

МІНІСТЕРСТВО ФІНАНСІВ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ПОДАТКОВИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ФІНАНСІВ ТА ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І  
СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

3D-МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ШВИДКОГО ПРОТОТИПУВАННЯ  
СКЛАДНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ВИРОБІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ

Здобувача вищої освіти першого (бакалаврського) рівня,  
IV курсу, групи ІДБ-20-1, спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»,  
освітня програма «Технології цифрового дизайну»



(підпис)

Потапенка Дмитрія  
Сергійовича  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник



(підпис)

Омельчук Антон  
Анатолійович к.т.н.  
(прізвище, ім'я, по батькові,  
науковий ступінь, вчене звання)

Керівник освітньо-  
професійної програми



(підпис)

Ратушняк Тетяна  
Володимирівна, к.ф.-м.н.,  
доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий  
ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту за рішенням кафедри комп'ютерних та інформаційних  
технологій і систем протокол від «22» травня 2024 № 15

Завідувач кафедри



(підпис)

Філоненко Михайло  
Миколайович, к.ф.-м.н.,  
доцент  
(прізвище, ім'я по батькові,  
науковий ступінь, вчене звання)

Реєстрація № 52

31.05.2024

(дата)



(підпис відповідальної особи)

Результати перевірки

до захисту

(до захисту, на доопрацювання)

22.05.2024

(дата)



(підпис)

Результат захисту

5 (відмінно)

(оцінка)

12.06.2024

(дата)



(підпис)

Голова комісії:



(підпис)

В.М. Франчук

Члени комісії:



(підпис)

М.М. Філоненко



(підпис)

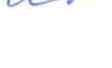
С.М. Грищенко



(підпис)

В.О. Ніжегородцев

### БЛАНК ОЦІНЮВАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

| Об'єкти контролю                                                                                                                                                               | Діапазон оцінки в балах | Фактична кількість балів | Примітки | Дата, П.І.Б.: керівника, голови комісії членів комісії, секретаря, (підписи)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОЦІНЮВАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ КОМІСІЄЮ ПО ЗАХИСТУ                                                                                                                          |                         |                          |          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 1. Зміст випускної роботи (якість теоретичного матеріалу, його зв'язок з практичним, вміння представляти матеріал в логічній послідовності, наявність висновків та пропозицій) | від 0 до 30             | 29                       |          | <div>12.06.2024</div> <div>Франчук В.М. </div> <div>Філоненко М.М. </div> <div>Грищенко С.М. </div> <div>Ніжегородцев В.О. </div> <div>Суховерховська Л.П. </div> |
| 2. Дотримання вимог щодо оформлення                                                                                                                                            | від 0 до 10             | 9                        |          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 3. Вчасне виконання роботи на всіх етапах у встановлені кафедрою терміни                                                                                                       | від 0 до 5              | 5                        |          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 4. Рецензент                                                                                                                                                                   | від 0 до 5              | 4                        |          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| РАЗОМ БАЛІВ                                                                                                                                                                    | від 0 до 50             | 47                       |          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

Оцінювання кваліфікаційної роботи науковим керівником - 43 балів.

### ПЕРЕВЕДЕННЯ ОЦІНКИ ЗА 100-БАЛЬНОЮ ШКАЛОЮ ДО НАЦІОНАЛЬНОЇ ШКАЛИ ТА ШКАЛИ ЄКТС

| Оцінка за 100-бальною шкалою | Оцінка за шкалою ЄКТС | Оцінка за національною шкалою | Дата       | П.І.Б.: голови, членів комісії, секретаря, (підпис)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 90                           | A                     | 5 (відмінно)                  | 12.06.2024 | <div>Франчук В.М. </div> <div>Філоненко М.М. </div> <div>Грищенко С.М. </div> <div>Ніжегородцев В.О. </div> <div>Суховерховська Л.П. </div> |

