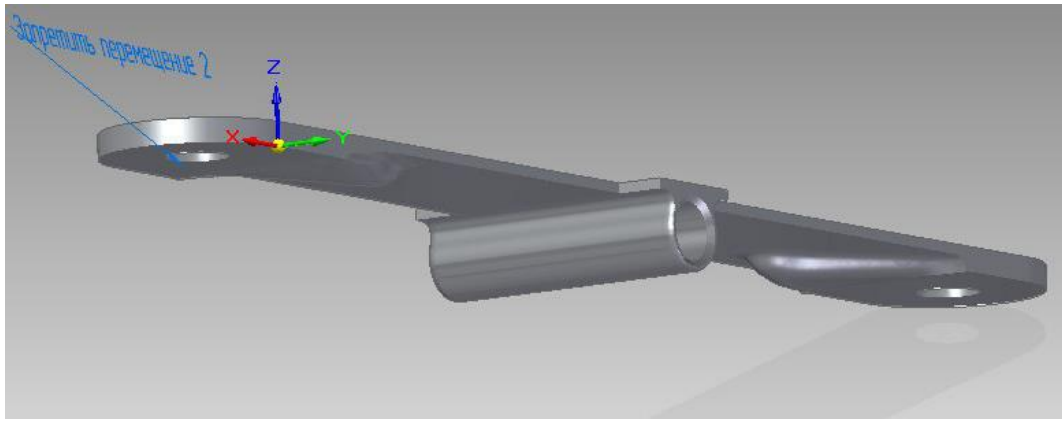
Рис. 2.22 – Результат комп’ютерного моделювання напружено-деформованого стану деталі:

- а) результат визначення напружень;
- б) результат визначення деформацій

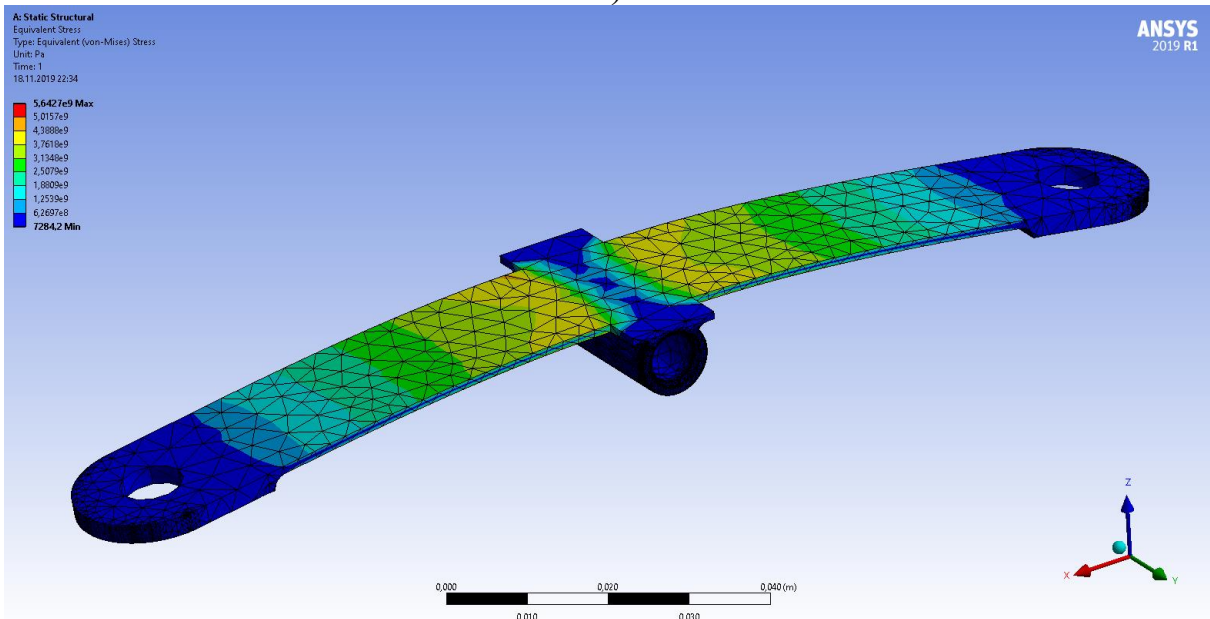
Такі результати моделювання є неприйнятними, оскільки в матеріалі деталі утворюються напруження в 3.6705 ГПа, що значно перевищує значення границі пропорційності (414 МПа) та границю міцності (780,33 МПа) для даного матеріалу. Таким чином, змодельована деталь (рис. 2.21) зруйнується під дією експлуатаційних навантажень. Отже можливості використання даного конструктивного рішення в реальному механізмі при реальних режимах експлуатації не існує.

При зміні параметрів команд **Незмінні області**, **Силове навантаження**, **Зафіксувати або Заборонити переміщення** можливо отримати інші варіації результату генеративного дизайну (рис. 2.23, а).

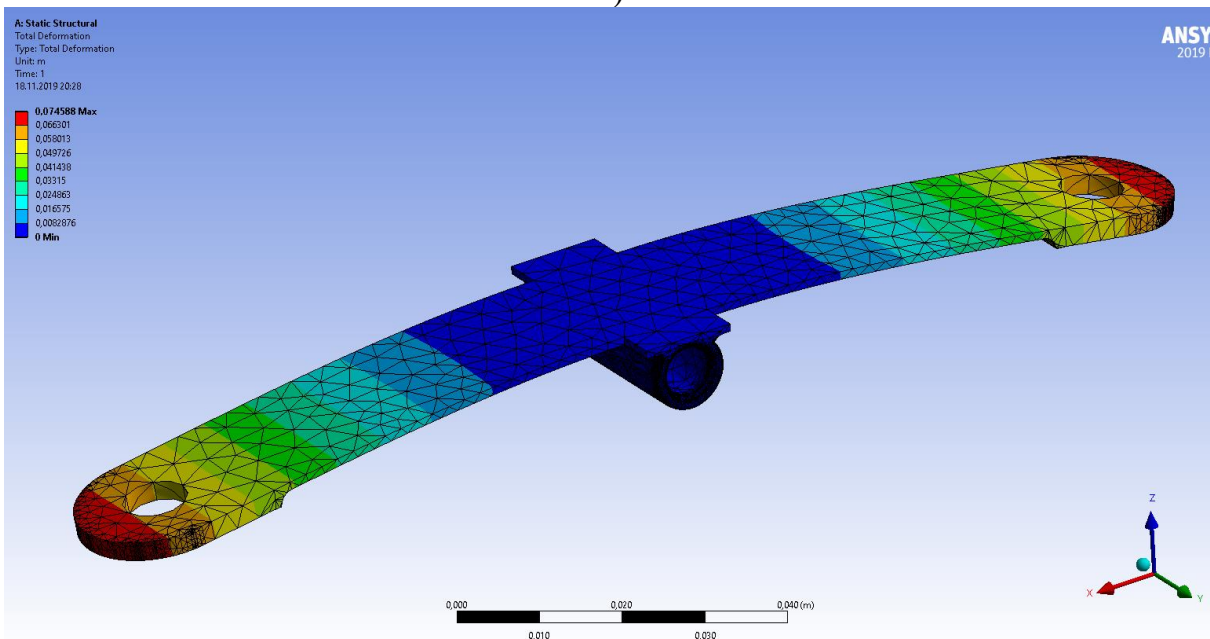
Результат аналізу моделювання напружень та деформації відповідно представлено на рис. 2.23, б та рис. 2.23, в, з яких видно, що напруження знаходяться в діапазоні від 7.2842 кПа до 5.6427 ГПа, а деформація – від 0 мм до 74.588 мм.



a)



б)



в)

Рис. 2.23 – Результат генеративного дизайну (а), результат аналізу напружень (б) та деформацій (в)

Враховуючи аналіз геометрії попередніх результатів генеративного дизайну, які отримані за допомогою ANSYS Workbench (рис. 2.8, б та рис. 2.8, в), робимо висновок, що результати моделювання є неприйнятними, оскільки в матеріалі деталі утворюються напруження в 5,6427 ГПа, що значно перевищує значення границі пропорційності (414 МПа) для даного матеріалу та границю міцності (780,33 МПа). Таким чином, змодельована деталь (рис. 2.23, а) зруйнується під дією експлуатаційних навантажень. Отже можливості використання даного конструктивного рішення в реальному механізмі при реальних режимах експлуатації не існує

З метою покращення результатів використали нові параметри аналізу навантажень і обмежень для розрахунку оптимальної маси обраної моделі.

Змінено параметри **Силове навантаження** (рис. 2.24), **Зафіксувати або Заборонити переміщення** (рис. 2.25) та задано нові параметри для команди **Виконати**. Для параметра "Якість аналізу" задано значення 25 в діапазоні 1-300, де 300 – найвища якість. Для параметра "Зменшення маси" задано значення 50 %. Для параметра "Запас міцності" задано значення 1.200.

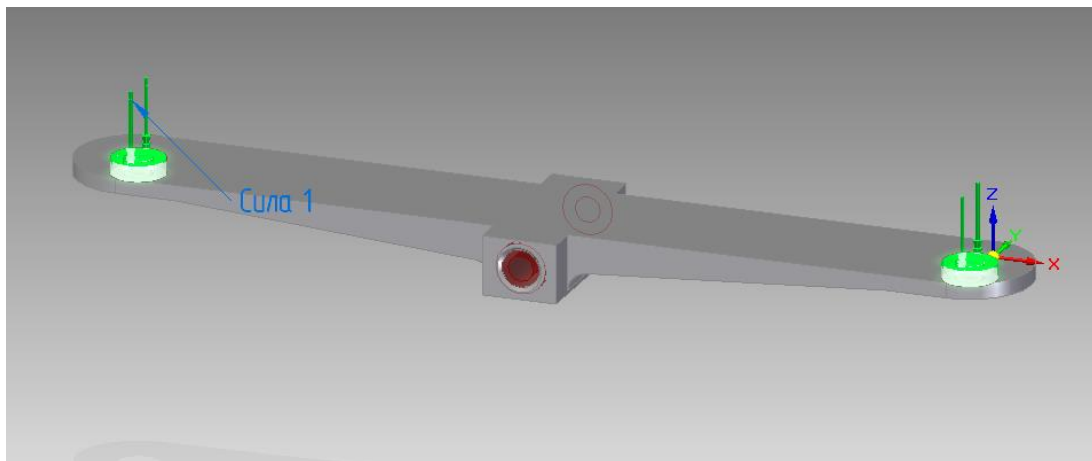


Рис. 2.24 – Схема силового навантаження

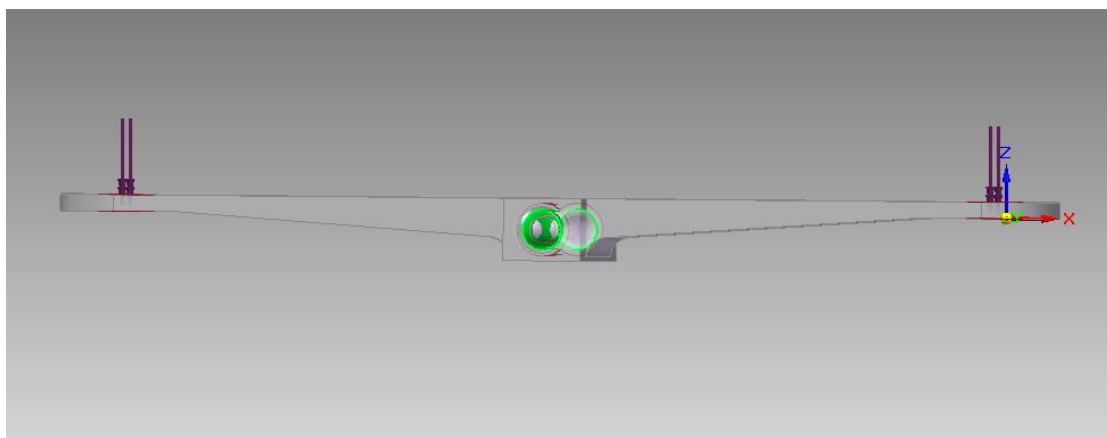
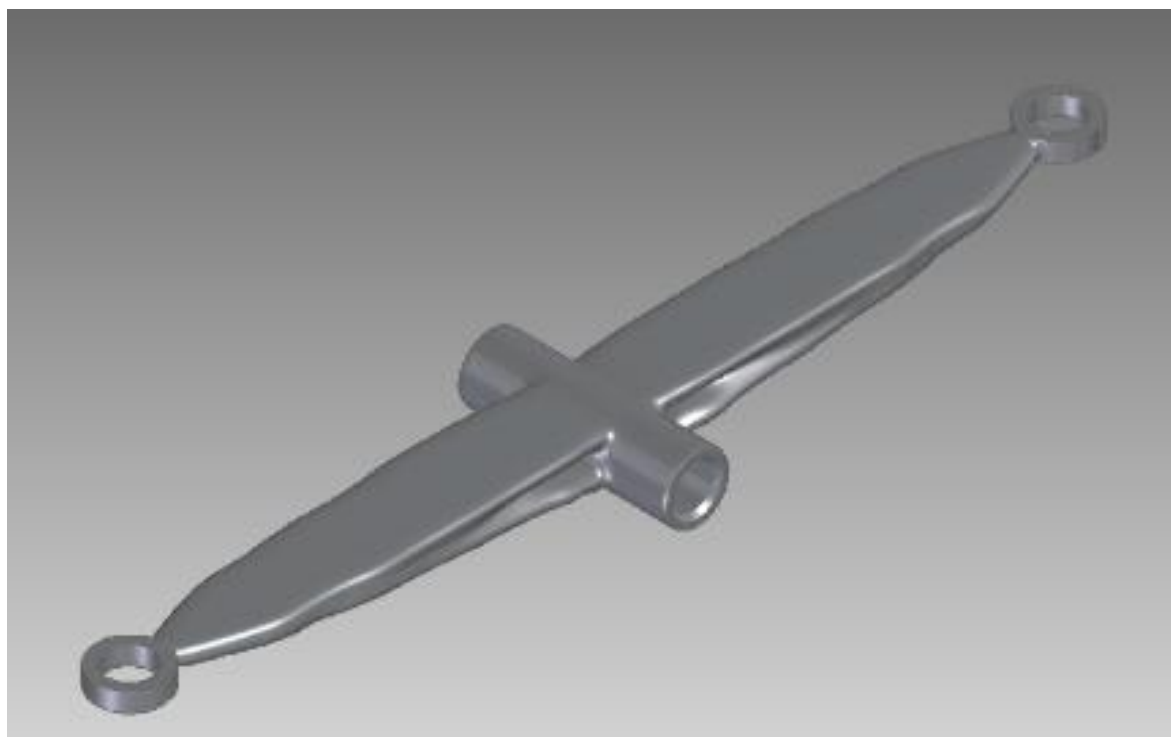


Рис. 2.25 – Фіксовані в просторі зони деталі «Коромисло»

Отримані результати і значення, які використовуються для аналізу геометрії, представлено на рис.2.26, *а* та рис. 2.26, *б*.



а)



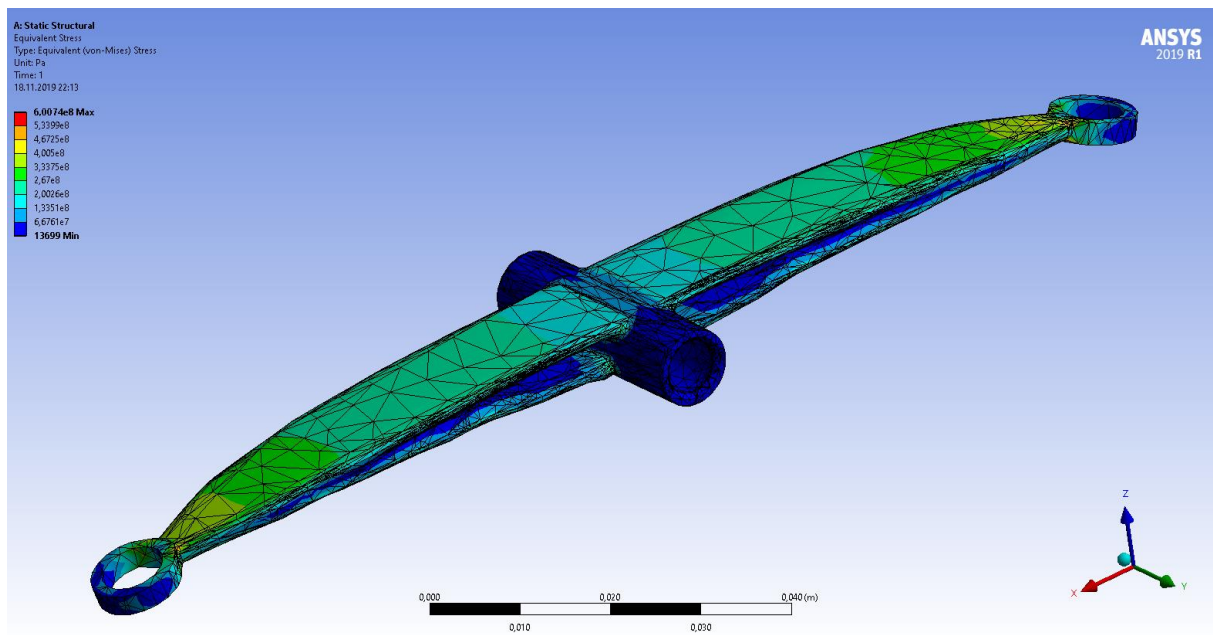
б)

Рис. 2.26 – Результат генеративного дизайну:

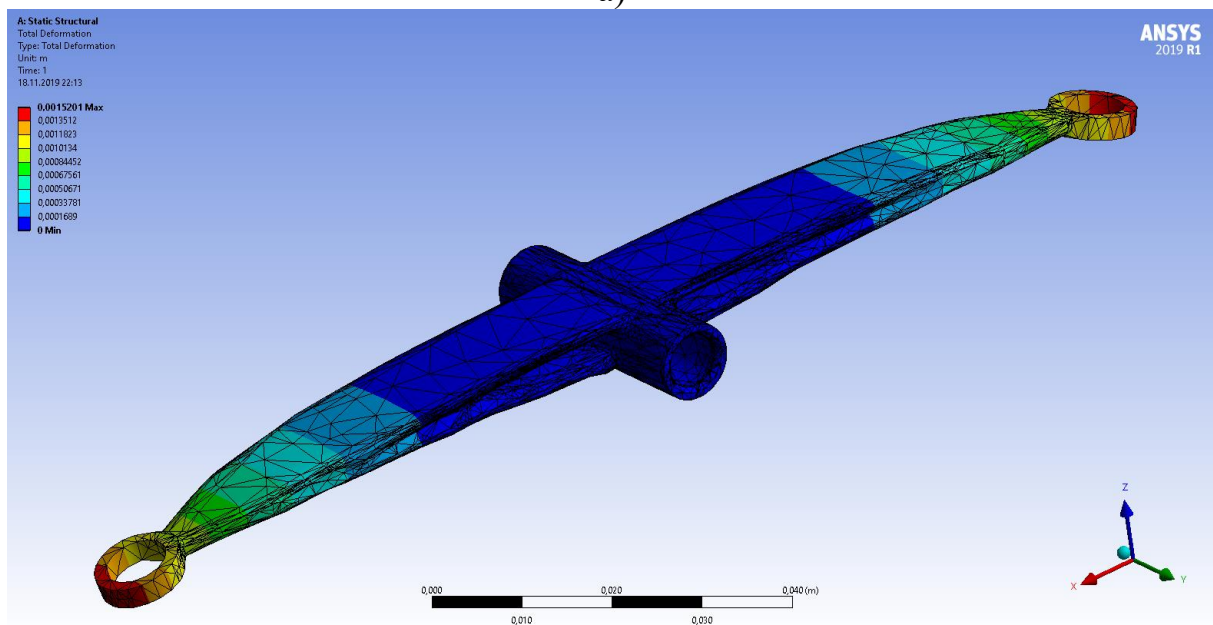
а – ізометричний вид,

б – вид зліва

Результат аналізу моделювання напружень та деформації відповідно представлено на рис. 2.27, *а* та рис. 2.27, *б*, з яких видно, що напруження знаходяться в діапазоні від 13.699 кПа до 600.7 МПа, а деформація – від 0 мм до 1.5201 мм.



a)



б)

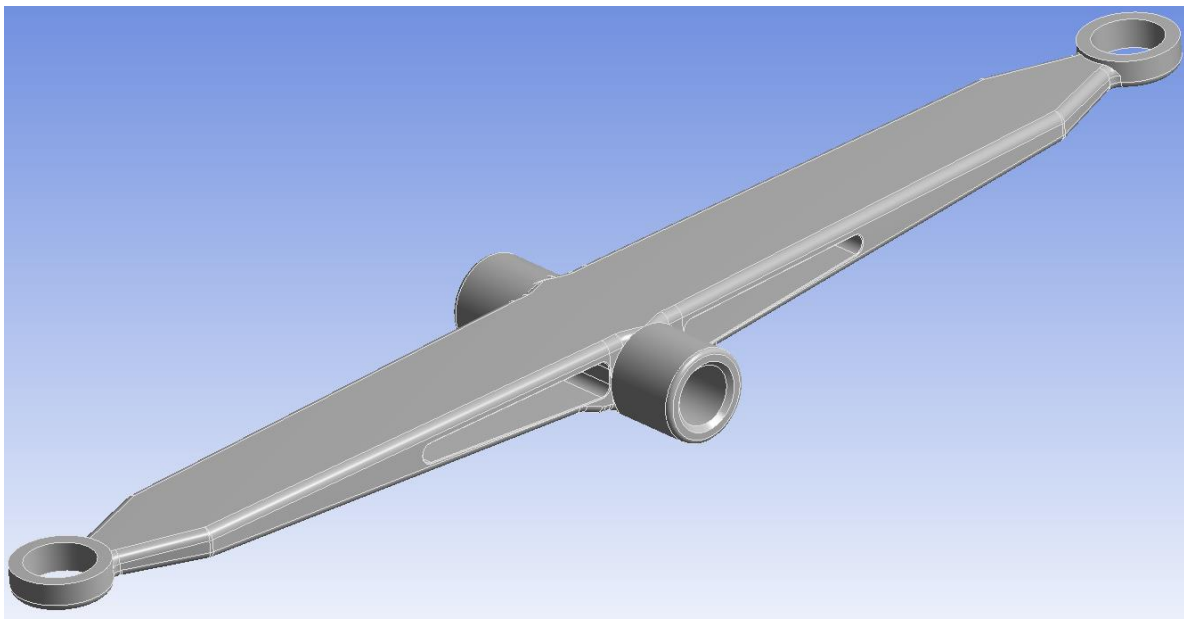
Рис. 2.27 – Результат комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану деталі:

- a) результат визначення напружень;
- б) результат визначення деформацій

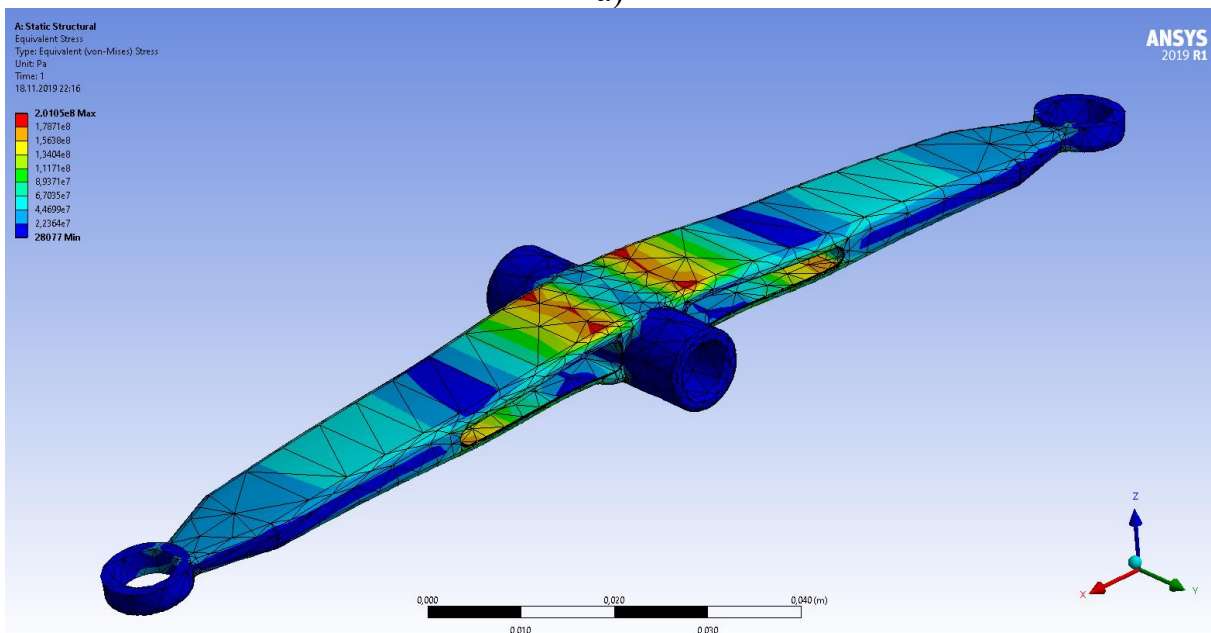
Такі результати моделювання є неприйнятними, оскільки в матеріалі деталі утворюються напруження в 600,7 МПа, що перевищує значення границі пропорційності (414 МПа) для даного матеріалу та не перевищує границю міцності (780,33 МПа). Це означає, що деталь буде деформуватися пластично, тобто після зняття прикладених сил, деталь не повернеться до початкового стану. Отже, можливості використання даного конструктивного рішення в реальному механізмі при реальних режимах експлуатації не існує. Також дана модель деталі «Коромисло» може бути

виготовлена лише за допомогою 3D друку. Використати універсальні верстати для виготовлення такої деталі є неможливим. Тобто для серійного промислового виробництва, дане рішення потребує подальшого доопрацювання спеціалістом. Середовище Solid Edge ST10 дає таку можливість.