### ПРАВИЛА ПЕРЕВЕДЕННЯ ОЦІНОК ДО НАЦІОНАЛЬНОЇ ШКАЛИ ТА ШКАЛИ ЄКТС

| Оцінка за 100-бальною шкалою | Оцінка за шкалою ЄКТС | Оцінка за національною шкалою |
|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| 90-100                       | A                     | 5 (відмінно)                  |
| 80-89                        | B                     | 4 (добре)                     |
| 70-79                        | C                     |                               |
| 60-69                        | D                     |                               |
| 50-59                        | E                     | 3 (задовільно)                |
| 35-49                        | FX                    | 2 (незадовільно)              |

Факультет фінансів та цифрових технологій  
Кафедра комп'ютерних та інформаційних технологій і систем  
Галузь знань: 12 «Інформаційні технології»  
Спеціальність: 122 «Комп'ютерні науки»  
Освітня програма: «Технології цифрового дизайну»

Затверджую

Завідувач кафедри  Філоненко М.М.

«23» жовтня 2023

**Завдання на кваліфікаційну роботу  
здобувачу вищої освіти**

Потапенко Дмитрію Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

3D-моделювання для швидкого прототипування складних моделей та виробів у промисловості

Затверджена наказом ректора від «20» жовтня 2023 № 1411

2. Строк здачі закінченої роботи «21» травня 2024

3. Мета роботи дослідити можливості та переваги застосування 3D моделювання для швидкого прототипування у промисловості

Об'єкт дослідження: технології та інструменти 3D моделювання, методи швидкого прототипування та практичне застосування.

Предмет дослідження процес інтеграції 3D-моделювання з методом швидкого прототипування та застосування його на практиці.

Орієнтовна база дослідження: наукові статті, програмне забезпечення для 3D моделювання, практичні кейси та проекти.

Вихідні дані до роботи: властивості матеріалів для 3D-друку, програмне забезпечення для 3D моделювання та процеси швидкого прототипування.

Перелік графічного матеріалу: схеми роботи методів швидкого прототипування, моделі прототипів.

4. Зміст кваліфікаційної роботи (перелік питань за кожним розділом)

Вступ, Розділ 1. Теоретичні основи 3D-моделювання та швидкого прототипування, 1.1. Історія та розвиток 3D-моделювання, 1.2. Основні види прототипування на машинах швидкого прототипування. 1.2.1. Стереолітографія (SLA), 1.2.2. Селективне лазерне запікання (SLS), 1.2.3. Технологія пошарового наплавлення (FDM), 1.3. Матеріали для 3D-друку в промисловості, 1.3.1. ABS-пластик, 1.3.2. PLA-пластик, 1.3.3. PETG-пластик, 1.3.4. Смоли, 1.3.5. Порошкові матеріали, 1.4. Програмні забезпечення для швидкого прототипування, Розділ 2. Методика швидкого прототипування прототипів та виробів, 2.1. Основні помилки та дефекти які можуть відбутися під час процесу швидкого прототипування, 2.2. Приклад помилок та їх вирішення на реальному прототипі, Розділ 3. Реалізація методики швидкого прототипування для цифрових моделей, Висновки.

## 5. Календарний план виконання роботи

| №<br>п/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                                                                                                                                                  | Строк виконання етапів роботи |               |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
|          |                                                                                                                                                                                                      | За планом                     | Фактично      |
| 1        | 2                                                                                                                                                                                                    | 3                             | 4             |
| 1        | Вибір теми, підбір літературних джерел, формування структури кваліфікаційної роботи                                                                                                                  | До 15.10.2023                 | До 15.10.2023 |
| 2        | <b>I розділ</b> (розкрити сутність і стан дослідження наукової проблематики роботи, після чого навести її загальну характеристику; огляд літератури за темою і вибір конкретних напрямів досліджень) | 29.12.2023                    | 29.12.2023    |
| 3        | <b>II розділ</b> (аналіз експериментальної частини про методики досліджень)                                                                                                                          | 16.02.2024                    | 16.02.2024    |
| 4        | <b>III розділ</b> (проведені теоретичні і (або) експериментальні дослідження та проектні рішення)                                                                                                    | 16.04.2024                    | 16.04.2024    |
| 5        | <b>Висновки</b>                                                                                                                                                                                      | 30.04.2024                    | 30.04.2024    |
| 6        | Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень наукового керівника                                                                                                                                     | 10.05.2024                    | 10.05.2024    |
| 7        | Отримання відгуку керівника                                                                                                                                                                          | 30.05.2024                    | 30.05.2024    |
| 8        | Отримання зовнішньої рецензії                                                                                                                                                                        | 03.06.2024                    | 03.06.2024    |

6. Дата видачі завдання «23» жовтня 2023

7. Керівник кваліфікаційної роботи

  
(підпис)

Омельчук А.А.  
(прізвище, ініціали)

8. Керівник освітньо-професійної програми

  
(підпис)

Ратушняк Т.В.  
(прізвище, ініціали)

9. Завдання до виконання отримав  
здобувач вищої освіти

  
(підпис)

Потапенко Д.С.  
(прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

3D-модельовання для швидкого прототипування складних моделей та виробів у промисловості

*Мета роботи* полягає в дослідженні можливостей та переваг застосування 3D модельовання для швидкого прототипування у промисловості.

*Завданням роботи* є практичне застосування 3D модельовання для швидкого прототипування у промисловості та розроблення рекомендації щодо його ефективного використання. Для досягнення цієї мети було проведено огляд сучасних технологій 3D модельовання, аналіз переваг та недоліків різних методів швидкого прототипування, а також розглянуто приклади успішного застосування цих технологій в різних галузях промисловості.

*Предметом дослідження* є процес інтеграції 3D-модельовання з методом швидкого прототипування.

*Об'єктами дослідження* є технології та інструменти 3D модельовання й методи швидкого прототипування.

*Одержані результати* даного дослідження можуть бути корисними як для фахівців, що працюють у галузі промислового дизайну та виробництва, так і для студентів та науковців, які цікавляться сучасними технологіями проектування та прототипування.

*Кваліфікаційна робота* містить 52 сторінки, 20 рисунків, список використаних джерел містить 24 найменування.

*Ключові слова:* 3D-модельовання, швидке прототипування, 3D-друк, прототип.

*Рік виконання кваліфікаційної роботи* 2024

*Рік захисту роботи* 2024

## ABSTRACT

3D modeling for rapid prototyping of complex models and products in industry

*The purpose of the work* is to investigate the possibilities and advantages of using 3D modeling for rapid prototyping in industry.

The task of the work is the practical application of 3D modeling for rapid prototyping in industry and the development of recommendations for its effective use. To achieve this goal, a review of modern 3D modeling technologies, an analysis of the advantages and disadvantages of various rapid prototyping methods, and examples of successful application of these technologies in various industries were considered.

*The subject of the study* is the process of integrating 3D modeling with the method of rapid prototyping.

*The objects of research* are technologies and tools of 3D modeling and methods of rapid prototyping.

*The obtained results of this study* can be useful both for specialists working in the field of industrial design and production, and for students and scientists who are interested in modern design and prototyping technologies.

*The qualification work* contains 52 pages, 20 figures, the list of references contains 24 titles.