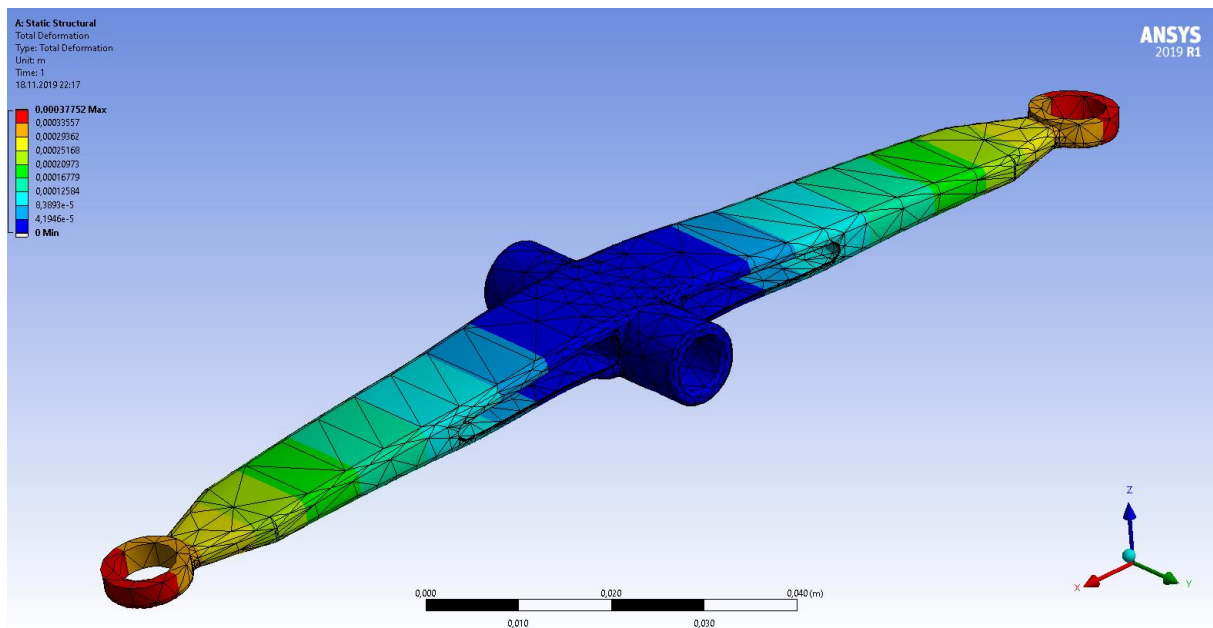
Таким чином, отримано модель деталі (рис. 2.28, а), яка має масу 50 г, що приблизно на 50 % менше від початкової маси деталі. Далі повторили етап аналізу напружень і деформації, як і для початкової деталі у програмному середовищі ANSYS, результати представлені на рис. 2.28, б та рис. 2.28, в.



а)



б)



в)

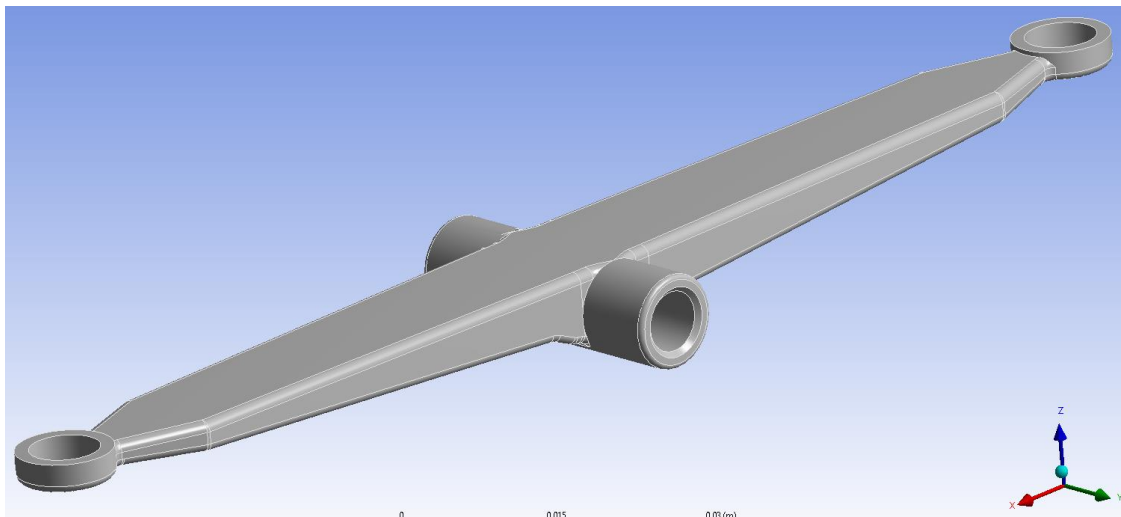
Рис. 2.28 – Тривимірний моделювання деталі «Коромисло» (а), результат аналізу напружень (б) та деформацій (в)

При цьому значення напруження знаходяться в діапазоні від 28,077 кПа до 201,5 МПа, а деформації – від 0 мм до 0,3775 мм.

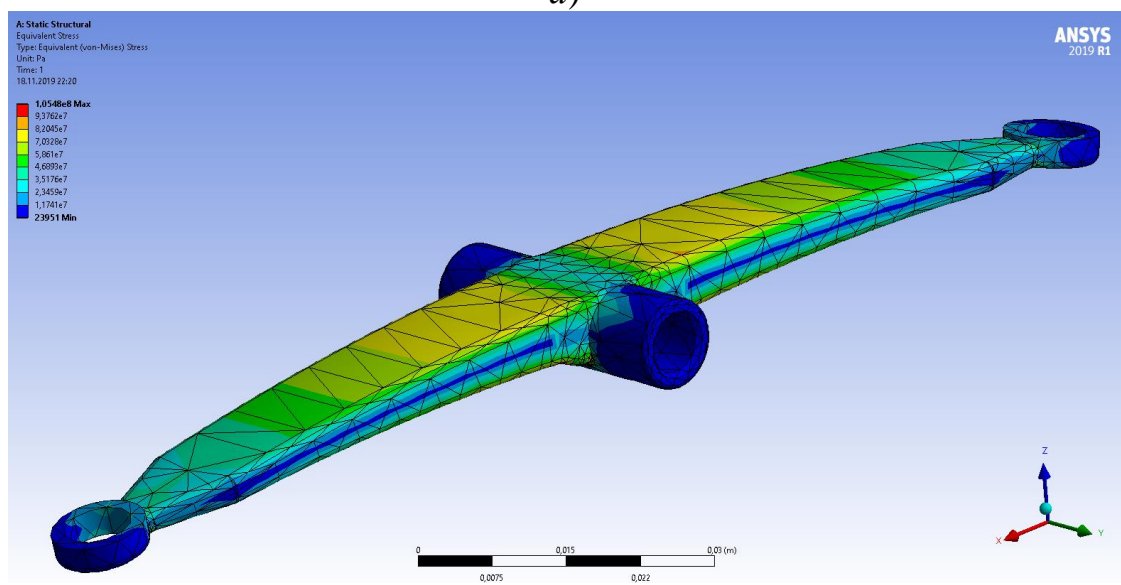
В даному випадку такі результати моделювання є прийнятними, оскільки в матеріалі деталі утворюються напруження в 201,5 МПа, що не перевищує значення границі пропорційності (414 МПа) для даного матеріалу та не перевищує границю міцності (780,33 МПа). Це означає, що деталь не буде деформуватися пластично, тобто деформування буде лише пружне і після зняття прикладених сил, деталь повернеться до початкового стану. Отже, використання даного конструктивного рішення в реальному механізмі при реальних режимах експлуатації є можливим. Але для покращення результатів потребується зміна конструкції деталі, тому дане рішення потребує доопрацювання спеціалістом.

Знову виконуємо генеративний дизайн деталі з метою зміни конструкції виробу для покращення результатів розподілу напружень та деформації в матеріалі заданої деталі.

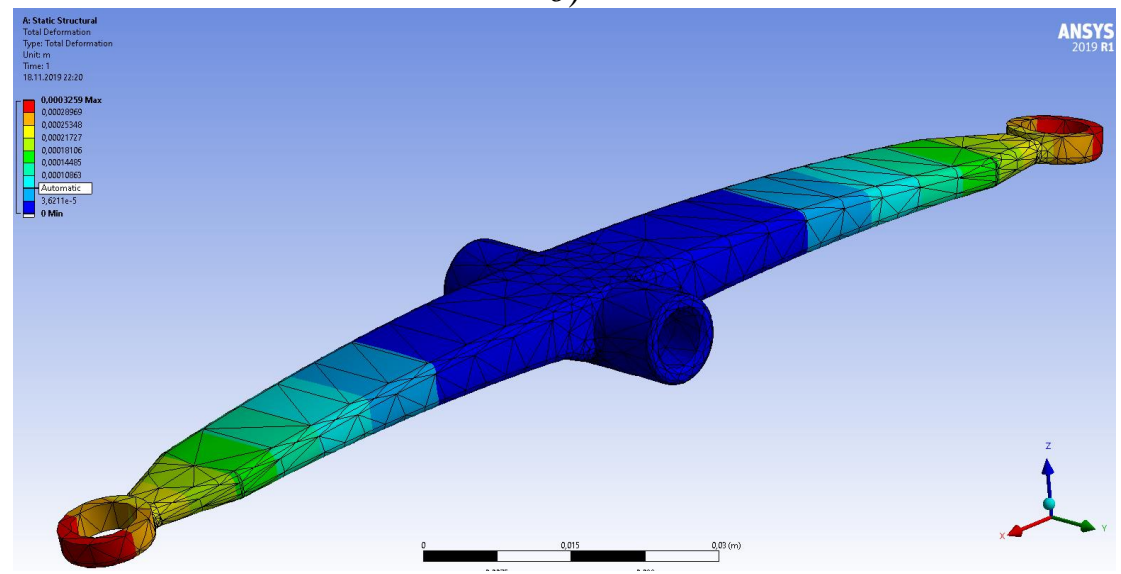
Таким чином, отримано модель деталі (рис. 2.29, а), яка має масу 61,5 г, що приблизно на 40 % менше від початкової маси деталі. Далі повторюємо етап аналізу напружень і деформації, як і для початкової деталі у програмному середовищі ANSYS, результати представлені на рис. 2.29, б та рис. 2.29, в.



a)



б)



в)

Рис. 2.29 – Тривимірний модель деталі «Коромисло» (а), результат аналізу напружень (б) та деформацій (в)

При цьому значення напруження знаходяться в діапазоні від 23,951 кПа до 105,48 МПа, а деформації – від 0 мм до 0,3258 мм. Дані результати є більш досконалі за значення аналізу напруження та деформації виробу в порівнянні з початковою деталлю, отже результат моделювання є позитивними, оскільки в матеріалі деталі максимально утворюються напруження в 105,48 МПа, що нижче значень границі пропорційності (414 МПа) для даного матеріалу та границі міцності (780,33 МПа). Це означає, що деталь не буде деформуватися пластично, тобто деформування буде лише пружне і після зняття прикладених сил, деталь повернеться до початкового стану. Отже, використання даного конструктивного рішення в реальному механізмі при реальних режимах експлуатації є можливим, тому повторна оптимізація деталі не потрібна.

Висновки до розділу 2

Виконано огляд етапів моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну, що дозволило створити початкову 3D модель за ескізом деталі «Коромисло». Проведено комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану деталі з початковою геометрією в системі ANSYS Workbench, що дозволило визначити значення напружень та деформацій, які утворюються під час експлуатації даної деталі в поворотному механізмі. Розроблено удосконалені конструкції виробу за допомогою генеративних технологій в програмних середовищах ANSYS Workbench, Altair Inspire та Solid Edge ST10. Детальний аналіз результатів проектування за значеннями напружень і деформацій, які утворюються під дією експлуатаційних навантажень, дозволив визначити найкращий результат моделювання, яке в подальшому було доопрацьовано для можливості використання в серійному промисловому виробництві.

Використання методів генеративного дизайну та програмного забезпечення Solid ST 10 при моделювання конструкції виробу дозволило зменшити масу удосконалених деталей при збереженні їх експлуатаційних властивостей на 40 %.

РОЗДІЛ 3 ВИГОТОВЛЕННЯ ЗМОДЕЛЬОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВИРОБУ ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

3.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Термін 3D-друк має кілька синонімів, один з яких досить коротко і точно характеризує сутність процесу – «адитивне виробництво», тобто виробництво за рахунок додавання матеріалу. Термін був придуманий не випадково, бо в цьому і полягає основна відмінність технологій 3D-друку від звичних методів промислового виробництва, які отримали в свою чергу назву «субтрактивні технології», тобто «віднімання». Якщо при фрезеруванні, шліфуванні, точінні та інших схожих процесах зайвий матеріал видаляється з заготовки, то у випадку з адитивним виробництвом матеріал поступово додається до отримання цілісної моделі [34].

Багато традиційних методів виготовлення деталей можна було б віднести до «адитивних» в широкому сенсі цього слова, наприклад, лиття або клепання. Однак варто мати на увазі, що в цих випадках або потрібна витрата матеріалів на виготовлення специфічних інструментів, зайнятих у виробництві конкретних деталей (як у випадку з литтям), або весь процес зводиться до з'єднання вже готових деталей (зварювання, клепання тощо). Для того щоб технологія класифікувалась як «3D-друк», необхідна побудова кінцевого продукту з сировини, а не заготовок, а формування об'єктів повинно бути довільним, тобто без використання форм. Останнє означає, що адитивне виробництво вимагає програмної складової. Грубо кажучи, адитивне виробництво вимагає управління за допомогою комп'ютерів, щоб форму кінцевих виробів можна було визначати за рахунок побудови цифрових моделей. Саме цей фактор і отримав широке поширення 3D-друку до того моменту, коли числове програмне управління і 3D-проекування стали загальнодоступними і високопродуктивними.

3D-друк – це процес, за допомогою якого об'єкти можуть бути створені з цифрових файлів. Це може бути досягнуто з використанням різних методів 3D-друку.

Для того, щоб розпочати друк потрібної 3D моделі в першу чергу слід переконатися в працездатності 3D принтера. Для цього потрібно перевірити:

1. Присутність підкладки для друку. Потрібно подбати про покриття столу матеріалом, який поліпшує прилипання виробів і полегшує їх видалення з платформи. Це може бути малярський скотч, каптон або спеціалізовані покриття типу BuildTak. Попередньо стіл потрібно якісно очистити.

2. Якість закріплення робочого столу. Іноді трапляється, що робоча платформа погано встановлена. В цьому випадку необхідно встановити стіл відповідно до інструкції користувача.

3. Прохідність екструдера. Залишки застиглого пластика в соплі принтера можуть створювати перешкоду для проходження нового полімеру. Тому перед початком друку краще переконатися в чистоті екструдера і прочистити його, в разі потреби.

4. Наявність філаменту. Переконайтеся, що потрібний 3D пластик заправлений в принтер за всіма правилами і ніщо не заважає його подачі в принтер.

5. Перевірте подачу електроживлення. При бажанні, на даному етапі можна поставити пристрій на прогрів. Це не обов'язково, але дозволить прискорити процес друку.

Після того як 3D принтер готовий до процесу друку, необхідно підготувати 3D модель. Моделі для 3D-друку, зазвичай, зберігають в файлах формату STL. Щоб перетворити STL-файл в G-код (мова, яку розуміє 3D-принтер), необхідна програма-слайсер. Слайсером вона називається, тому що «нарізає» (англ. «to slice» – різати) 3D-модель на безліч плоских двовимірних шарів, з яких 3D-принтер буде складати фізичний об'єкт [35]. Існують різні версії слайсерів (Cura, slic3r, KISSlicer), причому деякі принтери за замовчуванням підтримують роботу з певними конкретними програмами.

Після завантаження моделі перевіряється її готовність до 3D друку та виставляються настройки друку. На даному етапі правильно виставлені параметри позначаються на якості 3D-друкованого зразка. В залежності від обраної технології 3D-друку, використовуваних 3D-принтеру та матеріалів необхідно контролювати такі параметри:

- температура столу і (або) екструдера. Ці значення залежать від типу використовуваного пластику, різним видам полімерів відповідають різні температурні режими;
- швидкість друку. Регулювати її також слід в залежності від матеріалу, не забуваючи, що висока швидкість друку може йти на шкоду якості виробу;
- наявність підтримок. Складні структури, що нависають над елементами доцільно друкувати з підтримуючими конструкціями, це забезпечує точне відтворення моделі і попередить можливі деформації об'єкта під час охолодження;
- точність друку. Чим вище точність, тим краща деталізація готового зразка. Висоту шару варто вибирати в залежності від вимог до виробу.

Проробивши ці нескладні дії 3D модель можна розбити на слайси і, якщо потрібно, зберегти керуючий G-код та виконати друк моделі.

Важливо проконтролювати відтворення першого шару, адже від нього часто залежить весь подальший процес друку.

3.2 Опис лабораторного 3D принтеру, його можливості та використовувані матеріали

В дисертаційній роботі використовується споживчий струменевий 3D принтер, що має дельтавидну конфігурацію. Даний прилад є відносно недорогим настільним 3D-принтером для індивідуальних потреб. Такі принтери характеризуються достатньою якістю та стабільністю побудови. В його основі лежить пошарове плавлення та накладання пластика.

На рис. 3.1 та 3.2 зображено основні елементи 3D-принтера, такі як: направляюча ланка, стійки направляючих ланок, робоча поверхня, друкуюча головка з соплом та охолоджувальним елементом, роз'єм для карти пам'яті, драйвери для контролю двигунів, блок відмотування пластику, п'єзоелектричні датчики, друкована плата (arduino mega 2560).

Направляюча ланка виконує функцію направлення сопла за координатами відповідно до конфігурації друкованої моделі.

Стойки направляючих ланок виконують функцію каркасу та тримають на собі частину конструкції принтера.

Робоча поверхня – на ній здійснюється друкування 3D-деталей.

Головка з соплом та охолоджувальним елементом – призначена для плавлення та випускання пластику при друкуванні, а охолоджуючий елемент (в даному випадку, це кулер) охолоджує головку для того, щоб не перегрівалися електронні елементи на друкуючій головці (включається охолодження приблизно при +50°C).

Роз'єм для карти пам'яті – призначений для здійснення друку напряму з 3D-принтера. Такий спосіб ефективний тим, що менша ймовірність перебоїв при друку, ніж коли інформація про модель подається з ПК.

Драйвери для контролю двигунів – контролюють роботу двигунів, за допомогою яких здійснюється переміщення головки для друку.

Блок відмотування пластику – за допомогою нього подається пластик в сопло.

П'єзоелектричні датчики – за допомогою цих датчиків здійснюється контроль нульової точки (положення робочого столу), після чого принтер може починати роботу, таким чином усувається нерівність поверхні на якій здійснюється друк.

Друкована плата (arduino mega 2560) – на ній розташовані всі необхідні елементи, які потрібні для контролю та обробки інформації при друку та налаштуванні 3D-принтера.

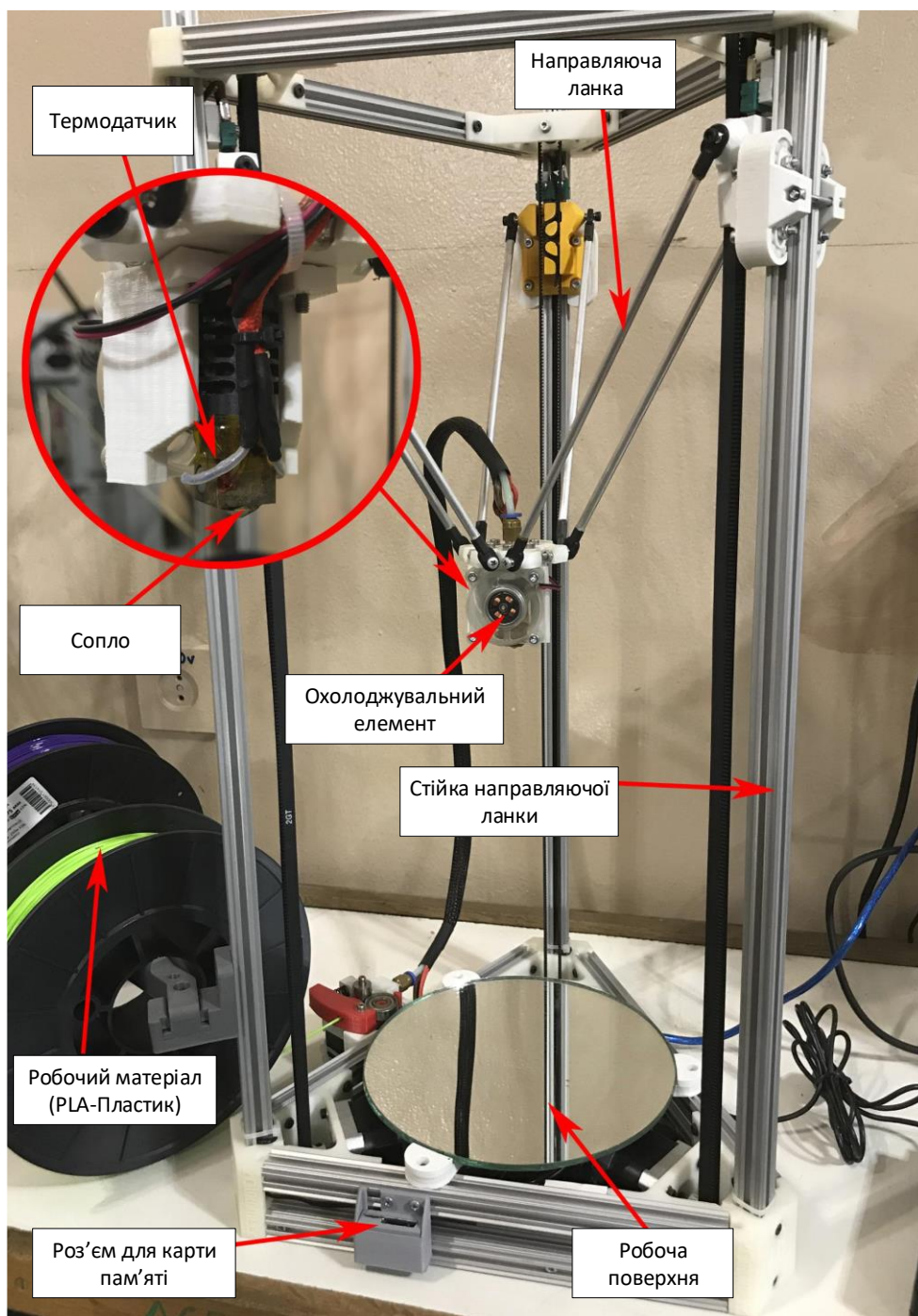


Рис. 3.1 – Загальний вигляд 3D принтера

Процес 3D-друку даним методом полягає у наступному: нитка (філамент) надходить у друкуючу головку (екструдер), після цього здійснюється розігрів нитки до її рідкого стану (при температурі сопла від $+190^{\circ}\text{C}$ до $+250^{\circ}\text{C}$). Далі отримана маса видавлюється через сопло екструдера. При цьому крокові двигуни за допомогою зубчастих пасів приводять у рух екструдер, що переміщається по направляючим у заданому напрямку і наносить пластик на платформу шар за шаром згідно заданої цифрової моделі друкованого виробу.