**Keywords:** 3D modeling, rapid prototyping, 3D printing, prototype.

*Year of completion of the qualification work* 2024

*Year of work protection* 2024

## ЗМІСТ

|                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВСТУП .....</b>                                                                                        | <b>3</b>  |
| <b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ 3D МОДЕЛЮВАННЯ ТА ШВИДКОГО ПРОТОТИПУВАННЯ .....</b>                        | <b>6</b>  |
| <b>1.1. Історія та розвиток 3D моделювання .....</b>                                                      | <b>6</b>  |
| <b>1.2. Основні види прототипування на машинах швидкого прототипування.....</b>                           | <b>12</b> |
| <b>1.2.1. Стереолітографія (SLA).....</b>                                                                 | <b>13</b> |
| <b>1.2.2. Селективне лазерне запікання (SLS).....</b>                                                     | <b>15</b> |
| <b>1.2.3. Технологія пошарового наплавлення (FDM).....</b>                                                | <b>17</b> |
| <b>1.2.4. Multi Jet Fusion (MJF) .....</b>                                                                | <b>19</b> |
| <b>1.3. Матеріали для 3D друку в промисловості .....</b>                                                  | <b>21</b> |
| <b>1.3.1 ABS-пластик.....</b>                                                                             | <b>22</b> |
| <b>1.3.2. PLA-пластик.....</b>                                                                            | <b>24</b> |
| <b>1.3.3 PETG пластик .....</b>                                                                           | <b>25</b> |
| <b>1.3.4. Смоли .....</b>                                                                                 | <b>26</b> |
| <b>1.3.5.Порошкові матеріали.....</b>                                                                     | <b>27</b> |
| <b>1.4. Програмне забезпечення для швидкого прототипування .....</b>                                      | <b>28</b> |
| <b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ШВИДКОГО ПРОТОТИПУВАННЯ ПРОТОТИПІВ ТА ВИРОБІВ .....</b>                             | <b>30</b> |
| <b>2.1. Основні помилки та дефекти які можуть відбутися під час процесу швидкого прототипування. ....</b> | <b>30</b> |
| <b>2.2.Приклад помилок та їх вирішення на реальному прототипі. ....</b>                                   | <b>33</b> |
| <b>РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ ШВИДКОГО ПРОТОТИПУВАННЯ ДЛЯ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ.....</b>                    | <b>39</b> |
| <b>ВИСНОВКИ .....</b>                                                                                     | <b>45</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>                                                                    | <b>46</b> |

## ВСТУП

У сучасному світі стрімкий розвиток технологій сприяє постійному вдосконаленню методів виробництва та проектування. Однією з найбільш прогресивних технологій, що знаходить широке застосування в різних галузях промисловості, є 3D моделювання. Відтоді як ця технологія з'явилася, вона суттєво змінила підходи до створення та тестування нових продуктів. Зокрема, 3D моделювання стало ключовим інструментом для швидкого прототипування складних моделей та виробів, що дозволяє значно зменшити час та витрати на розробку нових продуктів. 3D моделювання для швидкого прототипування має численні переваги. Це, насамперед, можливість віртуального тестування виробів, виявлення та усунення помилок на ранніх етапах розробки, а також гнучкість у внесенні змін до конструкції. Крім того, використання цієї технології сприяє оптимізації виробничих процесів, підвищенню якості кінцевої продукції та зниженню вартості виробництва.

Основна мета даної кваліфікаційної роботи — дослідити можливості та переваги застосування 3D моделювання для швидкого прототипування у промисловості, а також розробити рекомендації щодо його ефективного використання. Для досягнення цієї мети буде проведено огляд сучасних технологій 3D моделювання, аналіз переваг та недоліків різних методів швидкого прототипування, а також розглянуто приклади успішного застосування цих технологій в різних галузях промисловості.

У першому розділі роботи буде розглянуто теоретичні основи 3D моделювання та швидкого прототипування, включаючи їх історію розвитку та основні принципи, й аналіз сучасних програмних засобів та технологій, що використовуються для створення 3D моделей і їх прототипування. У другому розділі буде проведено порівняльний аналіз різних методів швидкого прототипування. В третьому розділі буде розглянуто практичні аспекти

впровадження 3D моделювання у виробничі процеси та наведено приклади реальних проектів, де використання цієї технології дозволило досягти значних результатів.

У сучасних умовах стрімкого розвитку інноваційних технологій та глобальної конкуренції, промислові підприємства стикаються з необхідністю швидко та ефективно розробляти нові продукти. У цьому контексті технологія 3D моделювання для швидкого прототипування стає надзвичайно актуальною та затребуваною. Вона дозволяє значно скоротити час від ідеї до готового продукту, забезпечуючи при цьому високу точність і якість виробів.