Правильну роботу та функціонування 3D-принтеру забезпечує певний набір основних електричних елементів для керування, координації дій, живлення, калібрування, подачі і охолодження матеріалу та інших, важливих для роботи, дій. Вигляд 3D-принтеру без робочого столу зображено на рис. 3.2.

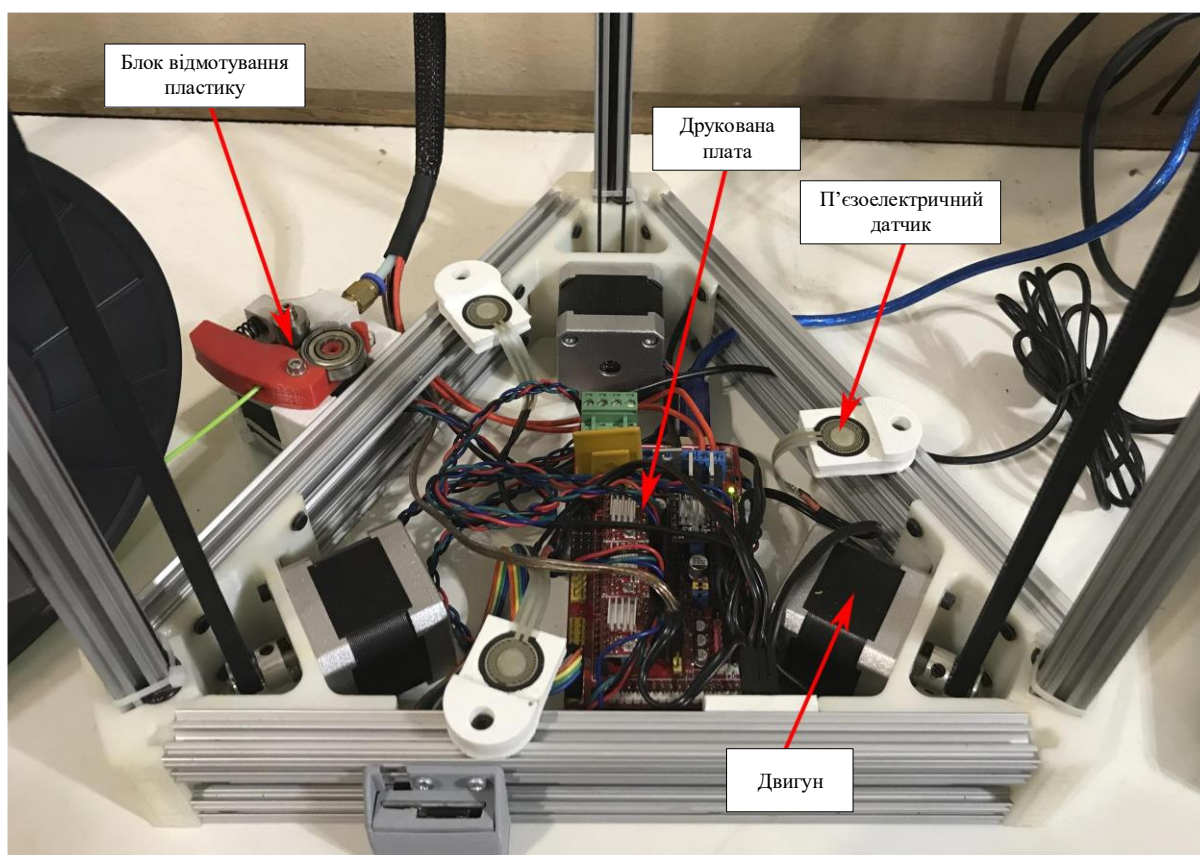


Рис. 3.2 – Вигляд 3D-принтеру без робочого столу

Для даного типу друку використовується PLA-пластик – так званий аліфатичний поліефір з мономером у вигляді молочної кислоти. Такий пластик називається біосумісним, оскільки основними матеріалами для його виробництва виступають швидко поновлювані ресурси, в основному це цукрова тростина і кукурудза. Досить низький ступінь деформації цього пластика сприяє правильному друку моделі, а також забезпечує високу роздільну здатність друку, що дозволяє створювати моделі з більшою геометричною складністю, ніж при використанні ABS. Під час друку PLA-пластиком рекомендується використовувати вентилятор для швидкого затвердіння виробів і досягнення більш високої якості друку. Основний недолік PLA-пластику – це відклеювання кутів (деламінація). Основні характеристики такого матеріалу наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики PLA-пластику

| | |
|--|-------------|
| Максимальна робоча температура | 250°C |
| Температура експлуатації готового виробу | 85°C |
| Рекомендовані температури друку | |
| Температура стола | 90 - 110°C |
| Температура сопла | 210 - 250°C |

PLA-пластик має більш низьку, ніж у ABS-пластик, температуру розм'якшення нитки (близько +190°C), і температуру друку – від +210°C до +250°C, а значить, робота з ним менш енергозатратна. До того ж, при 3D-друку таким пластиком не потрібно використовувати каптон (для змащування поверхні для нарощування прототипу) і не потрібно підігрівати стіл для зняття нарощеного на нього об'єкта.

3.3 Початкова інформація для виконання 3D друку

Для друку певного об'єкта, перш за все, необхідно зберегти 3D модель в необхідному форматі. В нашому випадку – це формат STL. Адже це формат файлу, який широко використовується для зберігання тривимірних моделей об'єктів для використання в адитивних технологіях. Інформація про об'єкт зберігається як список трикутних граней, які описують його поверхні. STL-файл може бути текстовим (ASCII) або двійковим. Свою назву отримав від скорочення терміну «Stereolithography», оскільки спочатку застосовувався саме в цій технології тривимірного друку.

Для даного дослідження використовується слайсер Repetier-Host V1.5.6, вікно якого представлено на рис. 3.3. Для друку деталі необхідно імпортувати її 3D модель в форматі STL в програмне забезпечення, налаштувати параметри друку: положення моделі на робочому столі, швидкість друку, температуру екструдера, товщину шару і тощо.

Основні налаштування друку деталі в Repetier-Host можна виконати на вкладці «**Налаштування CuraEngine**», яка активується натисканням кнопки «**Конфігурація**» вкладки «**Слайсер**».

«Скорость и качество» – перша вкладка «**Налаштування CuraEngine**», в якій можна виконати такі налаштування [36] (рис. 3.4).

1. Вкладка «**Скорость**» розділена на дві колонки: «**Медленно**» та «**Быстро**». Це зроблено для того, щоб задати верхню і нижню межу налаштувань для різних параметрів, використовуваних в процесі друку. Це потрібно для того, щоб була можливість швидкого регулювання швидкості друку моделі, що безпосередньо може позначитися на її якості.

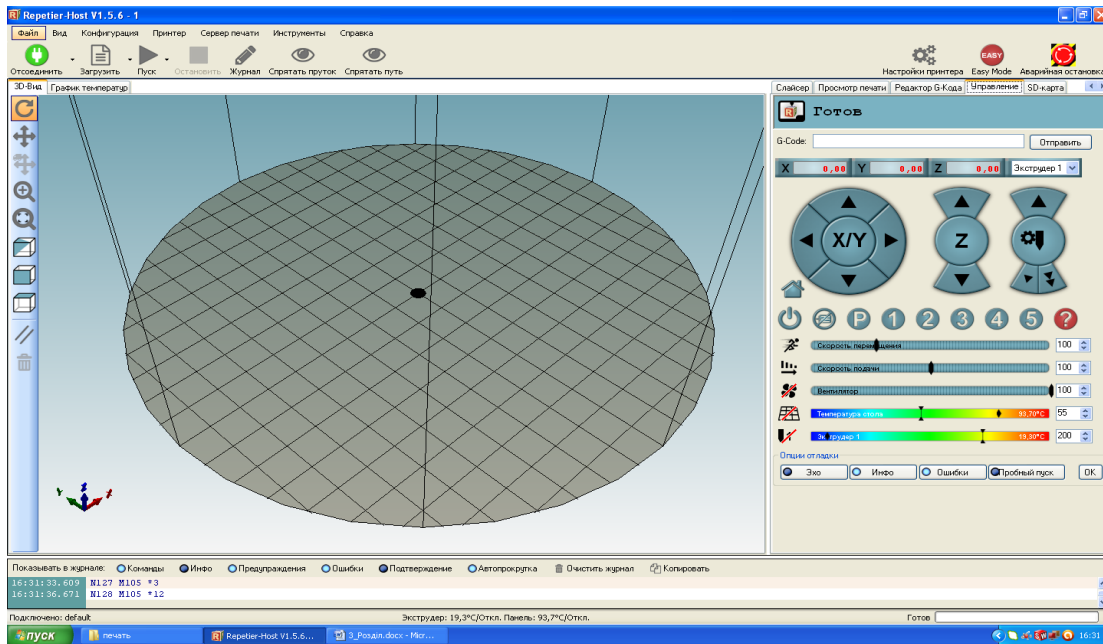


Рис. 3.3 – Вікно програми Repetier-Host V1.5.6

- **«Печать»** – параметр швидкості видавлювання пластика і переміщення екструдера безпосередньо при друку моделі. Наприклад, він не впливає на час переміщення між моделями або стінками однієї деталі. Тобто виявляється тільки коли йде екструзія.

- **«Перемещение»** – параметр швидкості будь-яких рухів, як при екструзії, так і без неї. Задавши їй дуже велике значення та без відповідного ретракта, швидше за все з'явиться "павутина" в порожнинах деталі або між нею.

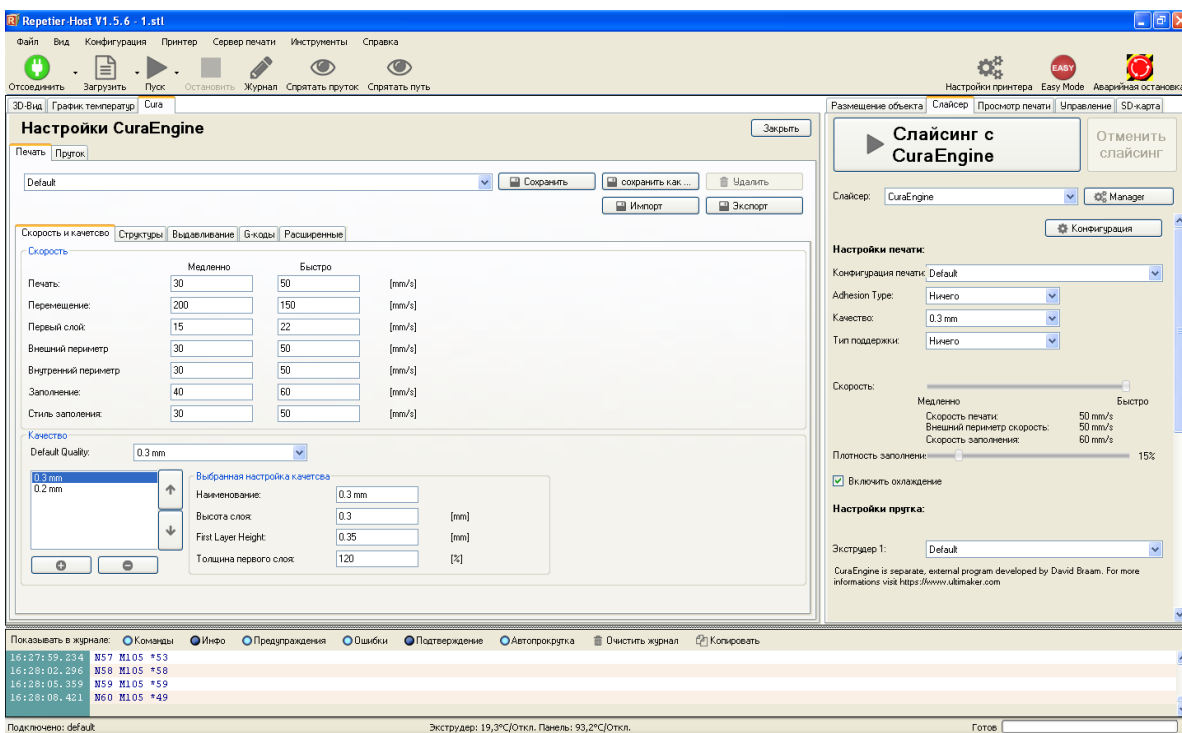


Рис. 3.4 – Конфігурації на вкладці «Скорость и качество»

Ретракт – це відкат прутка в екструдері (всмоктування нитки в сопло) при переході з одного острівця друку на інший. Ретракт потрібен для зниження кількості артефактів на зовнішній поверхні деталі».

- **«Первый слой»** – параметр швидкості друку 1-го шару. Краще поставити невелике значення, так як в цьому випадку прилипання до столу буде краще.

- **«Внешний периметр»** – параметр швидкості друку окантовки деталі. По суті кажучи, впливає на якість зовнішнього вигляду моделі.

- **«Внутренний периметр»** – параметр швидкості створення внутрішньої поверхні об'єкту.

- **«Заполнение»** – параметр швидкості заливки того, що між периметрами. Велика швидкість може помітно знизити якість деталі. Якщо заповнення не повне, то стінки візерунка можуть з'їхати відносно один одного.

- **«Стиль заповнення»** – параметр, швидкість якого не впливає на якість зовнішньої поверхні. Експериментувати не варто.

2. Наступне поле налаштування вкладки **«Скорость и качество»** – **«Качество»** друку. Тут є 4 параметра, які є основними характеристиками даного пункту.

«Default Quality» – дозволяє задати та зберегти налаштування для можливості їх використання в подальшому. Для цього необхідно заповнити наступну інформацію.

- **«Наименование»** – назва настройки.

- **«Высота слоя»** – важливий параметр, який відповідає за ребристість в надрукованій деталі. Шорсткість поверхні буде завжди, але чим тонше шар, тим менше це помітно. Проте використання маленької товщини шарів збільшить час друку, адже зросте їх кількість в деталі. Можливість зменшення пов'язана з характеристиками двигунів, особливо, які стоять по осі Z. Для повсякденних потреб досить товщину ставити 0.3 мм, це оптимальне значення.

- **«First Layer Height»** – параметр товщини першого шару. Теж важливий параметр, який відіграє ключову роль на старті друку. Відстань між столом і соплом фіксована і дорівнює товщині листа паперу. Це приблизно 0,3 мм. Тому, оптимальним параметром цього поля буде 0,3 мм. Якщо поставити 0,1 мм, то сопло буде лити занадто мало пластика і перший шар буде погано схоплюватися з місцем друку. Надалі погана адгезія першого шару призведе до того, що деталь відлипне в процесі прототипування. З іншого боку, якщо поставити 0,4 мм, то пластика буде занадто багато і екструдер почне його розмазувати і залишати надлишки, отже, якість моделі впаде. Перший шар ще важливий тим, що він вирівнює поверхню для подальших шарів при неточності калібрування столу. Тому не рекомендовано налаштовувати відстань між столом і соплом в 0,1 мм і ставити таку ж цифру в даному полі.

- **«Толщина первого слоя»** – додатковий параметр, що дозволяє змінювати величину, виставлену в попередньому пункті.

Переходимо до вкладки **«Структури»** (рис. 3.5). Тут присутні 5 полів з настройками.

1. **«Заполнение»** – місце, де зосереджені настройки характеру заповнення матеріалом моделі.

- **«Shell Thickness»** – параметр товщини периметрів, безпосередньо пов'язаний з діаметром використовуваного сопла. При невеликому значенні цього параметра отримуємо безліч вузьких доріжок, з яких складається шар деталі. Якщо деталь має дуже вузькі стінки, а наше сопло велике для їх створення, можна поставити даний параметр менше діаметра сопла. Але головне не вказати занадто мале значення, оскільки в такому випадку видавлювання філаменту буде настільки маленьким, що будуть утворюватися порожнини.

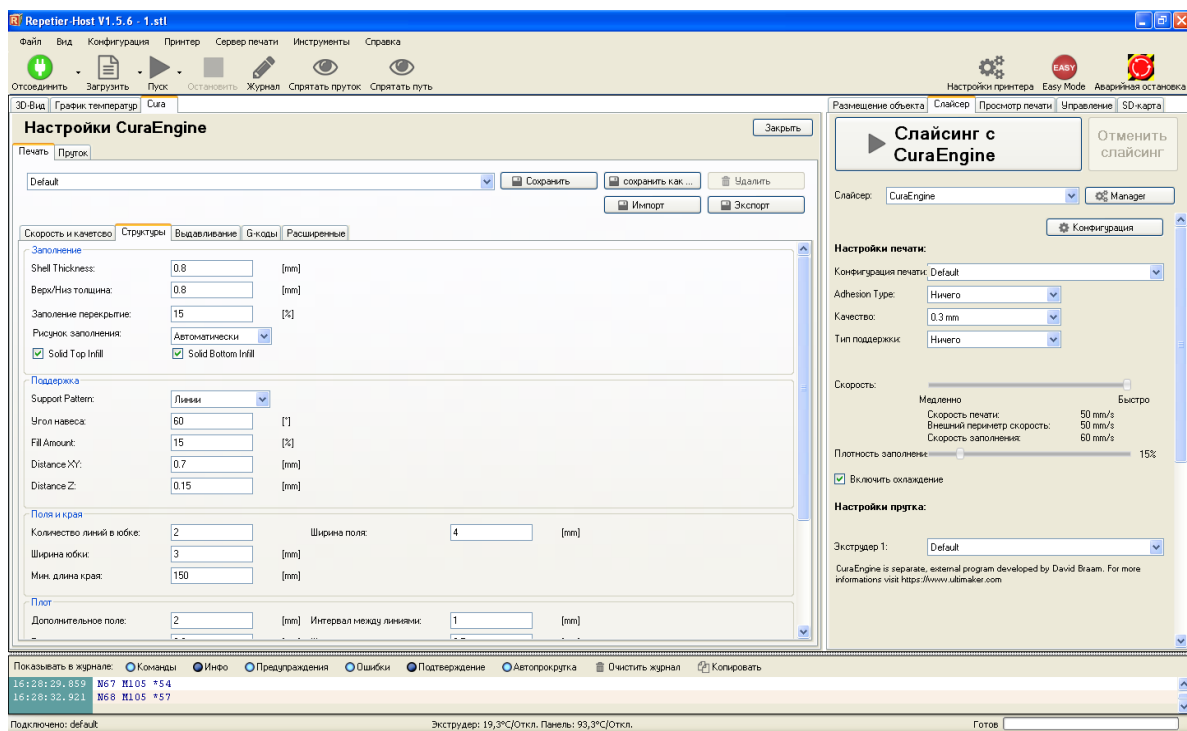


Рис. 3.5 – Конфігурації на вкладці **«Структури»**

- **«Верх/Низ толщина»** – параметр товщини заповнених на 100 % шарів дна і кришки (верхніх шарів) моделі.
- **«Заполнения перекрытия»** – щільність заповнення, показує на скільки порожниста буде деталь (100 % – максимальна щільність моделі).
- **«Рисунок заполнения»** – візерунок, яким буде друкуватися внутрішній об'єм моделі.

- **«Solid Top / Bottom infill»** – наявність галочок в цих полях обов'язкова для забезпечення однорідності поверхонь деталі на нижньому та верхньому шарах.

2. **«Поддержка»** – поле налаштувань, де можна задати необхідний режим формування допоміжних елементів, які є опорою при друку нависаючих частин моделі.

- **«Support Pattern»** – візерунок створення підтримуючих елементів.

- **«Угол навеса»** – мінімальний кут нахилу області моделі, з якого слайсер починає будувати підтримуючий каркас для неї.

- **«Fill Amount»** – щільність заповнення цього каркаса.

- **«Distance XY і Z»** – не заповнена матеріалом відстань між підтримкою і моделлю по горизонтальних осях і по висоті. Наявність прогалів необхідна для того, щоб було легко відірвати підтримку від деталі. Інакше шари занадто сильно склеюються. В основному це стосується орієнтації по Z.

3. **«Поля и края»** – параметри налаштувань, що дозволяють забезпечити кращу адгезію моделі і перевірити настройку столу.

- **«Количество линий в юбке»** – щільність створюваного контуру навколо моделі. Головна мета юбки – подивитись, наскільки добре відкалібрований стіл. Тому не треба ставити велике значення. Досить поставити від 1 мм до 3 мм.

- **«Ширина юбки»** – назва говорить сама за себе. Занадто тонка юбка погано виявить дефекти калібрування.

- **«Минимальная длина юбки»** – якщо довжина юбки менше зазначеної в цьому полі, то слайсер сам її збільшить.

4. **«Плот»** – область налаштувань, що дозволяють забезпечити прилипання до столу особливо тонких та складних структур моделей. Це ще називається Raft.

- **«Дополнительное поле»** – ширина рафтового поля навколо моделі.

- **«Толщина основной линии»** – товщина нитки в першому шарі, по суті, щільність рафта.

- **«Толщина интерфейса»** – товщина периметра рафта.

- **«Air Gap Layer 0»** – зазор між рафтом і моделлю. Чим більше зазор, тим простіше відірвати допоміжний пластик від деталі. Але занадто велике значення не дозволить міцно фіксувати область моделі.

- **«Воздушный зазор»** – такий же пункт, як і попередній, але починаючи з другого шару.

«Выдавливание» – поле з важливими налаштуваннями друку (рис. 3.6).

1. **«Основные настройки экструдера»** – поле параметрів, що характеризують основні процеси видавлювання.

- **«Spiralize Contour»** – друк по спіралі. Корисна функція, але використовується рідко, так як вимагає нульового заповнення і всього один периметр. Є можливість уникнути наявності шва при друку аксіально симетричних об'єктів.