Актуальність даної теми обумовлена кількома ключовими чинниками. Перший чинник – затребуваність в скороченні циклу розробки продукту. Завдяки 3D моделюванню та швидкому прототипуванню, компанії можуть швидко створювати та тестувати нові продукти, що дозволяє їм оперативно реагувати на зміни ринку та потреби споживачів.

Другий чинник – мінімізація витрат на розробку. Використання віртуальних моделей та прототипів значно знижує витрати на матеріали та виробництво фізичних прототипів. Це особливо важливо в умовах обмежених ресурсів та зростаючої вартості матеріалів.

Третій чинник - підвищення якості продукції. Завдяки детальному аналізу та тестуванню віртуальних моделей, можна виявити та усунути потенційні дефекти ще на етапі розробки, що забезпечує високу якість кінцевого продукту.

Четвертий чинник - промисловий розвиток. Застосування 3D моделювання та прототипування сприяє загальному розвитку промислових технологій, стимулюючи інновації та вдосконалення виробничих процесів.

Таким чином, дослідження та впровадження технологій 3D моделювання для швидкого прототипування складних моделей та виробів у промисловості є

надзвичайно актуальними завданнями. Вони сприяють підвищенню ефективності виробництва, зниженню витрат, підвищенню якості продукції та розвитку інновацій, що є ключовими факторами успіху в сучасній економіці.

Результати даного дослідження можуть бути корисними як для фахівців, що працюють у галузі промислового дизайну та виробництва, так і для студентів та науковців, які цікавляться сучасними технологіями проектування та прототипування.

## **РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ 3D МОДЕЛЮВАННЯ ТА ШВИДКОГО ПРОТОТИПУВАННЯ**

### **1.1. Історія та розвиток 3D моделювання**

3D моделювання почало поширюватися в маси відносно нещодавно. Тож щоб зрозуміти як ми дійшли до того що за допомогою 3D моделювання проектуємо будинки та знімаємо цілі фільми, треба заглянути в історію щоб побачити розвиток процесу моделювання.

Зародження технології 3D моделювання відбулося у 1960-х роках коли в продажі з'явилися перші системи автоматизованого проектування. Саме тоді, американський графічний дизайнер та піонер в області комп'ютерної графіки Вільям Феттер, вперше використав формули для перетворення 3D координат на 2д координати. За допомогою його програми можна було малювати 3D моделі з ліній. Паралельно з Вільямом Феттером в цьому напрямку вів дослідження аспірант Массачусетського університету Іван Сазерленд. Він виявив що може малювати об'єкти однієї форми на екранах комп'ютерів. Саме тому він в 1963 році створив першу в світі програму для 3D-моделювання – Sketchpad. В цій програмі можна було створювати примітивні 3D-об'єкти за допомогою полігональної сітки. Основною ідеєю даної програми стало створення графічного малюнку з якого можна створити безліч дублікатів. Користувач взаємодівав з програмою за допомогою світлового пера й міг малювати на дисплеї векторні фігури та зберігати їх. За допомогою рекурсії програмі не доводилося перемальовувати об'єкти по-новому. Саме за допомогою рекурсії користувач міг згенерувати потрібну йому кількість елементів і зобразити їх під різними кутами огляду або різних масштабах. Для швидкого відклику програми користувачеві та зберігання даних, Сазерленд вводить поняття «кільцева структура». Ця замкнена структура мала в собі n-кількість батьківських й дочірніх компонентів. Також однією з функцій Sketchpad була візуалізація розрахунків інших програм, якщо завдання користувача було зв'язане з проектуванням.

Наступним етапом моделювання виділяють 1970-ті роки. Коли були закладені основи 3D-моделювання, дослідники та інженери зі всього світу почали частіше цікавитися цією темою, розвивати її та покращувати ту базу знань та технологій, яка вже була розроблена в 60-ті. Саме тоді почали з'являтися перші методи створення повноцінних тривимірних моделей та були створені основні математичні принципи 3D-преетворень (обертання, масштабування та трансляція). Активно розроблялися алгоритми рендерингу.