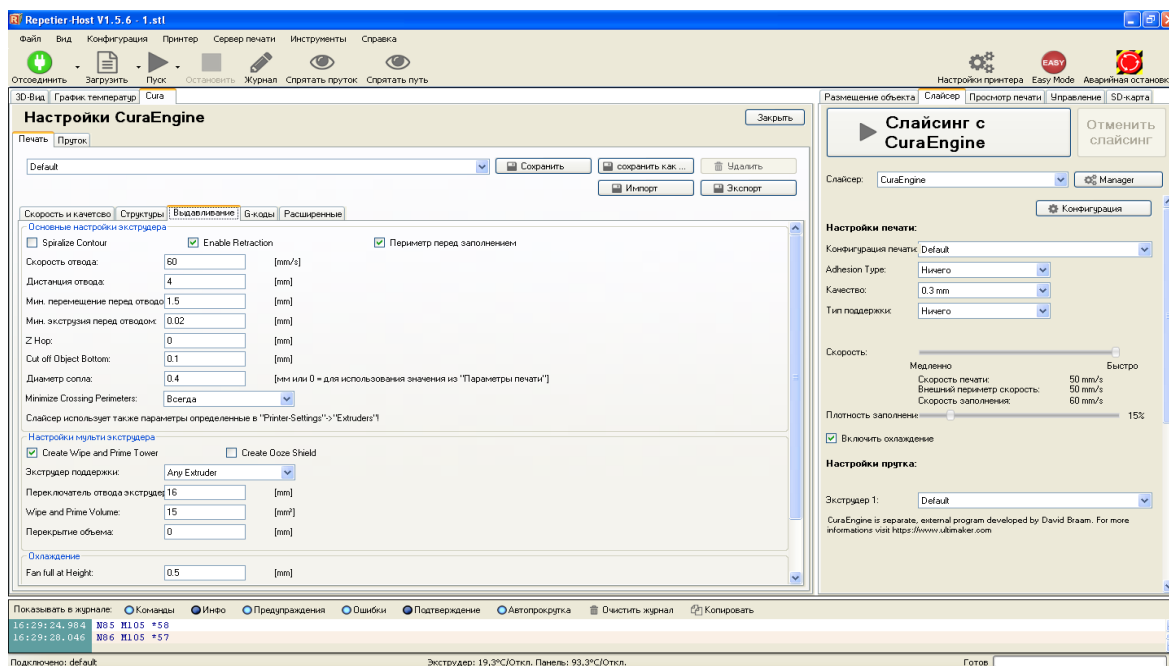


Рис. 3.6 – Конфігурації на вкладці **«Выдавливание»**

- **«Enable Retraction»** – важлива функція, навпроти якої обов'язково треба ставити галочку. Вона включає втягування прутка при переміщеннях у вільному просторі. Це потрібно для того, щоб не видаляти зайвий пластик там, де його не повинно бути.

- **«Периметр перед заполнением»** – тут все очевидно, якщо стоїть галочка, то спочатку буде друкуватися периметр, а потім заповнення.

- **«Скорость отвода»** – важливий параметр, визначає, наскільки швидко буде виконуватись втягування пластика.

- **«Дистанция отвода»** – відстань, на яку буде втягуватися пластик.

- **«Минимальное перемещение перед отводом»** – це налаштування відповідає за те, починаючи з якого переміщення треба починати втягування. Потрібно розуміти, що крім часу ретракту, треба ще й повертати пластик при поновленні друку. Це займає досить багато часу, якщо ретракт буде при малих переміщеннях.

- **«Минимальная экструзия перед отводом»** – мінімальне видавлювання пластика перед наступним ретрактом.

- **«Z HOP»** – підняття екструдера на початку ретракту. Це відбувається так: головка надрукувала певне місце і повинна переїхати в інше. Щоб гаряче сопло не стирало убік місце зупинки, відбувається рух вгору, зміна позиції та опускання на колишній рівень. Зазвичай відбувається так, що сопло при русі вгору тягне за собою нитку, а в процесі руху вниз можуть також виникнути артефакти. До того ж, в даному режимі час друку значно збільшиться.

- **«Cut off Object Bottom»** – параметр, необхідний для адгезії моделей з не плоскою формою основи моделі. Якщо важлива якість даної поверхні, то використовувати даний параметр безглуздо, оскільки буде потрібно відривати дані підтримки. Тому краще змінити орієнтацію моделі або використовувати двокомпонентний друк з використанням PVA філамента.

- **«Діаметр сопла»** – відповідає за діаметр сопла.

- **«Minimize Crossing Perimeters»** – параметр, що забезпечує пошук мінімальних шляхів до наступної точки друку. Дозволяє уникнути утворення павутини.

2. **«Настройки мульти экструдера»** – область налаштувань 3D друку двома філаментами.

- **«Create Wipe and Prime Tower»** – створення спеціальних об'єктів, в які буде стравлюватися пластик при переході з одного на інший. Це потрібно для того, щоб друкувати чистими кольорами, без змішування.

- **«Create Oozy Shield»** – створення багатошарової юбки, що повторює контури моделі.

- **«Екструдер поддержки»** – це другий екструдер.

- **«Переключатель отвода экструдера»** – це та відстань, на яку потрібно висмикнути перший філамент, щоб запустити в канал подачі новий.

- **«Wipe and Prime Volume»** – обсяг допоміжної моделі для стравлювання пластика. Чим більше модель, тим краще очиститься сопло від попереднього пластика. Але починаючи з певного значення, приблизно 120 мм, подальше збільшення не грає ролі.

- **«Перекрытие объема»** – довжина, на якій змішуються кольори. Корисно для принтера з двома соплами.

3. **«Охлаждение»** – параметри примусового охолодження моделі при друку.

- **«Fan full at Height»** – рівень друку по висоті, з якого почнеться процес охолодження.

- **«Минимальная скорость»** – мінімальна кількість обертів вентилятора.

- **«Cool head lift»** – налаштування відведення сопла від місця, яке потрібно охолодити, а потім знову продовжити друк. Часто потрібно при друці гострих елементів або деталей з великою вагою без підтримок.

«Пруток» – важлива вкладка з налаштуваннями, що пов’язані з матеріалом для друку (рис. 3.7).

- **«Диаметра прутка»** – поперечний розмір використовуваного філаменту.
- **«Flow»** – коефіцієнт подачі філаменту. За допомогою нього можна уникати пере/недоекструзії.

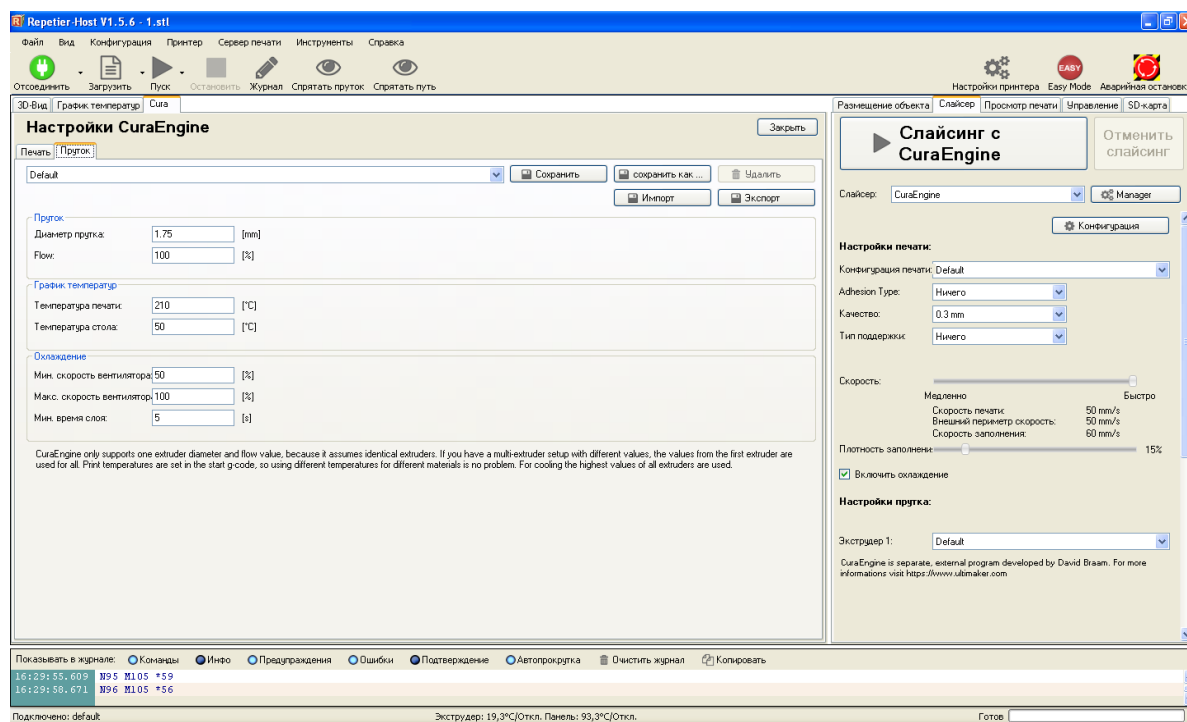


Рис. 3.7 – Конфігурації на вкладці «Пруток»

- **«Температура печати»** – температура сопла.
- **«Температура стола»** – температура робочого столу.
- **«Минимальная/Максимальная скорость вентилятора»** - відповідає за швидкість вентилятора.
- **«Минимальное время слоя»** – параметр, який необхідний для повноцінного охолодження шару. Якщо друк буде занадто великий швидкості, то охолодження може бути неефективним.

Також, за допомогою вищевказаної програми маємо доступ до редагування G-коду, що надає можливість перевірити команди або ж редагувати, додавати чи видаляти деякі з них.

На кожній із вкладок відповідних панелей налаштувань (рис. 3.4-3.7) вказані ті параметри, які було задано для друку моделей дисертаційної роботи.

3.4 Виконання 3D друку змодельованих конструкцій виробу на дельтавидному 3D-принтері

Після налаштування принтеру можна виконували друк моделей деталі «Коромисло»: її початкову модель (рис. 2.8, а) та отримані рішення з використанням програми **Solid Edge ST10** (рис. 2.21, 2.23, а, 2.26, 2.27, а, 2.28, а, 2.29, а).

Розглянемо етапи друку моделі «Коромисла», що є кінцевою. Робоче вікно програми Repetier-Host V1.5.6. Включає робочу область та декілька вкладок конкретних налаштувань поточного друку. Спершу завантажили 3D модель у форматі STL: натиснувши на кнопку «+» та обравши в вікні, потрібний файл. Далі змінювали розташування завантаженої моделі за рахунок використання інструментів повороту та переміщення, які доступні на цій вкладці, результат представлено на рис. 3.8.

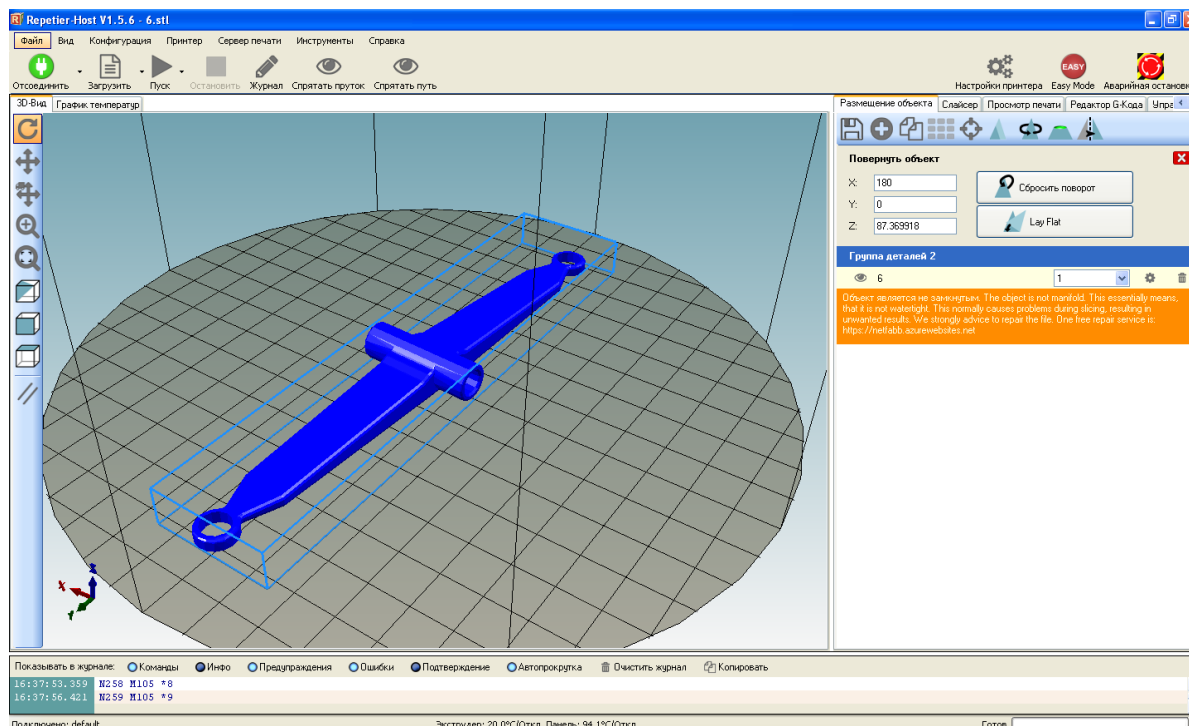


Рис. 3.8 – Результат розміщення моделі в Repetier-Host V1.5.6.

Далі у вкладці «Слайсинг» виконували налаштування товщини шару (0,2 мм), наявність підтримки, швидкість друку (30 мм/с) та щільність заповнення (15 %) (рис. 3.9), після чого натисканням кнопки «Слайсинг с CuraEngine» виконували розбиття моделі на шари – переведення моделі в STL форматі в G-code.

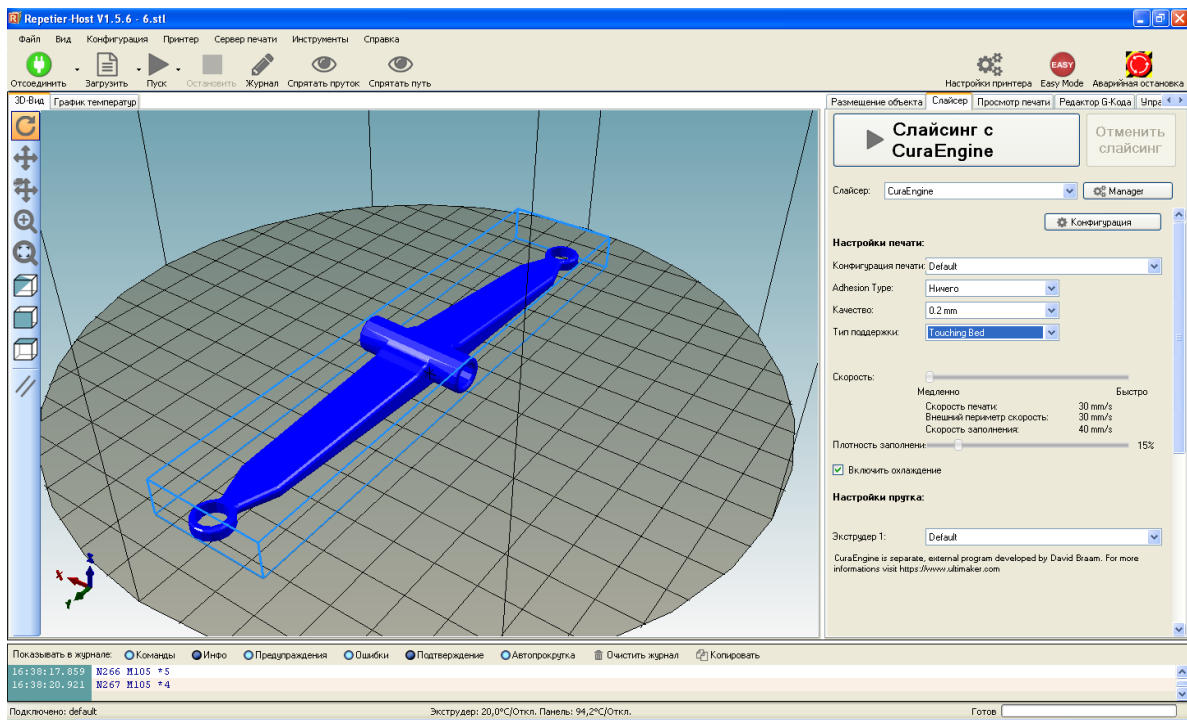


Рис. 3.9 – Підготовка кінцевої деталі для слайсингу завдяки CuraEngine

В результаті на вкладці «**Просмотр печати**» отримуємо інформацію про статистику друку, як це показано на рис. 3.10. Отже, розрахунковий час друку складає 37 хв 12 с, кількість шарів – 48, кількість рядків G-code – 20842, необхідна довжина прутка – 2024 мм.

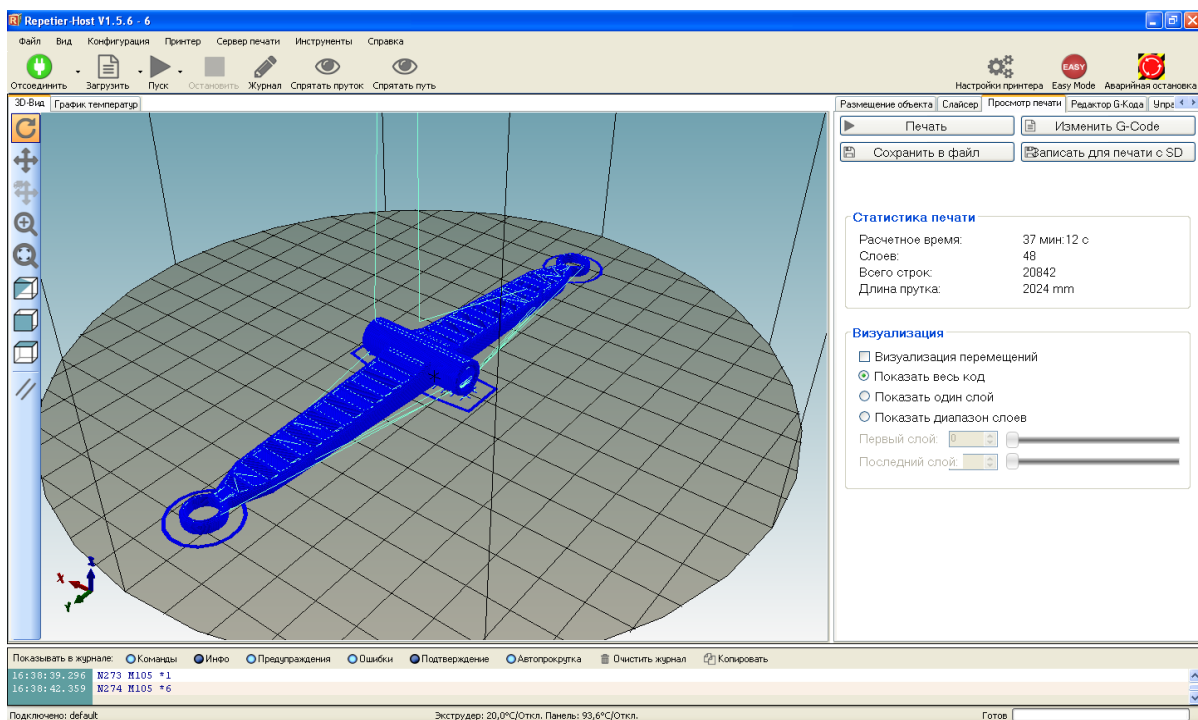


Рис. 3.10 – Результат виконання підготовки слайсеру до друку кінцевої деталі

У верхній частині вкладки «**Просмотр печати**» (рис. 3.10) знаходяться 4 кнопки. Кнопка «**Печать**» діє в тому випадку, якщо до комп'ютера підключений 3D принтер. Натиснувши на неї, команди G-code передаються на принтер і почнеться друк.

Інша кнопка називається «**Сохранить файл**». Це дозволяє зберегти файл G-code (рис. 3.11) для подальшого використання, наприклад, на переносний носій.

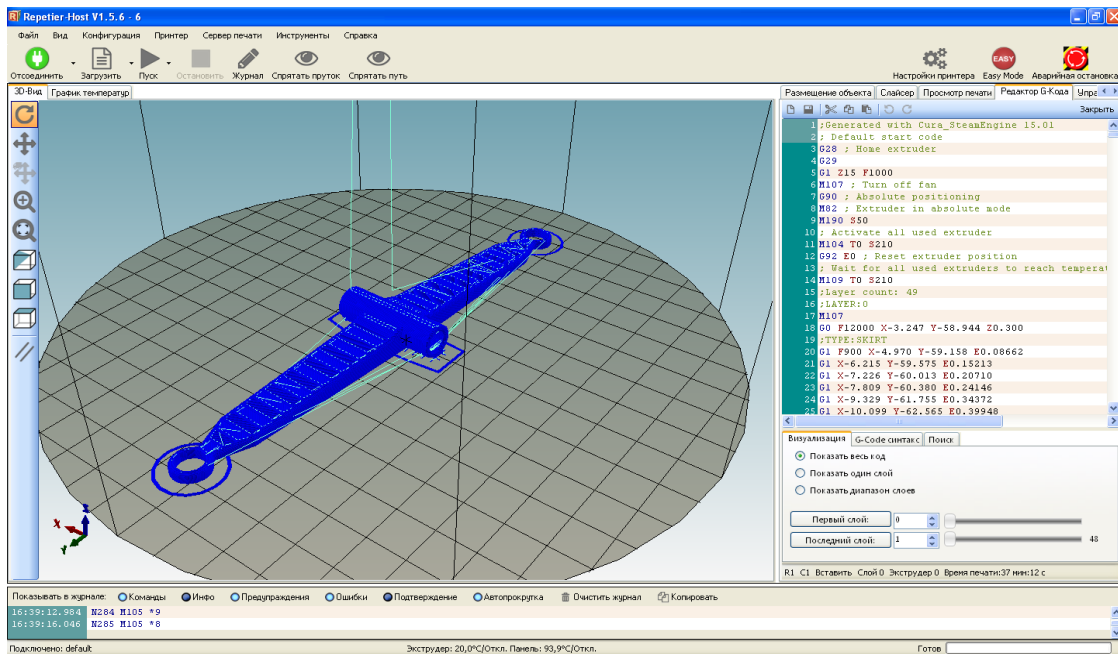


Рис. 3.11 – Управляючі команди для кінцевої деталі

Наступна кнопка – «**Записать для печати с SD**», дозволяє зберегти файл на знімний носій, щоб вставити його в 3D принтер і запустити друк вручну.

Кнопка «**Изменить G-code**» потрібна для редагування коду.

Друк моделі деталі «Коромисло», що є результатом генеративного дизайну початкової моделі (рис. 2.8) розпочинали натисканням кнопки «**Печать**», після чого переходили на вкладку «**Управление**», де відслідковували процес друку та параметри принтера. Результат 3D друку на дельтавидному принтері представлено на рис. 3.11, фактичний час друку становив 35 хв при заданих параметрах.

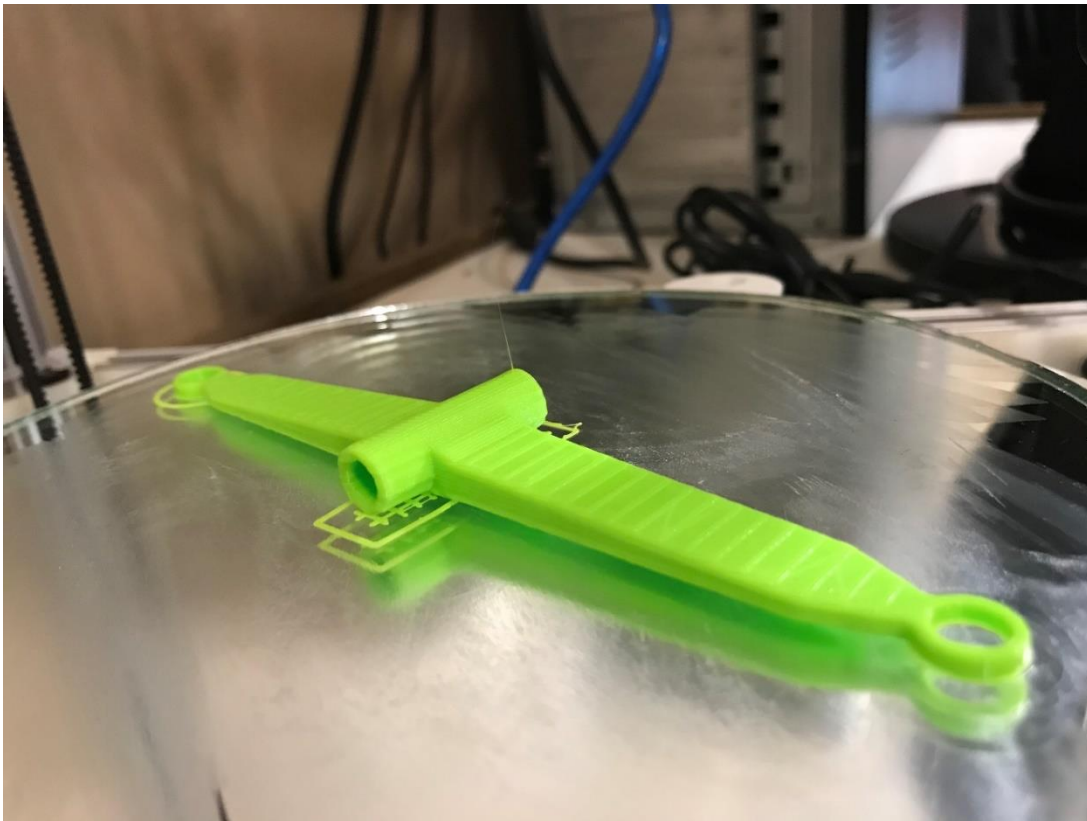


Рис. 3.11 – Результат 3D друку кінцевої деталі

Аналогічні дії виконували для друку початкової моделі деталі «Коромисло» (рис. 3.12).