В 1971 році був розроблений алгоритм затінення Гуро. Суть алгоритму полягає в інтерполяції кольорів на основі вершин моделі. Даний алгоритм обчислює кольори лише у вершинах багатокутників, з яких складається 3D-модель, а потім інтерполює кольори вздовж граней для отримання гладкого переходу. Це дозволяє уникнути різких змін кольору між гранями, але може призвести до не природнього відблиску від граней.

На базі алгоритму затінення Гуро в 1973 році був створений алгоритм затінення Фонга. Він був покращеною версією алгоритму Гуро. Затінення Фонга інтерполює нормалі в точках між вершинами багатокутників і обчислює колір у кожній точці поверхні. Даний алгоритм дає більш плавні та реалістичні переходи світла та тіней. [19]

Наприкінці 1970-х комп'ютерна графіка почала використовуватись в кіноіндустрії. До цього 3D-графіку та моделювання використовували лише в наукових та промислових цілях, ніхто не розглядав 3D-графіку як інструмент для створення розваг. Перше застосування 3D-графіки в кіноіндустрії відбулося під час створення фільму «Зоряні війни» (1977). В цьому фільмі використали комп'ютерні моделі для створення спец ефектів.

В 1980-ті роки вводилися інновації у програмному та апаратному забезпеченнях. Були розроблені або вдосконалені технології, що

використовуються й сьогодні. Саме в 80-ті починають з'являтися нові ПЗ зв'язані з 3D-моделюванням та проектуванням. В 1982 році з'являється перша версія AutoCAD – перша широко розповсюджена система автоматизованого проектування, яка працювала на ПК. AutoCAD дозволив інженерам та архітекторам створювати дво- та тривимірні креслення, що полегшило процес проектування та зробило його більш доступним. Також в широкому доступі з'явилася програма 3D Studio (1988 рік). Ця програма стала одним із перших інструментів для професійного 3D моделювання та анімації на ПК, що дало новий поштовх для використання 3D графіки в відеоіграх та кіно. Хоч алгоритм трасування променів (Ray Tracing) був запропонований ще в 1968 році, його майже не використовували через те, що для нього потрібно було мати багато комп'ютерних ресурсів. З розвитком ПК, вдосконалювався й трасування променів, й ось в 1980-х роках його вперше використали на практиці. Трасування променів дозволяє створювати високоякісні зображення, які враховують складну взаємодію світла з предметом моделювання. Також все частіше 3D графіку почали використовувати в кіноіндустрії для спец ефектів та окремих сцен у фільмах.

90-ті роки ознаменувався великою кількістю фільмів в яких використовувався CGI (Computer-Generated Imagery). Такі фільми як «Термінатор 2: Судний день» (1991) та «Історія іграшок», стали першими в яких було використано складну комп'ютерну графіку для створення більш реалістичної відеоряду. З часом з'являлося все більше та більше ПЗ для моделювання. Й ось в 1998 році з'являється застосунок Maya який наразі є стандартом для розробки 3D графіки для телебачення та кіно.

За рахунок збільшення потужностей ПК та редакторів для ігор в 90-ті дуже активно розвивається ігроіндустрія. В цей час створюються такі культові ігри як

«Half Life» та «The legend of Zelda» у яких використовують багато складних 3D-моделей.

У 2000-х роках розвиток 3D-друку дав новий поштовх для розвитку технологій 3D-моделювання, даючи можливість створювати фізичні прототипи з їх цифрових моделей. Перші системи 3D друку, такі як стереолітографія (SLA) та селективне лазерне запікання (SLS) для створення моделей хоч і були представлені ще в 1980-х, але масове поширення отримало лише в наступні десятиліття.