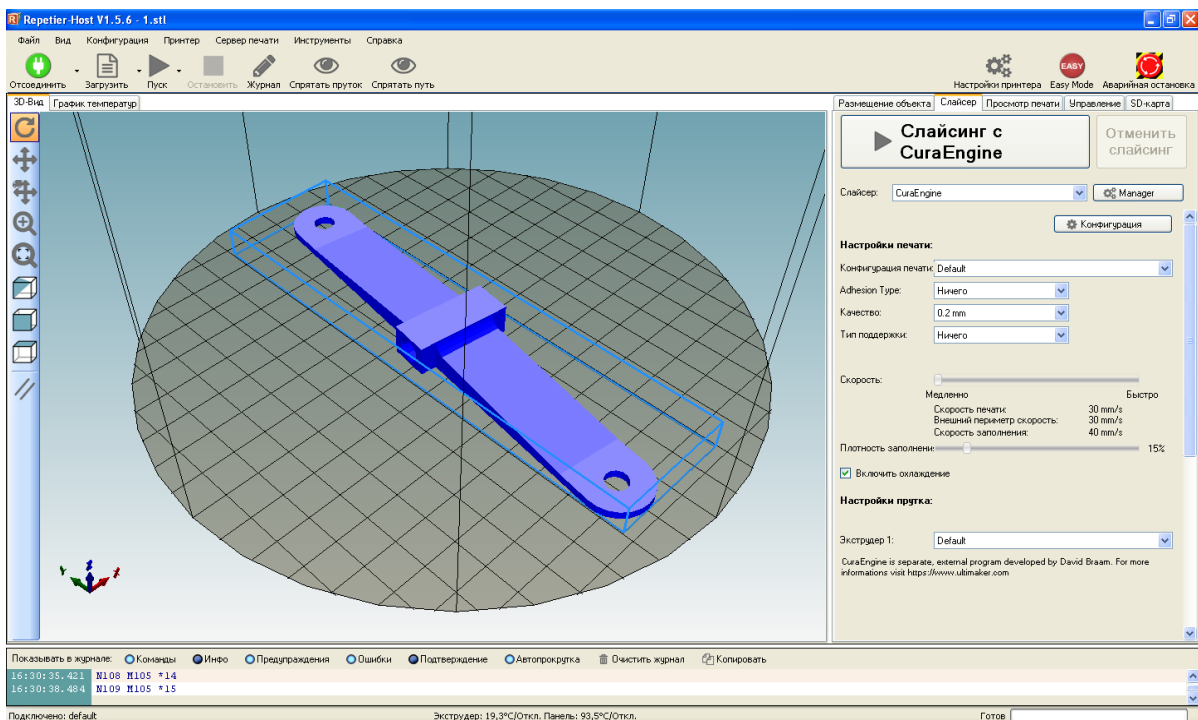


Рис. 3.12 – Підготовка початкової деталі для слайсингу завдяки CuraEngine

Після виконання слайсингу розрахунковий час друку відповідної моделі становив 1 год 5 хв 7 с (рис. 3.13). Управляючі команди представлені на рис. 3.14, а результат друку початкової деталі «Коромисло» на дельтавидному 3D-принтері показано на рис. 3.15, фактичний час становив 1 год 3 хв.

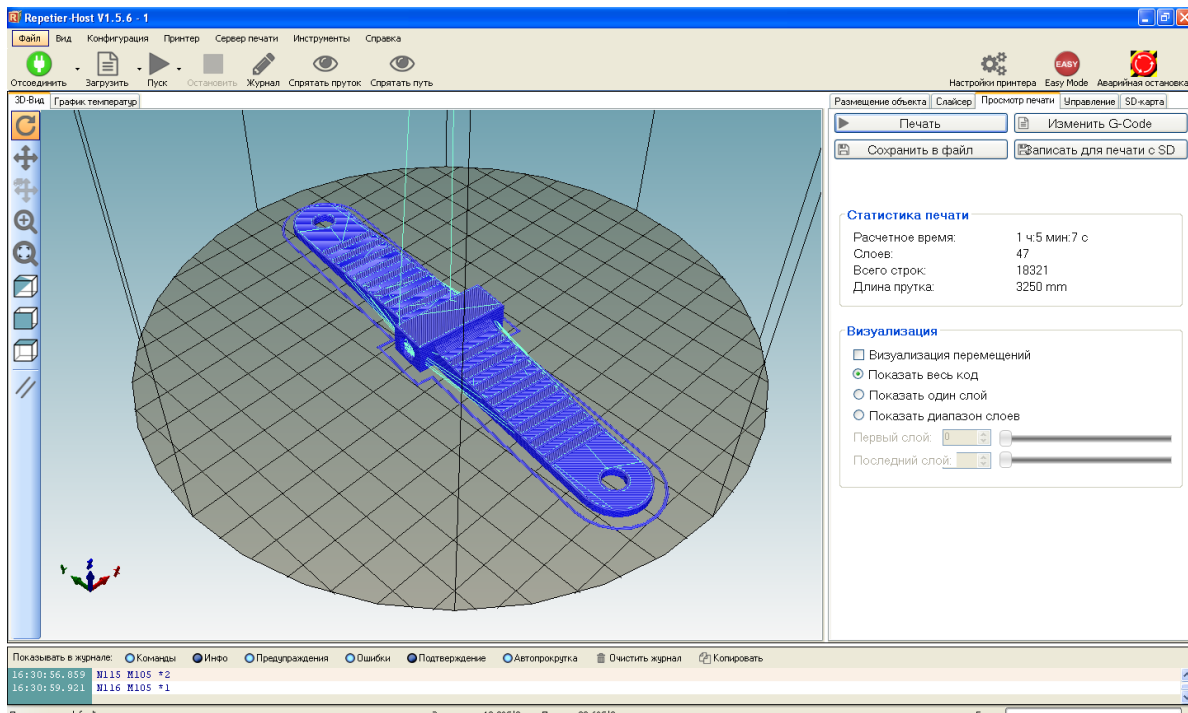


Рис. 3.13 – Результат виконання підготовки слайсеру початкової деталі

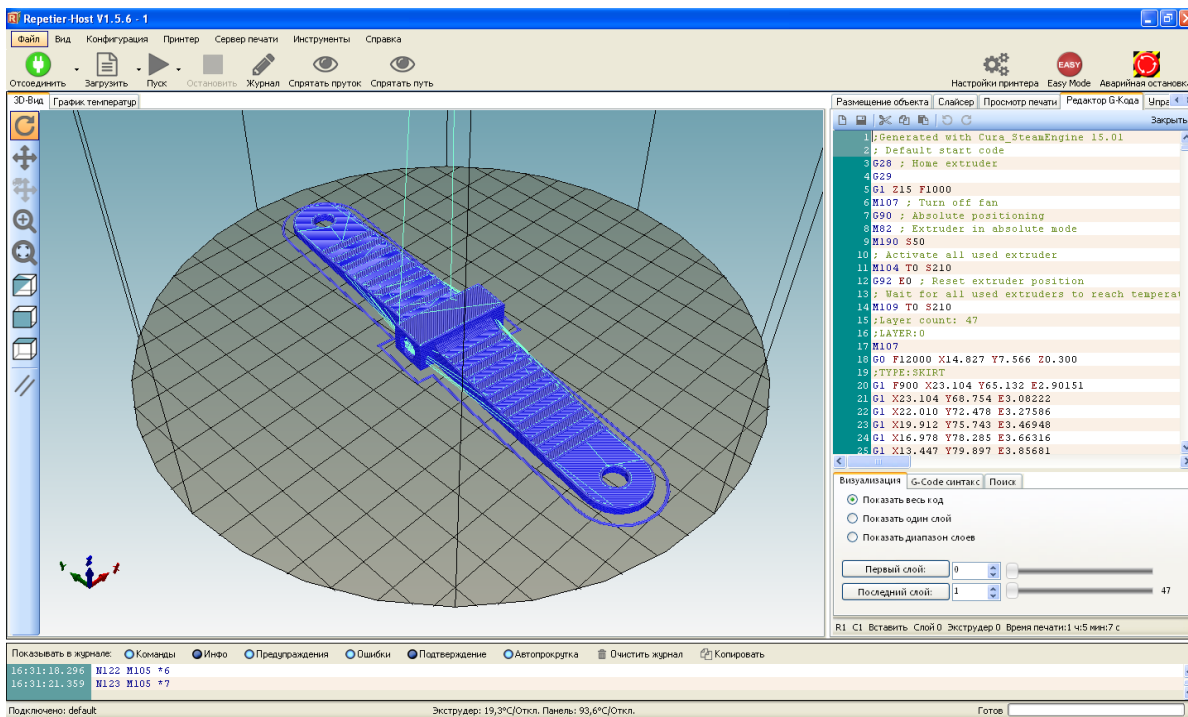


Рис. 3.14 – Управляючі команди для початкової деталі



Рис. 3.15 – Результат тривимірного друку початкової деталі

Repetier-Host також дозволяє виконання друку декількох моделей одночасно, цю властивість було використано для друку проміжних рішень генеративного дизайну деталі «Коромисло». Таким чином, результат одночасного друку декількох деталей з аналогічними параметрами слайсеру, представлено на рис. 3.16, а, та рис. 3.16, б.



а)



б)

Рис. 3.16 – Результат друку моделей деталей після генеративного дизайну

В результаті можемо наочно порівняти всі 6 надрукованих моделей, які представлені на рис. 3.17.



Рис. 3.17 – Результат друку моделі деталі «Коромисло» та 5 варіантів рішень згенерованих удосконалених моделей

Висновки до розділу 3

Виконано огляд методики проведення експериментальних досліджень. Проаналізовано та розглянуто можливості лабораторного дельтавидного 3D-принтеру та використовувани з ним матеріали. Це дозволило дізнатися необхідну інформацію, що б підготувати 3D-принтер для друку з певними заданими параметрами в використовуваному програмному забезпеченні Repetier-Host V1.5.6.

В результаті, було надруковано 6 моделей деталі «Коромисло». Для початкової деталі розрахунковий час складав 1 год 5 хв 7 с, а для кінцевої 37 хв 12 с, що майже в 2 рази менше. Отже, результат генеративного дизайну деталі дозволив не лише зменшити масу деталі, а і розрахунковий час друку.

РОЗДІЛ 4 ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЕТАЛІ

4.1 Методика моделювання удосконаленої геометричної моделі деталі за допомогою генеративного дизайну в середовищі Solid Edge ST10

Для можливості практичного використання генеративного дизайну з метою створення удосконаленої геометричної моделі деталі розроблено відповідну методику.

Першим етапом є аналіз конструкції деталі та умов її експлуатації.

На основі інформації виконується побудова твердотільної 3D моделі деталі в будь якій системі автоматизованого проектування з можливістю збереження її у форматі STP.

Адже, формат STP (STEP формат) є універсальним форматом представлення даних (тривимірні моделі, креслення, специфікації) в системах автоматизованого проектування (CAD-систем).

Всі STEP моделі, які генеруються в CAD системі, підкоряються вимогам стандартів ISO 10303.

Формат STP широко застосовується в самих різних галузях промислового виробництва, включаючи автомобілебудування, кораблебудівну індустрію, і навіть аерокосмічну сферу. Універсальність – це головна перевага формату STP. Робота з файлами STP особливо ефективна при реалізації проекту групою фахівців: 3D моделі окремих конструктивних елементів виробу, що створені в різних САПР, можуть бути універсалізовані та зібрані в окрему складальну одиницю.

Далі проводиться аналіз напружено-деформованого стану деталі з початковою геометрією. Даний етап виконується в програмному середовищі ANSYS Workbench.

Необхідно виконати наступні дії в середовищі ANSYS (рис. 4.1):

1. Створити новий проект та додати модуль «Static Structural».
2. В модулі «Static Structural» обрати пункт «Geometry» тим самим викликавши вбудовану CAD систему.
3. Відкрити модель деталі в форматі STP, після чого зачинити CAD систему.
4. В модулі «Static Structural» обрати пункт «Model» тим самим викликавши програмний пакет кінцево-елементного аналізу, де створився проект, що містить імпортовану модель.

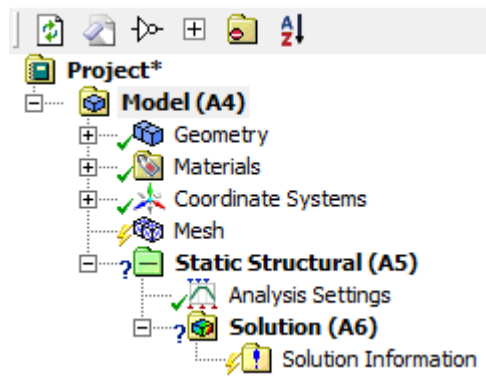


Рис. 4.1 – Створений проект в Ansys

5. Згенерувати сітку кінцевих елементів за допомоги параметра «Mesh», для цього натиснути правою кнопкою миші (ПКМ) та обрати «Generate Mesh».

6. Додати навантаження, що діють на деталь, для цього натиснути ПКМ по параметру «Static Structural → Insert» та обрати силу, що діє на деталь (рис. 4.2).

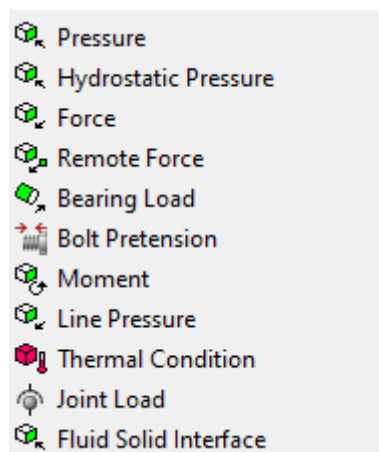


Рис. 4.2 – Панель навантажень

7. Додати обмеження для деталі, для цього ПКМ по параметру «Static Structural → Insert» та обрати потрібний параметр (рис. 4.3).



Рис. 4.3 – Панель обмежень

Підготовка 3D моделі до аналізу напружено-деформованого стану деталі завершена.

8. Надалі використовувати «Solution → Insert», щоб додати в проект тип аналізу (рис. 4.4), який потрібен, в нашому випадку для деформації «Deformation → Total», а для напруження «Stress → Equivalent (von-Mises)»

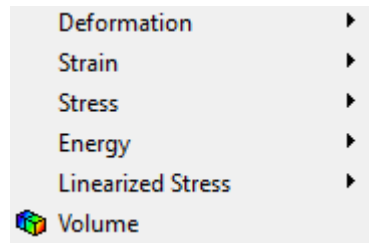


Рис. 4.4 – Панель аналізу

9. Використати команду «Solve», для вирішення доданих аналізів, використовуючи задані до цього параметри процесу вирішення.

10. Після цього обрати потрібне рішення в параметрі «Solution» та отримати результат аналізу.

Отже, в результаті аналізу маємо потрібну інформацію про напружено-деформований стан деталі, який виконувався в середовищі ANSYS.

Далі виконується моделювання удосконаленої геометричної моделі деталі за допомогою генеративного дизайну в середовищі Solid Edge ST10. Для цього необхідно виконати наступні дії в середовищі Solid Edge ST10:

1. Відкрити модель деталі в середовищі Solid Edge ST10 (рис. 4.5).

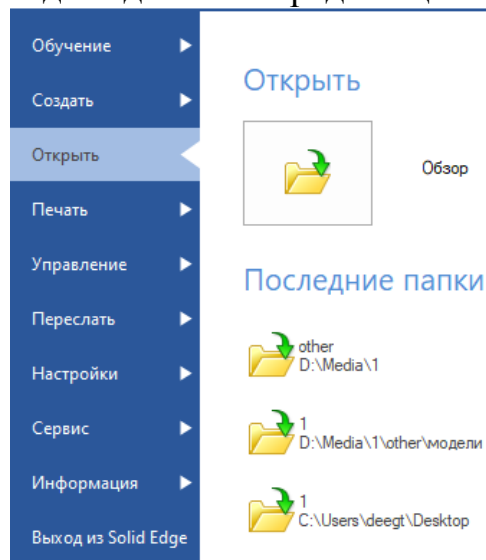


Рис. 4.5 – Відкриття моделі деталі в середовищі Solid Edge ST10

2. У **Навігаторі** вибрати вкладку **Генеративний дизайн**, щоб відобразити панель **Генеративний дизайн** (рис. 4.6).

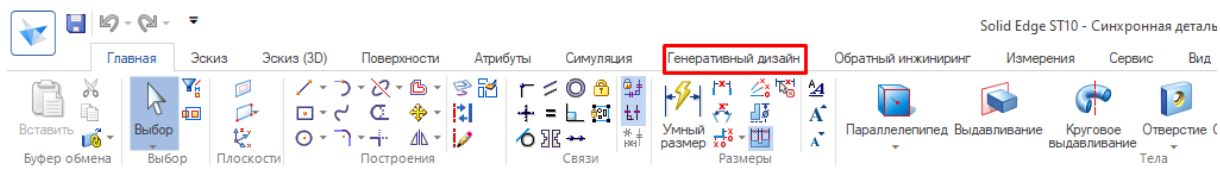


Рис. 4.6 – Навігатор Solid Edge ST10

3. Задати матеріал для моделі в розділі **Призначення матеріалу для генеративних аналізів** (рис. 4.7).

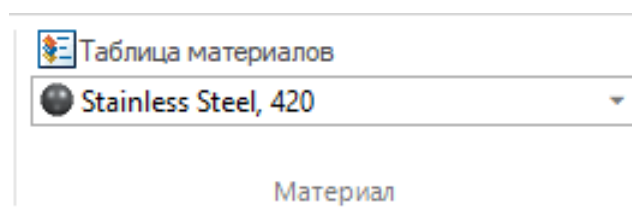


Рис. 4.7 – Таблица матеріалів

4. Створити генеративний аналіз, натисканням кнопки, як показано на рис. 4.8.

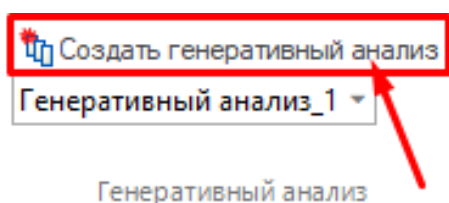


Рис. 4.8 – Кнопка створення генеративного дизайну

5. Задати **Незмінні області** в геометрії, які не будуть піддаватись змінам (рис. 4.9).

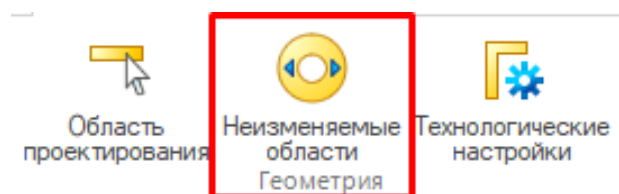


Рис. 4.9 – Панель геометрії

6. Якщо потрібно, використати **Технологічні параметри**, щоб видалити внутрішні порожнини і виключити провисання (рис. 4.10).

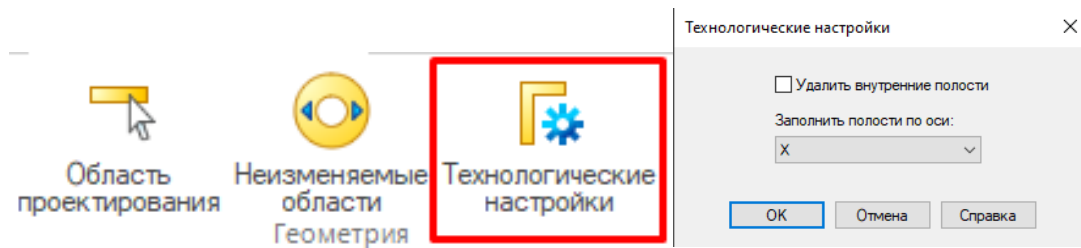


Рис. 4.10 – Технологічні налаштування

7. Застосувати принаймні одне навантаження – вибрати одну з наступних команд (рис. 4.11) на вкладці **Генеративний дизайн** → група **Навантаження**:

- сила;
- тиск;
- крутний момент.

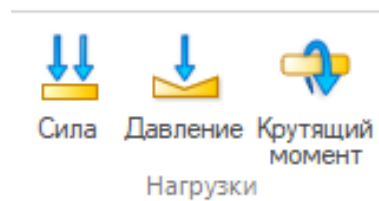


Рис. 4.11 – Панель навантажень

8. Застосувати принаймні одне обмеження – вибрати одну з наступних команд (рис. 4.12) на вкладці **Генеративний дизайн** → група **Обмеження**:

- зафіксувати;
- заборонити переміщення.

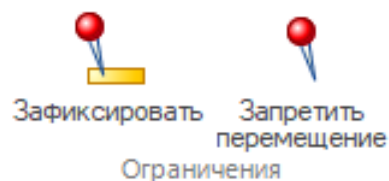


Рис. 4.12 – Панель обмежень

9. Виконати рішення аналізу – вибрати вкладку **Генеративний дизайн** → група **Виконати** → команда **Виконати** (рис. 4.13):

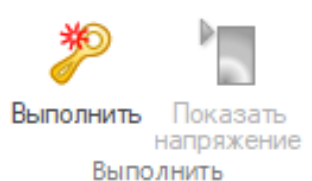


Рис. 4.13 – Панель виконання аналізу

При цьому використовувати діалогове вікно «Генеративний аналіз», яке представлено на рис. 4.14 для завдання параметрів оптимізації;

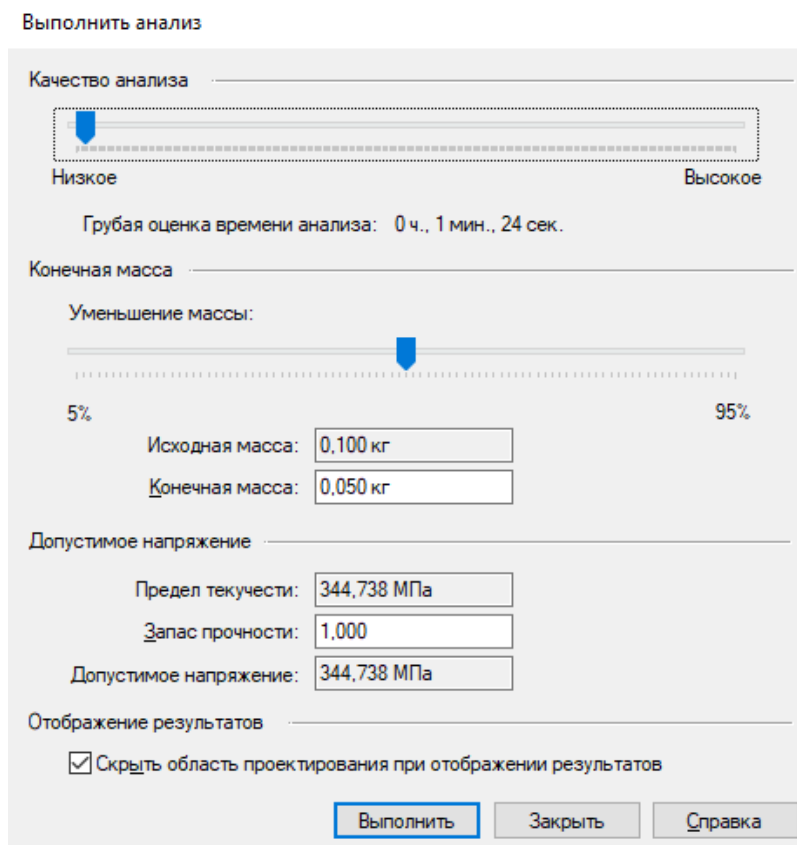


Рис. 4.14 – Діалогове вікно «Завдання параметрів оптимізації»

Якщо виконання зупиняється через помилки, то відкривається діалогове вікно «Інформація про виконання генеративного аналізу», як показано на рис. 4.15. Воно також відкривається після завершення розрахунку.