На початку 2000-х з'являється програмне забезпечення для моделювання - Blender. Безкоштовне і відкрите програмне забезпечення, отримало значне оновлення у 2002 році з випуском версії 2.0, що включала нові інструменти для моделювання та анімації. У 2009 році була випущена версія 2.5, яка представила новий інтерфейс користувача та покращену функціональність.

Також з'являється ПЗ ZBrush, який став революційним інструментом для цифрового скульптингу, дозволяючи художникам створювати високодеталізовані моделі з мільйонами полігонів. У 2009 році була випущена версія 3.5, яка включала нові функції, такі як ZSpheres II та інструменти для текстуровання.

3D-моделювання в медицині зазнало значних інновацій у 2000-х роках, що зробило його важливим інструментом для діагностики, планування лікування, навчання медичних працівників і розробки медичних пристроїв. 3D-моделювання використовується для створення точних моделей органів, планування хірургічних операцій і навчання медичних студентів. Технології 3D-друку дозволили створювати фізичні моделі для медичних досліджень та протезування.

З 2010 3D друк набирає популярності та стає все більш масовим явищем, з широким використанням у виробництві, медицині та навіть особистих потреб. В спільноті 3D-моделювання навіть з'являється спеціально розроблена 3D-модель човна (Рис.1.1.) яку використовують для тестування точності та можливості 3D-принтера.



Рис.1.1. 3D Benchy

Технології швидкого прототипування дозволили суттєво зменшити час розробки від цифрової 3D моделі до готово фізичного продукту. З подальшим розвитком технологій вироби з 3D моделей ставали все складнішими та якіснішими. Також починається активно розвиватися інтеграція з технологією віртуальної реальності (VR). З'являються нові програмні забезпечення для нових галузей промисловості та покращуються вже наявні програми які використовують 3D моделювання.

Пройшовши такий шлях еволюції 3D моделювання стало невід'ємною частиною людства. Цю технологію використовують в різноманітних галузях. Розглянемо декілька основних галузей які використовують технологію 3D-моделювання. Перше що приходить в голову при згадуванні цієї технології, мабуть через її масовість, це - ігрова індустрія. Завдяки 3D моделюванню, ігри поступово розвивалися з простеньких рисованих 2д персонажів, примітивного

світу та простих спрайтів в повноцінні ігри з великими різноманітними відкритими світами та реалістичними персонажами та спец ефектами. Наступна індустрія – кіно та відео. Моделювання дозволило вийти фільмам на зовсім новий рівень за допомогою комп'ютерних графічних ефектів (CGI) й робити світи, персонажів та ефекти які неможливо уявити в реальному житті. Також 3D моделі активно використовують в архітектурі та проектуванні. Вони допомагають дизайнерам та архітекторам створювати інтерактивні візуалізації будівель, інтер'єрів та екстер'єрів. Це дає змогу передбачити, як виглядатиме проект або будівля до її фізичної реалізації. В промисловості моделювання використовують для розробки нових деталей та продуктів, їх попередньої візуалізації та прототипування й усунення недоліків, якщо потрібно, та випуск їх в серійне виробництво. Активно використовують 3D моделювання для використання в інтерактивному навчанні та симуляціях – створюється віртуальне середовище, яке дає змогу людям навчатися, тренуватися в симуляціях в безпечних умовах (авіа індустрії, медична, військова сфери тощо). Все більшого поширення набуває 3D моделювання в медицині – його використовуються для точного відтворення моделей органів та частин тіла, що допомагає лікарям проводити дослідження, вивчати хвороби та планувати операції.

Перспективи подальших досліджень 3D-моделювання включають розробку більш ефективних і точних алгоритмів візуалізації, покращення взаємодії з моделями за допомогою віртуальної та доповненої реальності, а також розширення анімації та фізичного моделювання. Нейронні мережі та алгоритми глибокого навчання можна використовувати для автоматизації процесу моделювання, зменшуючи зусилля та покращуючи точність створених моделей. Розширення можливостей інтерактивної взаємодії з 3D-моделями у віртуальних середовищах може мати серйозний вплив на такі галузі, як освіта, дизайн і охорона здоров'я.