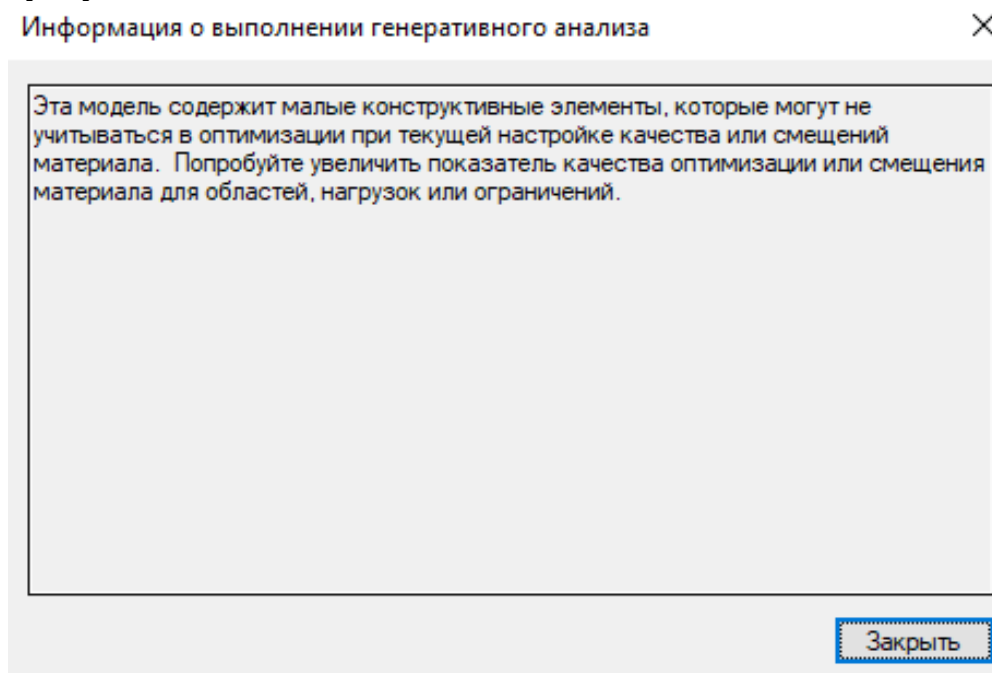


Рис. 4.15 – Вікно «Інформація про виконання генеративного аналізу»

10. Відобразити напруження з результатів генеративного аналізу можна за допомогою інструменту «Показати напруження» (рис. 4.16).

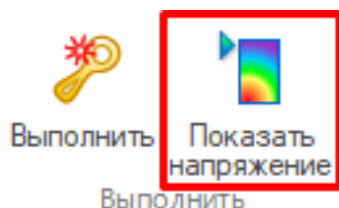


Рис. 4.16 – Кнопка для відображення напружень в деталі

11. Надалі отриману геометрію зберігаємо. Для цього в результаті проекту генеративного дизайну натиснути ПКМ на копію деталі та обрати «Отделить от анализа» (рис. 4.17).

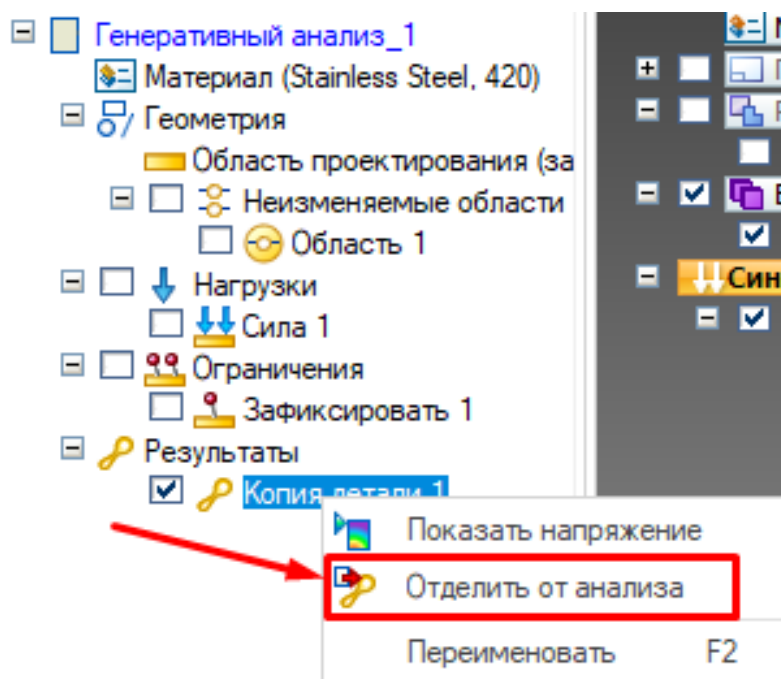


Рис. 4.17 – Проект генеративного дизайну

Деталь стає незалежним об'єктом, яку потрібно активувати та зробити робочим тілом (рис. 4.18).

12. В дереві генеративного дизайну ПКМ по копії деталі, яку створили, обираємо «Активировать тело», для того щоб активувати видимість моделі та «Рабочее/Вспомогательное тело», для того щоб деталь розпізнавалася, як основна геометрія.

13. Видаляємо початкову геометрію, для цього ПКМ по початковій моделі та обираємо «Удалить».

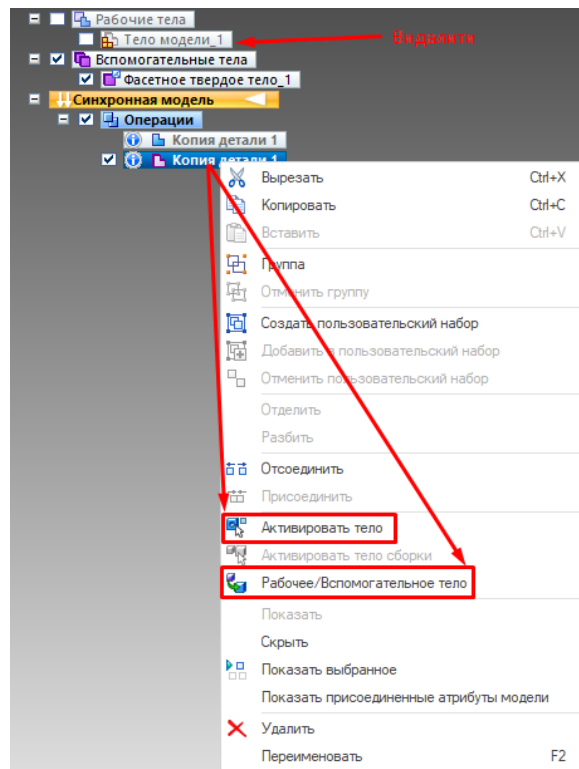


Рис. 4.18 – Дії потрібні для збереження моделі

14. Зберігаємо змодельовану геометрію, для цього «Кнопка приложения → Сохранить как → Сохранить с преобразованием», обираємо формат зберігаємо деталі в залежності від цілей.

Проводимо аналіз напружено-деформованого стану в середовищі ANSYS для змодельованої геометрії методом генеративного дизайну.

Заключним етапом є аналіз отриманих значень напружень в матеріалі досліджуваної деталі з метою визначення прийнятності отриманої геометричної моделі з огляду на механічні характеристики матеріалу.

Якщо значення розрахованих напружень є меншими ніж границя пропорційності для даного матеріалу, отриману геометрію деталі можна вважати прийнятною для даних експлуатаційних умов. Оскільки, в такому випадку деталь буде деформуватися пружно і після зняття навантажень повернеться до початкового стану.

4.2 Приклади результатів використання методики генеративного дизайну в середовищі Solid Edge ST10

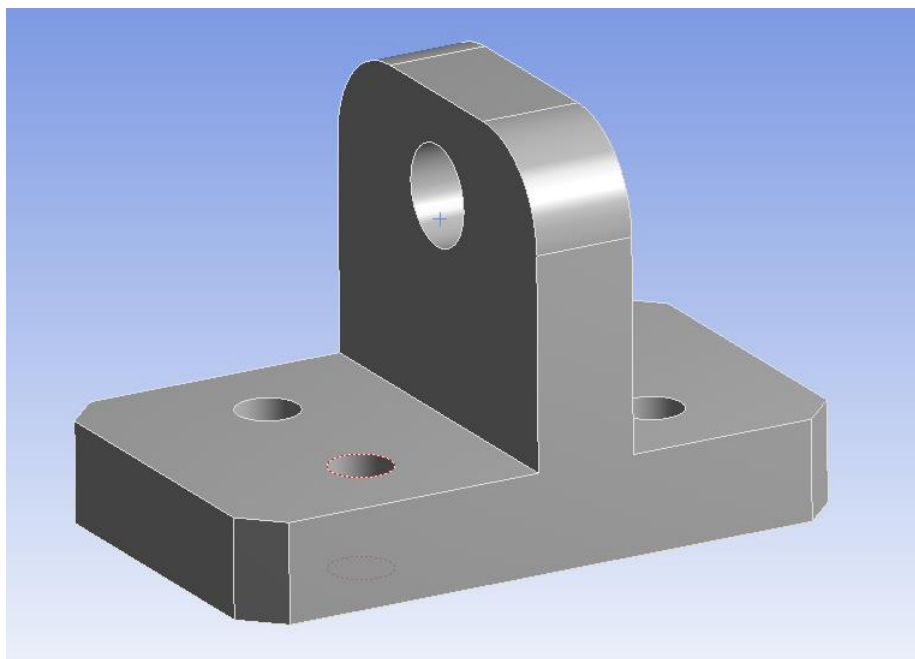
Для прикладу розглянемо деталь «Кронштейн», яка виготовлена зі сталі 40Х ДСТУ 7806:2015 та має масу 130 г, її модель представлено на рис. 4.19, а.

Використовуємо методику генеративного дизайну, яка представлена в пункті 4.1. Після аналізу вихідної інформації про деталь та умови її експлуатації, створили її 3D модель (рис. 4.19, а) та виконали аналіз

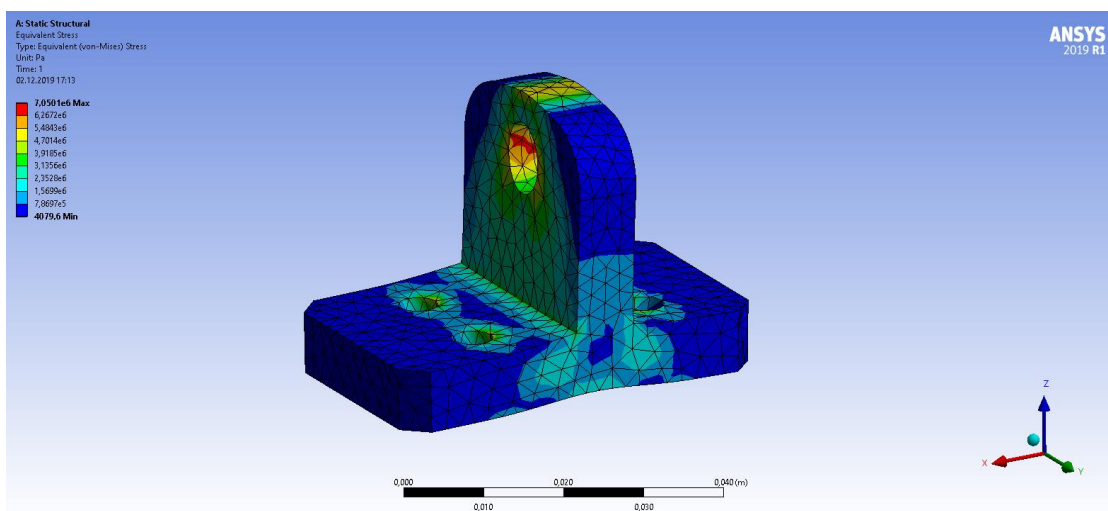
напружено-деформованого стану деталі з початковою геометрією в середовищі ANSYS.

Результат аналізу моделювання напружень та деформації відповідно представлено на рис. 4.19, б та рис. 4.19, в, з яких видно, що напруження знаходяться в діапазоні від 4,0796 кПа до 7,0501 МПа, а деформація – від 0 мм до 0,00070581 мм.

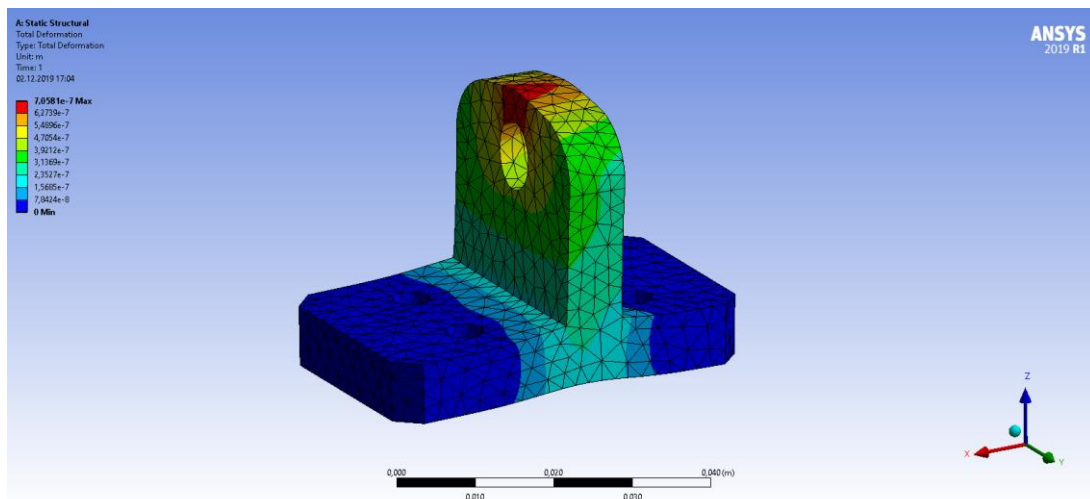
Далі переходили до моделювання в середовищі Solid Edge ST10. Як критерій оптимізації задавали зменшення маси деталі «Кронштейн» на 50 % менше від початкової деталі. Виходячи з умов експлуатації деталі силу в 670 Н прикладали на центральний отвір кріплення, а обмеження задали на 4 отвори на поверхні деталі.



а)



б)



в)

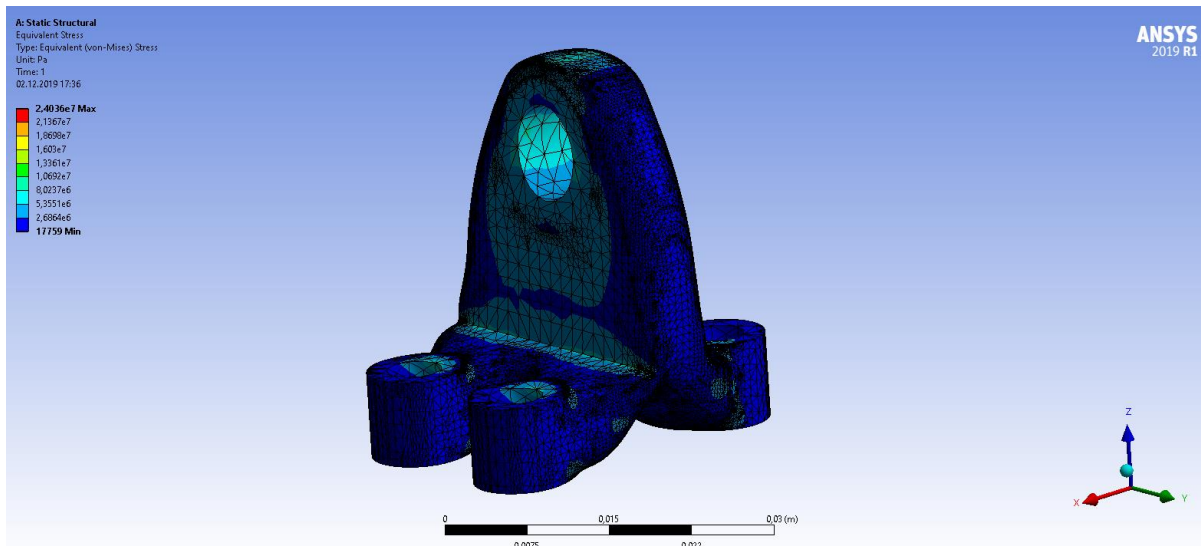
Рис. 4.19 – Результат комп’ютерного моделювання напружено-деформованого стану деталі:

- а) тривимірний модель деталі «Кронштейн»;
- б) результат визначення напружень;
- в) результат визначення деформацій

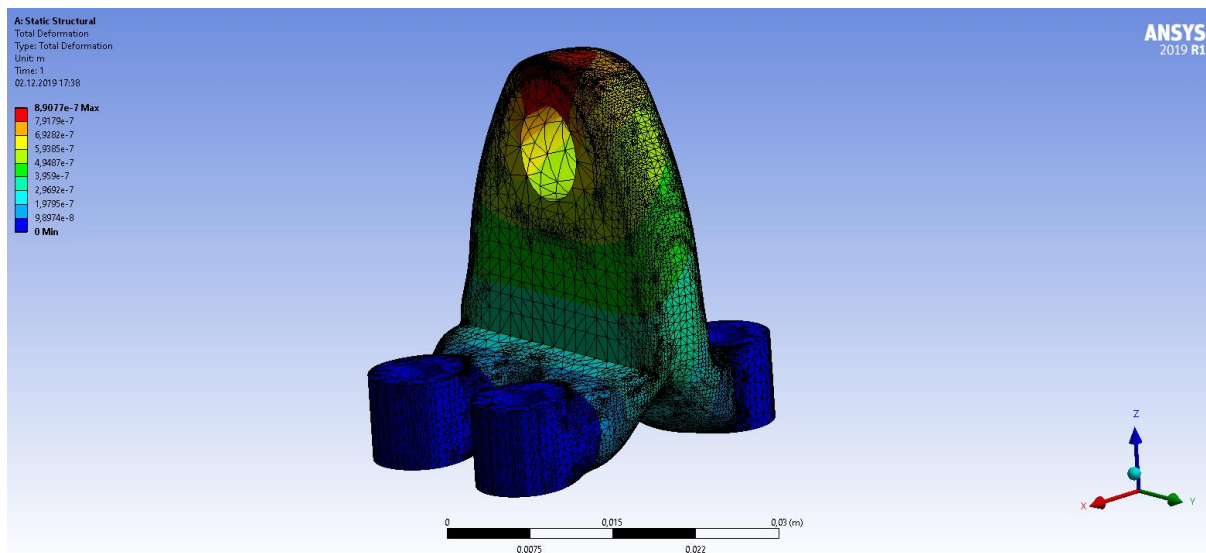
Отже, в результаті генеративного дизайну деталі «Кронштейн» отримано виріб масою 62,56 г (рис. 4.20, а). Результати аналізу моделювання напружень та деформації деталі з удосконаленою геометрією, відповідно, представлено на рис. 4.20, б та рис. 4.20, в, з яких видно, що напруження знаходяться в діапазоні від 17,759 кПа до 24,036 МПа, а деформація – від 0 мм до 0,00089077 мм.



а)



б)



в)

Рис. 4.20 – Результат комп’ютерного моделювання напружено-деформованого стану деталі:
 а) результат генеративного дизайну деталі «Кронштейн»,
 б) результат визначення напружень;
 в) результат визначення деформацій

Отже, результат моделювання є позитивним, оскільки в матеріалі деталі максимально утворюються напруження в 24,036 МПа, що нижче значень границі пропорційності (414 МПа) для даного матеріалу та границі міцності (780,33 МПа). Це означає, що деталь не буде деформуватися пластично, тобто деформування буде лише пружне і після зняття прикладених сил, деталь повернеться до початкового стану. Використання даного конструктивного рішення в реальному механізмі при реальних

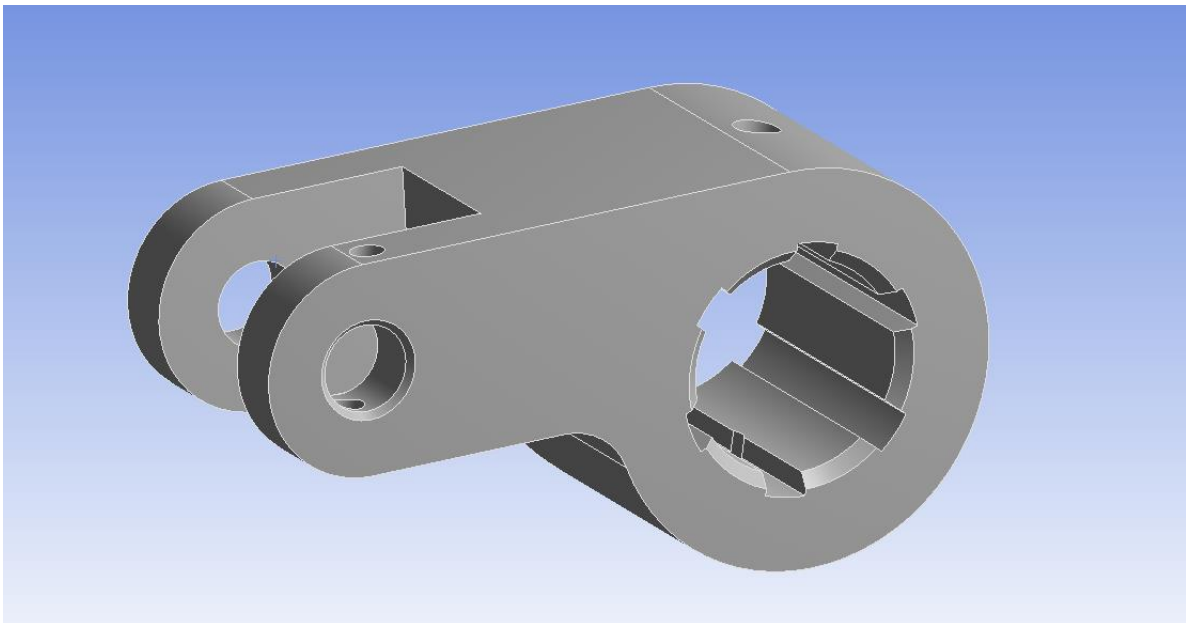
режимах експлуатації є можливим, тому повторна оптимізація деталі не потрібна.

Наступним розглянемо деталь «Ричаг», яка виготовлена зі сталі 40Х ДСТУ 7806:2015 та має масу 1 кг 62,4 г, модель якої представлено на рис. 4.21, *а*.

Використовуємо методику генеративного дизайну, яка представлена в пункті 4.1. Після аналізу вихідної інформації про деталь та умови її експлуатації, створили її 3D модель (рис. 4.212, *а*) та виконали аналіз напружено-деформованого стану деталі з початковою геометрією в середовищі ANSYS.

Результат аналізу моделювання напружень та деформації відповідно представлено на рис. 4.21, *б* та рис. 4.21, *в*, з яких видно, що напруження знаходяться в діапазоні від 983,71 Па до 4,8 МПа, а деформація – від 0 мм до 0,0025708 мм.

Далі переходили до моделювання в середовищі Solid Edge ST10. Як критерій оптимізації задавали зменшення маси деталі «Ричаг» на 50 % менше від початкової деталі. Виходячи з умов експлуатації деталі силу в 400 Н прикладали на центральний отвір кріплення, а обмеження задали на 4 отвори на поверхні деталі.



а)

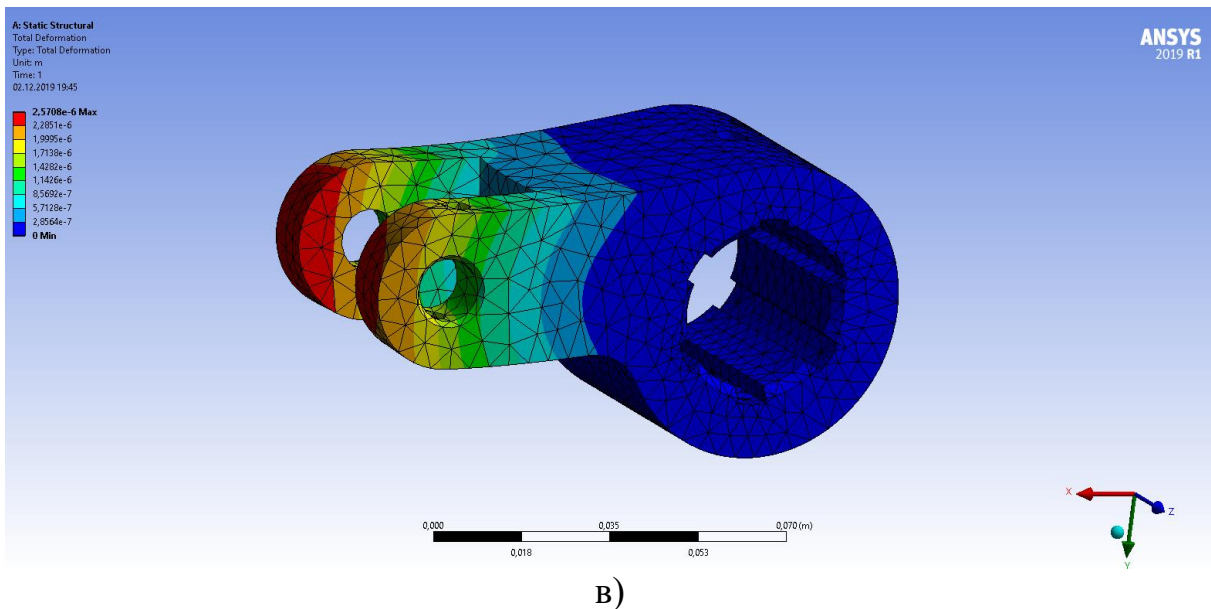
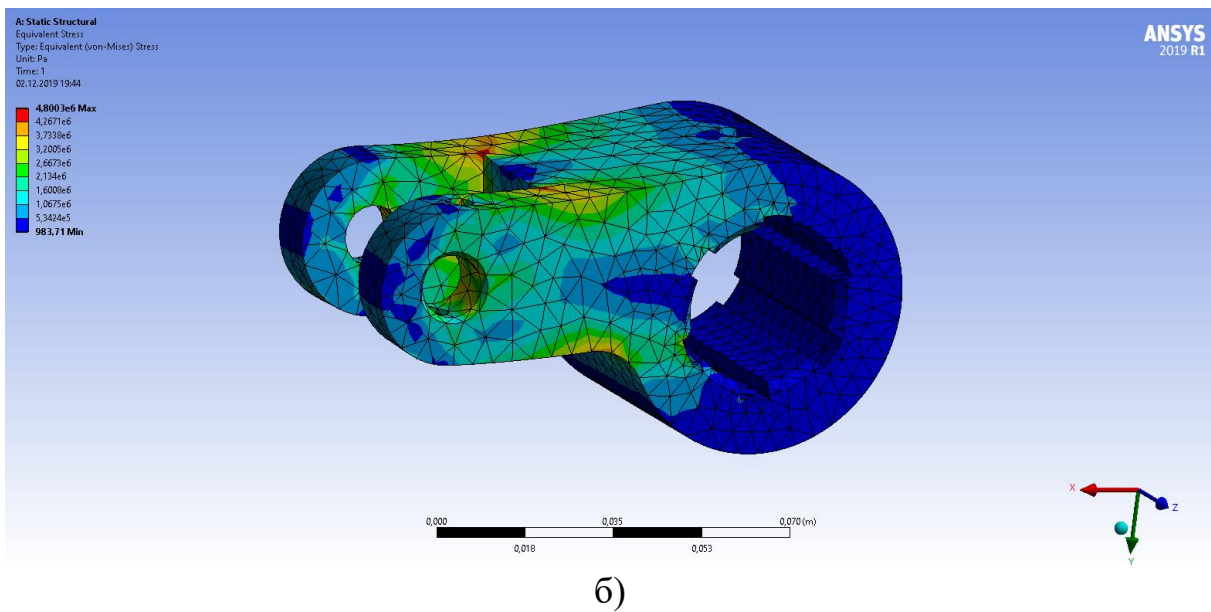


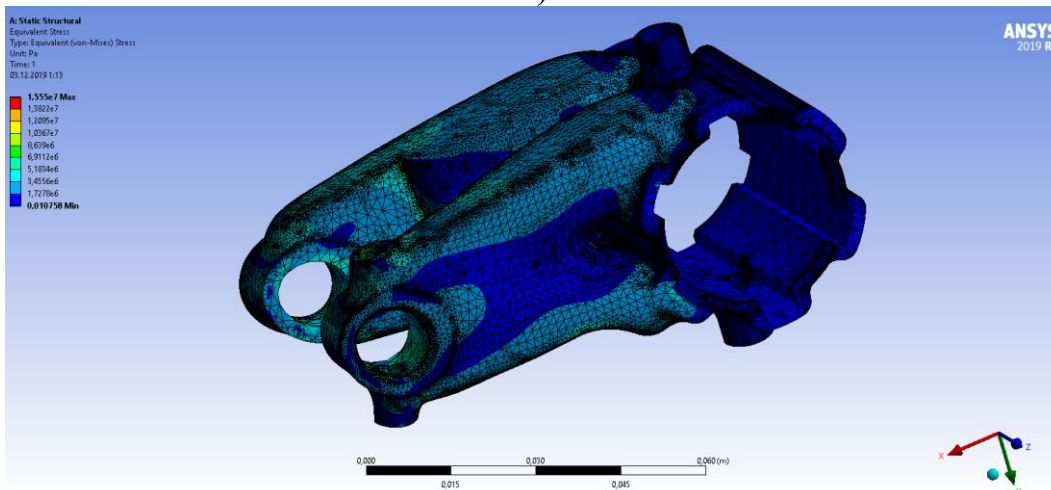
Рис. 4.21 – Результат комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану деталі:
 а) тривимірна модель деталі «Ричаг»,
 б) результат визначення напружень;
 в) результат визначення деформацій

Далі переходимо до моделювання в середовищі Solid Edge ST10. Як критерій оптимізації задаємо мінімальну масу деталі «Ричаг» на 45 % з урахуванням початкової геометрії, навантажень і обмежень, заданих для аналізу.

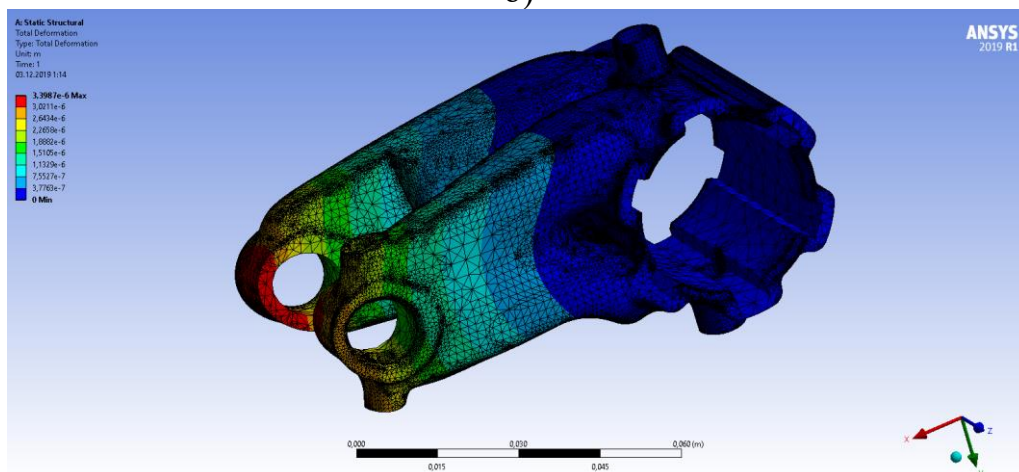
Отже, в результаті генеративного дизайну деталі «Ричаг» отримано виріб масою 488 г. Результати аналізу моделювання напружень та деформації відповідно представлено на рис. 4.22, а, рис. 4.22, б та рис. 4.22, в, з яких видно, що напруження знаходяться в діапазоні від 0,01 Па до 15,55 МПа, а деформація – від 0 мм до 0,0033987 мм.



а)



б)



в)

Рис. 4.22 – Результат комп'ютерного моделювання напружено-деформованого стану деталі:

- а) результат генеративного дизайну деталі «Ричаг»,
- б) результат визначення напружень;
- в) результат визначення деформацій

Результат моделювання є позитивними, оскільки в матеріалі деталі максимально утворюються напруження в 15,55 МПа, що нижче значень границі пропорційності (414 МПа) для даного матеріалу та границі міцності (780,33 МПа). Це означає, що деталь не буде деформуватися пластично, тобто деформування буде лише пружне і після зняття прикладених сил, деталь повернеться до початкового стану. Використання даного конструктивного рішення в реальному механізмі при реальних режимах експлуатації є можливим, тому повторна оптимізація деталі не потрібна.

Висновки до розділу 4

Розроблено методику генеративного дизайну в програмному середовищі Solid Edge ST10, завдяки чому було створено рекомендації, щодо впровадження результатів дисертаційних досліджень для виготовлення нових виробів приладобудування за допомогою моделювання геометричної моделі деталей методами генеративного дизайну.

В результаті, було створено декілька прикладів використання генеративного дизайну для виробів приладобудування типу «Кронштейн» та «Ричаг», де основним критерієм оптимізації було зменшення ваги на 50 %.

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ГЕНЕРАТИВНОГО ДИЗАЙНУ»

5.1 Опис ідеї проекту

Розглянувши в попередніх розділах вплив методів генеративного дизайну на моделювання геометричної моделі деталей було розроблено рекомендації для вдосконалення конструкції деталей приладів та забезпечення їх експлуатаційних характеристик. Підсумком виконання етапу ініціації є інформаційна карта проекту (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Інформаційна карта проекту

| | |
|---|---|
| 1. Назва проекту | MGenerate Auto |
| 2. Автори проекту | Іванов Д.Є., Барандич К.С. |
| 3. Коротка анотація | Проект включає в себе як технологічну так економічну частини. Проект бере до уваги найновіші розробки та досягнення в галузях технологій та економіки. Проект не є закінченим. |
| 4. Термін реалізації проекту | 36 місяців |
| 5. Необхідні ресурси | За вартістю MGenerate Auto може виробляти просту модель в районі 300 - 500 доларів, а далі все залежить від моделі, вартості матеріалу і застосовуваних технологій. Політика така більший попит менше ціна. Потрібно дати споживачеві самому вибирати матеріали, технології і визначатися в ціні. |
| 6. Опис проблеми, яку вирішує проект | За допомогою генеративного дизайну зменшується маса виробу, отже зменшуються витрати на матеріал |
| 7. Головні цілі та завдання проекту | У виробництві використовуються Еко технології. Використання технологій генеративного дизайну для вдосконалення конструкції деталей приладів та забезпечення їх експлуатаційних характеристик |
| 8. Очікувані результати: | можливості генеративного дизайну дозволяють працювати з великими масивами інформації і на їхній основі обирати найкращі моделі й рішення, а також створювати візуалізації цих даних. Отже, є можливості організувати виробництво повного циклу. |

Даний розділ буде містити аналіз стартап проекту, головна мета якого буде визначення шансу виходу продукту на ринок і яка конкурентна змога з вже існуючими аналогами.

У таблиці 5.2 зображено ідеї, зміст та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати потенційних клієнтів [37].

Таблиця 5.2 – Опис ідеї стартап проекту [37]

| <i>Зміст ідеї</i> | <i>Напрямки застосування</i> | <i>Вигоди для користувача</i> |
|---|---|--|
| Розробка рекомендацій для вдосконалення конструкції деталей приладів та забезпечення їх експлуатаційних характеристик | 1. Застосування в різних галузях (управління, проектування, планування, налаштування, прогнозування тощо) | Маючи високу гнучкість, дозволяє адаптувати систему до умов різних виробництв а також дозволяє користуватися системою не маючи відповідних знань з області призначення даної системи |
| | Приладо- та машинобудування | 1. Зменшення маси виробу 2. Зменшення витрат 3. Збереження/покращення експлуатаційних характеристик |

Отже, пропонується новий спосіб оптимізації та створення нової геометрії деталі та визначення напружень, яка реалізована комп'ютерним моделюванням методами генеративного дизайну для зменшення ваги та покращення напружено-деформованого стану.

Надалі потрібно зробити аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів. Для цього потрібно зробити [37]:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.3) [37].

Таблиця 5.3 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту [37]

| № | Техніко-економічні характеристики ідеї | товари/концепції конкурентів | | | | W (слабка сторона) | N (нейтральна сторона) | S (сильна сторона) |
|----|--|------------------------------|---------|---------|----------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| | | Мій проект | 3Devise | Арсенал | Autodesk | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1. | Торгівельна марка | - | + | + | + | + | | |

Закінчення таблиці 5.3

| | | | | | | | | |
|----|--|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 2. | Імпорт 3D моделей | + | + | - | + | | + | |
| 3. | Показник взаємодії програми з користувачем | + | - | - | + | | + | |
| 4. | Патенти на продукти | - | - | + | + | | + | |
| 5. | Економічність | + | - | - | - | | | + |

Після порівняння слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є можливість сформулювати висновки його конкурентоспроможності. Недоліком є те, що товар незахищений від копіювання за рахунок відсутності патенту на винахід. Проте сильною стороною є можливість отримати заказ на оптимізацію деталі від підприємств спеціального приладобудування.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових, що представлені в табл. 5.4 [37]:

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/добробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 5.4 – Технологічна здійсненність ідеї проекту [37]

| № | Ідея проекту | Технології її реалізації | Наявність технологій | Доступність технологій |
|----|---|------------------------------------|----------------------|------------------------|
| 1. | Оптимізація геометрії виробу | Технологія генеративного дизайну | Наявні | Доступні |
| 2. | Розрахунок експлуатаційних характеристик | Технологія генеративного дизайну | Наявні | Доступні |
| 3. | Візуальний контроль за допомогою програми | Технологія генеративного дизайну | Наявні | Доступні |
| 4. | Проведення вимірів деталі | Технологія моделювання вимірювання | Наявні | Доступні |

Після аналізу даної таблиці, можливо зробити висновок, що можливість технологічної реалізації заданого проекту значно висока, адже всі необхідні технології присутні для реалізації поставлених цілей, але через недосконале знання геометрії та напружено-деформованого стану виробів є можливість обмеження в їх реалізації. Тому для того, щоб реалізувати подібний проект необхідно залучати спеціалістів, які є професіоналами в цій сфері.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Наступним етапом буде визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє планувати напрями розвитку проекту з урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.5) [37].

Таблиця 5.5 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту [37]

| <i>№</i> | <i>Показники стану ринку (найменування)</i> | <i>Характеристика</i> |
|----------|--|-----------------------------------|
| 1. | Кількість головних гравців, од | 3 |
| 2. | Загальний обсяг продаж, грн/ум.од | 61012 |
| 3. | Динаміка ринку (якісна оцінка) | Зростає |
| 4. | Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень) | Конкуренція серед зарубіжних фірм |
| 5. | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації | Відсутність вимог |
| 6. | Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), % | 54,1% |

Проаналізувавши результати проведеного оцінювання, можна зробити висновок, що ринок має зростаючу динаміку та хороший попит на запропонований нами продукт. Отже, ринок є привабливим для входження.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.6) [37].

Таблиця 5.6 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту [37]

| <i>№</i> | <i>Потреба, що формує ринок</i> | <i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i> | <i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i> | <i>Вимоги споживачів до товару</i> |
|----------|---------------------------------|---|--|---|
| 1. | Системи моделювання | Авіа-, приладо- та машинобудівні підприємства | - ціна продукту; - обслуговування | - можливість доповнення та редагування; |
| 2. | Швидкість та ефективність | Авіа-, приладо- та машинобудівні підприємства | - швидкість обробки інформації; - ефективність обробки інформації | <i>до продукції:</i> - простота експлуатації; - можливість редагування; <i>до компанії постачальника:</i> - оперативність налаштування |

Отже потенційною групою клієнтів продукту мають стати підприємства авіа-, приладо- та машинобудівного спрямування.

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (таблиці 5.7-5.8). Фактори в таблиці подавати в порядку зменшення значущості [37].

Таблиця 5.7 – Фактори загроз [37]

| <i>№</i> | <i>Фактор</i> | <i>Зміст загрози</i> | <i>Можлива реакція компанії</i> |
|----------|---------------|---|--|
| 1. | Конкуренція | Популярний асортимент продукції конкурентів | Доведення на практиці, що технологія буде економічно вигідною, ніж у конкурентів |
| 2. | Старіння | Поява модернізованої продукції | Огляд трендів, постійне вдосконалення згідно з вимогами ринку |
| 3. | Постачання | Проблема з фірмами постачальниками | Політика розповсюдження продукту |
| 4. | Технічний | Нерозуміння методики | Спрощення алгоритмів методики |
| 5. | Обладнання | Програмне забезпечення, що не підтримується | Використання нового наявного інформаційного та програмного забезпечення |

Було приведено визначення факторів можливостей загроз, які перешкоджають вийти на ринок даному проекту, а також реакцію на ці фактори, щоб мінімізувати їх вплив [37].

Таблиця 5.8 – Фактори можливостей [37]

| <i>№</i> | <i>Фактор</i> | <i>Зміст загрози</i> | <i>Можлива реакція компанії</i> |
|----------|------------------------|--|--|
| 1. | Економічні | Підтримка інновацій у виробництві. | Зменшення та збільшення на продукт цінової категорії; |
| 2. | Науково-технічні | Зміна технології товару | Впровадження технології, що призводить до зміни вартості товару |
| 3. | Корисність | Може бути важливим доповненням на певних підприємствах | Пропонування системи на підприємства, які зацікавлені в оновленні проектування |
| 4. | Удосконалення продукту | Потреба вчасне вдосконалення продукту | Модернізація продукту, розробка нових ідей |
| 5. | Економічні | Підтримка інновацій | Пониження ціни |

Було визначено фактори можливостей, які сприяють впровадженню на ринок нашому проекту та визначено користь яку компанія може отримати від реакції на той чи інший фактор.

Наступним етапом будемо проводити аналіз пропозиції, які будуть визначати основні риси конкуренції в різних галузях виробництва (табл. 5.9) [37].

Таблиця 5.9 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку [37]

| <i>Особливості конкурентного середовища</i> | <i>В чому проявляється дана характеристика</i> | <i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i> |
|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 |
| 1. Тип конкуренції - олігополія | Характеризується невеликою кількістю фірм (від 2 до 10), які перешкоджають з'явленню нових фірм, мають контроль над цінами, але при змові з іншими конкурентами. Головною рисою є те, що кожна з фірмолігополістів має тісний взаємозв'язок одна з одною. | Пропонувати системи на підприємства, в яких цікавляться в оновленні, проводити оновлення системи. |
| 2. За рівнем конкурентної боротьби - національний | Гонка фірм на міжнародному рівні | Приведення математичних розрахунків про збільшення надійності і стійкості, і вказання різниці в часі обробки |
| 3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева | Задоволення потреб у виготовленні продукції | Відмінності товару в якості та ціні |

Закінчення таблиці 5.9

| 1 | 2 | 3 |
|---|--|--|
| 4. Конкуренція за видами товарів:- товарно-видова | Різна кількість товарів для задоволення особливих потреб | Розробка нових технологій |
| 5. За характером конкурентних переваг - нецінова | Проводиться головним чином за допомогою вдосконалення якості продукції, технології виробництва, інновацій та нанотехнологій, патентування і брендування і умов її продажу, «сервізації» збуту. | Використовувати декілька систем моделювання для порівняння результатів |
| 6. За інтенсивністю - не марочна | Торгова марка дуже незначна, але може бути присутньою на ринку | Створити бренд, який буде легко впадати у пам'ять |

Проаналізувавши таблицю визначили ринок збуту виробів та було визначено загальні риси конкуренції на ньому.

Надалі проводимо аналіз умов конкуренції в виробництві (табл. 5.10) [37].

Таблиця 5.10 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером [37]

| <i>Складові аналізу</i> | <i>Прямі конкуренти в галузі</i> | <i>Потенційні конкуренти</i> | <i>Постачальники</i> | <i>Клієнти</i> | <i>Товари-замінники</i> |
|-------------------------|---|--|---|---|-------------------------------------|
| | Autodesk, Altair | Широкий вибір товарів | Кількість поставок | Машинобудівні, приладобудівні підприємства | Ціна, марки конкурентів |
| Висновки: | Інтенсивність конкурентної боротьби з боку прямих конкурентів є значною | Існує можливість входження на ринок використовуючи нову технологію | Залежність якості продукції, обсягів від постачальників | Клієнти диктують умови роботи на ринку: - відповідне наповнення бібліотек; - вrostота інтерфейсу та роботи з системою | Велика кількість товарів-замінників |

Отже, результатом аналізу конкуренції в галузі виробництва визначено, що основними є постачальники зі споживачами. Адже найбільшого поширення набуває зростання конкуренції між конкурентами які вже існують на ринку.

Після виконання всіх попередніх аналізів, можливо визначити перелік факторів можливої конкурентоспроможності (табл. 5.11), адже проект ще не впроваджено, тому на даний момент є можливість дати лише попередню оцінку [37].

Таблиця 5.11 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Фактор конкурентоспроможності</i> | <i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i> |
|--------------|--------------------------------------|---|
| 1. | Новизна | Нова технологія дозволяє продукту стати єдиним в конкуренції на ринку |
| 2. | Надійність | Більша надійність продукту |
| 3. | Якість | Висока якість, оскільки рекомендації підтверджені експериментально |
| 4. | Довговічність | Більша довговічність продукту |
| 5. | Ціновий | Опрацювання відгуків клієнтів, вдосконалення відповідно до їх пропозицій та за можливості зниження ціни на продукт. |

В табл. 5.11 в основу якого увійшов аналіз проведений в табл. 5.10 визначали та обґрунтували фактори конкурентоспроможності нашого проекту [38].

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін нашого проекту наведений в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Фактор конкурентоспроможності</i> | <i>Бали 1-20</i> | <i>Рейтинг порівняння товарів конкурентів</i> | | | | | | |
|--------------|--------------------------------------|------------------|---|----|----|---|----|----|----|
| | | | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1. | Новизна | 20 | | | | | | | + |
| 2. | Надійність | 16 | | | | | | + | |
| 3. | Якість | 18 | | | | | | + | |
| 4. | Довговічність | 15 | | | | + | | | |
| 5. | Ціновий | 17 | | | | | | + | |

В результаті порівняльний аналіз з табл. 5.12 продемонстрував сильні і слабкі сторони і дав зрозуміти, що новизна та якість за подібну ціну на продукт, може дати перевагу над іншими продуктами. Отже, робимо висновок, що проект спроможний конкурувати на ринку [37].

SWOT- аналіз стартап-проекту наведений в таблиці 5.13.

Таблиця 5.13 – SWOT- аналіз стартап-проекту [37]

| <i>Сильні сторони:</i> | <i>Слабкі сторони:</i> |
|--|--|
| 1 | 2 |
| <ul style="list-style-type: none"> - необмежений час роботи програмного продукту; - висота якість продукту; - невисока ціна (нижча ніж у конкурентів) | <ul style="list-style-type: none"> - відсутність патенту на продукт; - невелика популярність |

Закінчення таблиці 5.13

| 1 | 2 |
|--|--|
| Можливості: | Загрози: |
| <ul style="list-style-type: none"> - корисність для клієнта; - інноваційне виробництво; - попит та його збільшення; - зміна технології виготовлення товару | <ul style="list-style-type: none"> - широкий спектр продукції конкурентів - нерозуміння методики - не бажання споживачів переходити на запропоновану технологію |

В табл. 5.13 приведено перелік домінуючих та слабких сторін проекту. А також приведено перелік загроз та можливостей на ринку, які складені на основі факторів загроз і факторів можливостей, які склали в попередніх таблицях. Отже, загрози та можливості на ринку, ще нереалізовані та можуть мати певну ймовірність здійснення.

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.14) [37].

Таблиця 5.14 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту [37]

| № з/п | Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки | Ймовірність отримання ресурсів | Строки реалізації |
|-------|---|--------------------------------|-------------------|
| 1. | Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу | 87 % | 1,4 року |
| 2. | Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями | 71 % | 1 рік |

В результаті, було проведено аналіз аналогів ринкового впровадження і з даних можливостей потрібно обрати доступну і найшвидшу в реалізації. Отже, потрібно обрати стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу наявними ринковими можливостями.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.15) [37].

Таблиця 5.15 – Вибір цільових груп потенційних споживачів [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i> | <i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i> | <i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i> | <i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i> | <i>Простота входу у сегмент</i> |
|--|---|--|--|---|---------------------------------|
| 1. | Промислові | Готові | Високий попит | Середня | Середня |
| 2. | Державні | | | Середня | Середня |
| 3. | Приватні | | | Висока | Складна |
| Прийнято рішення, що компанія буде працювати із промисловими та державними компаніями, виходячи з аналізу потенційних груп споживачів. | | | | | |

За результатами аналізу потенційних груп споживачів обрані цільові групи, для яких будемо пропонувати моделювання геометричної моделі деталей методами генеративного дизайну.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку (табл. 5.16) [37].

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії розвитку [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i> | <i>Стратегія охоплення ринку</i> | <i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i> | <i>Базова стратегія розвитку</i> |
|--------------|---|--|---|----------------------------------|
| 1. | Забезпечення покращення сильних сторін | Диференціація маркетингового дослідження | Ціна нижча ніж у конкурентів. Підтримка клієнтів | Диференціації |

Базовою стратегією розвитку було обрано стратегію диференціації, адже вона передбачає роль зробити товар важливим зі сторони споживача властивостей, які можуть зробити товар відмінним від конкурентів.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.17) [37].

Таблиця 5.17 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i> | <i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i> | <i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i> | <i>Стратегія конкурентної поведінки</i> |
|--------------|---|---|--|---|
| 1. | Проект не є «першопрохідцем» | Компанія буде забирати існуючих у конкурентів | Не буде копіювати основні характеристики товару конкурента | Стратегія заняття конкурентної ніші |

Базовою стратегією для конкурентної поведінки обрана стратегія зайняття конкурентної ніші. В результаті цього компанія, як основний ринок обирає один або декілька ринкових сегментів невеликого розміру. Отже, основним завданням компанії буде підтримка і розвиток

конкурентної переваги, підтримка вхідних бар'єрів, утворювати лояльність та прихильність споживачів.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляється стратегія позиціонування (табл. 5.18) [37], що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торговельну марку/проект.

Таблиця 5.18 – Визначення стратегії позиціонування [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i> | <i>Базова стратегія розвитку</i> | <i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап проекту</i> | <i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i> |
|--------------|--|----------------------------------|---|--|
| 1. | Вдосконалення продукту | Диференціальна | Прихильність споживачів, за вдяки невисокої ціни | <ul style="list-style-type: none"> - Ціна - Простота - Технічна підтримка |

Отже, в результаті компанія обрала для себе стратегією розвитку – диференціацію, і цільовими групами обрано державні та приватні підприємства, хоч вони і мають постачальників, але за рахунок нашої нової технології, в компанії буде змога переманювати клієнтів у конкурентів та здійснити прогрес своєї конкурентоспроможної переваги.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для розробки маркетингової програми стартап-проекту першим етапом буде формування маркетингової концепції товару, який отримує споживач. Для цього у табл. 5.19 [37] потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.19 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Потреба</i> | <i>Вигода, яку пропонує товар</i> | <i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i> |
|--------------|---|---|--|
| 1. | Потреба в програмному забезпеченні для спрощення і прискорення розрахунків напруження та деформації в виробів | Розрахунок напружень в виробі за допомогою комп'ютера для зменшення похибок і прискорення отримання результатів | Покращення та пришвидшення роботи алгоритму. Покращення програми за допомогою нових можливостей. Оновлення програмного продукту. |

В результаті, проаналізувавши ключові переваги товару та диференційовану стратегію, стало можливим надати товару важливі для

споживача властивості за тією ж ціною, що і у конкурентів. Отже, ми маємо змогу розробити маркетингову програму стартап-проекту [37].

Була розроблена трирівнева маркетингова модель товару в якій: уточняється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 5.20).

Таблиця 5.20 – Опис трьох рівнів моделі товару [37]

| <i>Рівні товару</i> | <i>Сутність та складові</i> | | |
|---|--|--------------------|------------------------------|
| <i>I. Товар за задумом</i> | Програмне забезпечення для оптимізації геометрії виробу методами генеративного дизайну. Можна виділити наступні результати: - робота інженера-технолога спрощена; - швидкість процесу виробництва збільшено | | |
| <i>II. Товар у реальному виконанні</i> | <i>Властивості/характеристики</i> | <i>М/Нм</i> | <i>Вр/Тх /Тл/Е/Ор</i> |
| | 1. Довговічність | Нм | Тх |
| | 2. Економічні | Нм | Вр |
| | 3. Призначення | Нм | Тх |
| | 4. Надійність | М | Тл |
| | 5. Технологічні | М | Тх |
| | Якість: відповідає стандартам продукції | | |
| | Пакування: відсутнє | | |
| | Марка: найменування організації | | |
| <i>III. Товар із підкріпленням</i> | До продажу: доставка, налаштування | | |
| | Після продажу: обслуговування | | |
| Потенційний товар буде захищено від копіювання завдяки патенту на винахід | | | |

Визначимо обсяг загальних початкових витрат, необхідних для реалізації проекту (витрат, що мають бути понесені до початку основної діяльності в 0-й рік реалізації проекту) за формою, наведеною в табл. 5.21 [37].

Таблиця 5.21 – Загальні початкові витрати проекту [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Стаття витрат</i> | <i>Обсяги витрат в 0-й рік, тис. грн.</i> |
|--------------|--|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 1. | Проведення НДДКР | 8 |
| 2. | Розробка проектних матеріалів і ТЕО | 11 |
| 3. | Робоче проектування і прив'язка проекту | 3 |
| 4. | Витрати на придбання й оренду земельних ділянок, будівель, приміщень, споруд | 65 |
| 5. | Витрати на придбання обладнання та устаткування та пристроїв | 132 |
| 6. | Витрати на приймально-здавальні випробування | 10 |
| 7. | Витрати на пусконаладжувальні роботи | 10 |
| 8. | Комплексне освоєння проектних потужностей | 7 |
| 9. | Витрати на придбання нематеріальних активів | 11 |
| 10. | Одноразові виплати, зокрема гарантуючим і страховим організаціям | 52 |
| 11. | Витрати на створення оборотного капіталу, необхідного для початку операційної діяльності (створення виробничих запасів, передоплата сировини, матеріалів і комплектуючих виробів, які мають бути поставлені на початку операційної діяльності) | 80 |

Закінчення таблиці 5.21

| 1 | 2 | 3 |
|--------------|---|------------|
| 12. | Податкові платежі (земельний, комунальний та інші), здійснені до початку операційної діяльності | 50 |
| 13. | Оплата юридичних послуг | 40 |
| 14. | Витрати на передвиробничі маркетингові дослідження і створення збутової мережі | 10 |
| 15. | Витрати, пов'язані з діяльністю персоналу | 300 |
| Разом | | 789 |

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар, яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 5.22) [37]. Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 5.22 – Визначення меж встановлення ціни [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Рівень цін на товари-замінники</i> | <i>Рівень цін на товари-аналоги</i> | <i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i> | <i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i> |
|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 1. | 1200 грн. | 6300 грн. | Вище-середнього | 900- 5500 грн. |

В результаті, в таблиці було проаналізовано ринкові ціни на товари замінники та аналоги, а також високо-середній рівень доходів споживачів. Отже, завдяки отриманим даним буде встановлена нижня та верхня межа ціни на продукт. Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.23) [37]:

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 5.23 – Формування системи збуту [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i> | <i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i> | <i>Глибина каналу збуту</i> | <i>Оптимальна система збуту</i> |
|--------------|--|--|-----------------------------|---|
| 1. | Звичайна купівля, передбаченням якої є придбання товарів | Доставка товару та подальше налаштування | Нульовий рівень | Безпосередній продаж товару клієнту виробником. |

Спираючись на специфіку поведінки основних клієнтів було прийнято рішення продавати товар клієнту виробником, через продажу в магазинах. Вибрали канал нульового рівня, адже компанія прагне до близьких контактів із споживачами.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.24) [37].

Таблиця 5.24 – Концепція маркетингових комунікацій [37]

| <i>№ з/п</i> | <i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i> | <i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i> | <i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i> | <i>Завдання рекламного повідомлення</i> | <i>Концепція рекламного звернення</i> |
|--------------|--|---|---|---|---------------------------------------|
| 1. | Аналіз інформації на відомих ресурсах | Інтернет ресурси, виставки | Поступове прийняття рішень. | Інформаційний пошук нових товарів | Генеративний дизайн – це майбутнє |

Результатом цього є привернення уваги до каналів зв'язку, а саме інтернет-ресурси і виставки в галузі приладобудування та спеціалізація уваги до концепції рекламної привабливості з точки зору часу і простоти використання. І особливо важливим є інформаційне завдання про вихід нових товарів на ринок.

Висновки до розділу 5

Підводячи підсумки аналізу стартап-проекту, можна зробити висновок, що пропонуване моделювання геометричної моделі деталей, яке реалізується шляхом використання методів генеративного дизайну зменшує вагу виробу та зберігає напружено-деформований стан.

Виконано зіставлення показників плану з суперниками, визначено список сильних, слабких і нейтральних характеристик продукту. Пізнали, що продукт не захищений від копіювання за рахунок відсутності патенту. Втім плюсом вважається моделювання фізико-механічних властивостей виробів.

Проаналізовано, що реалізація буде успішною, а саме ідея розробки рекомендацій для вдосконалення конструкції деталей приладів та забезпечення їх експлуатаційних характеристик, що приведе до найкращих результатів.

Виявлено фактори загроз і можливостей, основними з яких є відсутність споживацтва на продуктах, які сприяють реалізації на ринку проекту, і вигоди, які компанія може згодом отримати від реакції споживачів.

Персональна система продажів була обрана, коли виробник продає товари безпосередньо покупцеві через торгівлю в магазинах.

Визначено стратегію придбання ринку, зокрема диференціація, і прийнята основна стратегія конкурентної поведінки.

Таким чином, доцільно продовжити роботу щодо виходу на ринок через сильні сторони продукту і існуючий ринковий попит.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних джерел, що дозволив:
 - проаналізувати основні напрямки використання генеративних технологій;
 - визначити основні поняття генеративного дизайну, топологічної оптимізації та адитивних технологій, принципи 3D друку;
 - проаналізувати алгоритм та основні етапи генеративного дизайну;
 - визначити основні CAD системи, що включають модулі генеративного дизайну, та дослідити їх можливості.
2. Виконано моделювання вдосконаленої конструкції деталі за допомогою САПР ANSYS, Ispire, Solid Edge, результати якого дозволили визначити в якості системи для подальшого проектування Solid Edge.
3. Для отриманих в результаті генеративного дизайну геометричних моделей деталей виконано їх скінчено-елементний аналіз при прикладанні експлуатаційних навантажень, що дозволило перевірити прийнятність отриманих рішень на етапі генеративного дизайну. Так, для деталі «Коромисло» отримано 3 варіанти геометричної моделі, для кожної з яких виконували аналіз напружено-деформованого стану та обрали найкращий результат, який в подальшому було доопрацьовано для можливості виробництва даної деталі класичними методами. При цьому маса деталі була зменшена на 40 %.
4. Виготовлено прототипи змодельованих деталей на лабораторному дельтавидному 3D принтері, що дозволило представити отримані рішення генеративного дизайну у вигляді наочних зразків.
5. Розроблено методику вдосконалення конструкції деталей в приладобудуванні та машинобудуванні, а також рекомендації для її використання в програмному середовищі Solid Edge ST10, які дозволяють зменшити масу деталей при збереженні експлуатаційних властивостей.
6. Проведено аналіз ринкових можливостей для запуску стартап-проекту, що дозволило розробити стартап-проект та проаналізувати ринкову стратегію та маркетингову програму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.Н. Канягин. Промышленный дизайн Российской Федерации: возможность преодоления дизайн-барьера. — Издательство Политехнического университета, 2012. — С. 37.
2. Метелик Т.С. Генеративный метод проектирования и способы его реализации в графическом дизайне // Бизнес и дизайн ревю : журнал. — 2017. — Т. 1, № 2(6). — С. 11.
3. Алгоритмический дизайн [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://jvetrau.com/algorithmic-design/>
4. Сервисы на нейросетях в помощь дизайнеру [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.cossa.ru/trends/169754/>
5. Адитивні технології [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B4%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97>
6. ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.hisour.com/ru/topology-optimization-40760/>
7. Порождающее проектирование порождает новую эру высокоэффективных продуктов [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19337
8. Как устроено творчество машин: примеры применения генеративного дизайна [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://ukit.ai/blog_ru/kak_ustroeno_tvorchestvo_mashin_primery_primeneniya_generativnogo_dizajna/2018-03-06-23
9. Nasa tests 3D-printed rocket engine fuel injector Nasa tests 3D-printed rocket engine fuel injector [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.bbc.com/news/technology-23313921>
10. Plans to 3D print space rocket parts! [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.bbc.co.uk/newsround/24543004>
11. США першими у світі запустили ракету нового класу (відео) [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.unian.ua/science/2360038-ssha-pershimi-u-sviti-zapustili-raketu-novogo-klasu-video.html>
12. Программы для 3D-принтера [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://3dpt.ru/page/soft#Repetier>
13. 3D-принтеры на военной службе [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/overview-3d-printers-in-the-military/>
14. Марк Цукерберг заступился за искусственный интеллект [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://expert.ru/2017/07/27/za-iskusstvennyj-intellekt-zastupilis/>
15. The Living and Autodesk Apply Bionic Design to an Airbus 320 Partition [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:

https://www.architectmagazine.com/technology/the-living-and-autodesk-apply-bionic-design-to-an-airbus-320-partition_o

16. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ И ВИДЫ 3D ПЕЧАТИ [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.2d-3d.ru/opisanie-programm/1536-osnovnye-metody-3d-pechati.html>

17. 3-d принтер (конструкции, виды, производители) [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://mplast.by/encyklopedia/3d-printer/>

18. Краткий экскурс в методы 3D-печати [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/post/136340/>

19. 3D-печать с нуля (Дмитрий Горьков), 2015 г.

20. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ 3D-ПРИНТЕРА: PLA И ABS-ПЛАСТИК, А ТАКЖЕ ПВА-ПЛАСТИК И НЕЙЛОН [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://koloro.ua/blog/3d-tekhnologii/materialy-dlya-3d-printera-pla-i-abs-plastik-a-takzhe-pva-plastik-i-nejlon.html>

21. 25 самых популярных материалов для 3D печати [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://3dprintstory.org/25-samih-populyarnih-materialov-dlya-3d-pechati>

22. Третяк О. В. Практика використання ПВП-клею при 3D-друку деталей з PLA-пластику / О. В. Третяк, К. С. Барандич // XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 15-16 травня 2019 р., м. Київ, Україна : збірник праць / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 204–206. – Бібліогр.: 4 назви.

23. ГЕНЕРАТИВНЫЙ ДИЗАЙН: ПРОГРАММИРОВАНИЕ, КАК НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ДИЗАЙНЕРА [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://scienceforum.ru/2015/article/2015013127>

24. Reas, Casey; Fry, Ben & Maeda, John (September 30, 2007), «Processing: A Programming Handbook for Visual Designers and Artists» (1st ed.), The MIT Press, сс. 736, ISBN 0-262-18262-9

25. Дизайн: от создания вещей к проектированию будущего [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://design-thinker.livejournal.com/52932.html>

26. Генеративный дизайн: на пороге новой эпохи проектирования [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/company/nanosoft/blog/345500/>

27. Технология 3D-печати в промышленности [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:

<https://www.tehnohacker.ru/tehnologii/tehnologiya-3d-pechati-v-promyshlennosti/>

28. Всё о 3D-печати. Аддитивное производство. Основные понятия. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://3dtoday.ru/wiki/3D_print_technology/#.D0.9F.D1.80.D0.B8.D0.BC.D0.B5.D0.BD.D0.B5.D0.BD.D0.B8.D0.B56

29. 3D-печать в промышленности [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://robo-hunter.com/news/3d-pechat-v-promishlennosti>
30. Интегрированные генеративные технологии /А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л.Доброскок [и др.] : под ред. А.И. Грабченко. – Харьков : НТУУ «ХПИ». 2011. – 396 с.
31. Топологическая оптимизация геометрии изделия как путь повышения прибыльности предприятия [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://blog.iqb.ru/geometry-topology-optimization>
32. Барандич К. С., Вислоух С. П. Створення кінцево-елементної моделі валу та вирішення крайової задачі напружено-деформованого стану //Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Сер.: Галузеве машинобудування, будівництво. – 2014. – №. 2. – С. 228-232.
33. Барандич К. С. Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей при їх токарному обробленні : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 – технологія машинобудування / Барандич Катерина Сергіївна. – Київ, 2018. – 204 с.
34. 3D-печать для "чайников" или "что такое 3D-принтер?" [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://3dtoday.ru/wiki/3dprint_basics/#.D0.A2.D0.B5.D1.80.D0.BC.D0.B8.D0.BD.203D-.D0.BF.D0.B5.D1.87.D0.B0.D1.82.D1.8C1
35. Программы для 3D-принтера [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://3dpt.ru/page/soft#Repetier>
36. Repetier Host CuraEngine [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://robot-on.ru/articles/repetier-host-curaengine>
37. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
38. Імітаційне моделювання елементу [Електронний ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://kafpson.kpi.ua/diplom/mag/2018/ohota.pdf>
39. Антонюк В.С. Методологія наукових досліджень: [навч. посіб.] / В. С. Антонюк, Л. Г. Полонський, В. І. Аверченков, Ю. А. Малахов. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 276 с.
40. Новаковский А.Г., Антонюк В.С. Анализ современных технологических подходов к аддитивному производству // Республиканский межотраслевой производственно практический журнал. - Минск - №3(72) - 2016. - С. 11-12.
41. Barandych K. S., Vysloukh S. P., Antonyuk V. S. Ensuring Fatigue Life of Parts During Finish Turning with Cubic Boron Nitride Tools //Journal of Superhard Materials. – 2018. – Т. 40. – №. 3. – С. 206-215.

ДОДАТКИ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор
ТОВ «Прогрестех-Україна»
Фіалковський А.Р.
2019 р.

АКТ

Виробничої апробації результатів магістерської дисертаційної роботи
Іванова Дмитра Євгенійовича
«Моделювання геометричної моделі деталі методами генеративного дизайну»

Дійсний акт констатує, що в умовах ТОВ «Прогрестех-Україна» співробітниками підприємства – заступником директора, к.т.н., доцентом Гладським М.М., а також представниками Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» – к.т.н., доцентом Барандич К.С. і студентом кафедри виробництва приладів Івановом Д.Є. проведено апробацію методики моделювання геометричної моделі деталі методами генеративного дизайну.

В якості об'єкта досліджень вибрано деталь «Коромисло», що виготовлена із конструкційної сталі 40Х ДСТУ 7806:2015, яка працює у важких умовах знакозмінних навантажень.

Отримано оптимальну геометричну модель деталі «Коромисло» методами генеративного дизайну, завдяки якій зменшено масу початкового виробу та збережено експлуатаційні властивості.

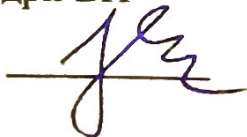
Проведені роботи показали результативність використання методики моделювання геометричної моделі деталей методами генеративного дизайну, яка запропонована в магістерській дисертаційній роботі Іванова Д.Є. на здобуття ступеня магістра.

Від КПІ ім. Ігоря Сікорського:
к.т.н., доцент кафедри ВП



Барандич К.С.

студент кафедри ВП



Іванов Д.Є.

Від ТОВ «Прогрестех-Україна»:
заступник директора, к.т.н., доцент



Гладський М.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Декан приладобудівного факультету
Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Тимчик Г.С.
« 12 » грудня 2019 р.

АКТ

впровадження результатів магістерської дисертації
Іванова Дмитра Євгенійовича
«Моделювання геометричної моделі деталі методами генеративного дизайну»

Ми, ті що нижче підписалися, заступник декана приладобудівного факультету з навчально-методичної роботи к.т.н., доцент Філіппова М.В., виконуючий обов'язки завідувача кафедри виробництва приладів, д. т. н., професор Антонюк В.С., старший викладач кафедри виробництва приладів, д. т. н., професор Антонюк В.С., старший викладач Матвієнко С.М., склали акт про те, що результати магістерської дисертаційної роботи «Моделювання геометричної моделі деталі методами генеративного дизайну» на здобуття ступеня магістра кафедри виробництва приладів КПІ ім. Ігоря Сікорського Іванова Дмитра Євгенійовича використовуються у навчальному процесі кафедри виробництва приладів КПІ ім. Ігоря Сікорського.

В магістерській дисертаційній роботі розроблено структурну схему класифікації сфер застосування генеративного дизайну. Проаналізовано основні типи та принципи роботи 3D-принтерів та використовувані матеріали. Опрацьовано алгоритм та основні етапи генеративного дизайну, що дозволило дослідити та визначити основні САД системи, які включають модулі генеративного дизайну.

Виконано моделювання удосконаленої конструкції деталі за допомогою методів генеративного дизайну. Завдяки комп'ютерному моделюванню напружень в матеріалі досліджуваної деталі методом скінченних елементів, зроблено висновки про придатність отриманих рішень.

В результаті дослідження розроблено методику моделювання удосконаленої конструкції деталей методами генеративного дизайну та наведено приклади її використання. Створена методика використовується в навчальному процесі приладобудівного факультету на кафедрі виробництва приладів при проведенні комп'ютерних практикумів з дисципліни «Системи автоматизованого проектування».

Заступник декана приладобудівного факультету з навчально-методичної роботи, к. т. н., доцент

Філіппова М.В.

Виконуючий обов'язки завідувача кафедри виробництва приладів, д. т. н., професор
Старший викладач кафедри виробництва приладів, к. т. н., старший викладач

Антонюк В.С.

Матвієнко С.М.

СПИСОК



наукових та навчально-методичних праць

Іванова Дмитра Євгенійовича

| № п.п. | Назва (мовою оригіналу) | Вихідні дані | Обсяг друк. стор. | Співавтори |
|--------|--|---|-------------------------|----------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Генеративний дизайн та адитивні технології | Іванов Д.Є. Генеративний дизайн та адитивні технології / Д.Є. Іванов, К.С. Барандич // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 04 – 07 червня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – с. 41-42. | 2 | Барандич К.С. |
| 2 | Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей типу «Вал» при максимальній продуктивності їх виготовлення | Барандич К.С. Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей типу «Вал» при максимальній продуктивності їх виготовлення / К.С.Барандич, М.М. Гладський, Д.Є.Іванов// Aktualne problemy nowoczesnych nauk. - 2019. - Volume 11. - pp.91-94. | 4 | Барандич К.С., Гладський М.М. |
| 3 | Моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну | Барандич К.С., Іванов Д.Є. Моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну // Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 року. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2019. – с. 51-54 | 4 | Барандич К.С. |
| 4 | Моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну | Барандич К.С., Іванов Д.Є. Гладський М.М. Моделювання удосконаленої конструкції виробу з використанням алгоритмів генеративного дизайну // Збірник праць XV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ». 10-11 грудня 2019 року, – К: ПФФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Центр учбової літератури – 2019. – с. 129-132 | 4 | Барандич К.С., Гладський М.М. |

Автор

Науковий керівник


 (підпис)

 (підпис)

Іванов Д.Є.

Барандич К.С.