## **1.2. Основні види прототипування на машинах швидкого прототипування**

Перш за все треба визначити що таке швидке прототипування. Швидке прототипування (Rapid Prototyping, RP) – це набір технологій на методів для створення фізичних моделей або прототипів з 3D цифрових моделей. Основна мета RP – скорочення часу розробки та вдосконалення виготовлених продуктів. Цей процес особливо корисний на етапі розробки нових продуктів, коли є необхідність в короткий час отримати фізичний прототип для тестування та оцінки продукту.

Процес швидкого прототипування складається з таких етапів:

- Створення цифрового 3D зображення за допомогою CAD-систем (системи автоматичного проєктування).
- Перетворення цифрової моделі в формат, який придатний для друку (зазвичай це STL-файл, який зберігає інформацію про об'єкт як список трикутних граней, які описують його поверхню)
- Використання RP-машин для створення фізичної копії моделі, включаючи різні технології 3D друку
- В кінці відбувається постобробка, наприклад, видалення підтримок які залишилися після друку, шліфування, фарбування та багато інших процедур які потрібні для завершення того чи іншого прототипу.

Перевагами швидкого прототипування над класичними методами виготовлення прототипів полягає в: скороченні тривалості підготовки нової продукції в декілька разів та мінімізація помилок під час серійного виробництва; підвищення конкурентоспроможності виробництва через використання комп'ютерних технологій та мінімізації ручної праці.

Також існує декілька недоліків цього процесу, а саме: відносно висока ціна RP-машин та витратних матеріалів для них (ціни поступово знижуються через

оптимізацію виробництва); відносно низька зносостійкість та міцність прототипу; час виготовлення продукту збільшується при підвищенні складності друку.

Найбільш вживані технології швидкого прототипування:

- SLA (Stereolithography): Затвердіння рідкої фотополімерної смоли лазером.
- SLS (Selective Laser Sintering): Спикання порошкових матеріалів лазером.
- FDM (Fused Deposition Modeling): Плавлення і пошарове нанесення пластикової нитки.
- MJF (Multi Jet Fusion): Нанесення спікального реагента на порошковий матеріал та його спікання.
- PolyJet: Нанесення і затвердіння фотополімеру ультрафіолетовим світлом.
- DLP (Digital Light Processing): Затвердіння фотополімерної смоли цифровим світловим проектором.

### 1.2.1. Стереолітографія (SLA)

SLA (Stereolithography) – вперше ця технологія була запатентована Чаком Халлом (патент US4575330A) [2] яка заснована на фотоіонізації рідкої світлочутливої смоли. Основою цього процесу є ультрафіолетовий лазер, який переносить поперечний зріз зразка на поверхню контейнера з фотополімеризуючою композицією. Рідка смола твердне лише там, де проходить лазер. Потім на затверділий шар наноситься новий шар рідини, і лазером малюється новий контур. Процес повторюється до завершення побудови моделі.

Схема процесу створення прототипу за допомогою технології стереолітографії наступна (Рис.1.2):

- Створення цифрової моделі за допомогою системи автоматичного проєктування. Модель буде розрізатися на тонкі шари за допомогою спеціального ПЗ

- Об'єкт який був створений в САП друкується в резервуарі який заповнений рідкою фотополімерною смолою.
- УФ-лазер спрямовується на поверхню смоли відповідно до розрізаних шарів моделі, створюючи твердий шар смоли. Після затвердіння кожного шару платформа опускається на товщину одного шару і процес повторюється до завершення друку.
- Після завершення друку об'єкт виймається з резервуара, видаляються підтримки, якщо вони використовувалися, і проводиться додаткова УФ-обробка для повного затвердіння смоли. Також може бути необхідне миття об'єкта в ізопропіловому спирті для видалення залишків смоли (рекомендується працювати в добре провітрюваному приміщенні або під витяжкою, через роботу з рідинами які мають шкідливі випаровування).

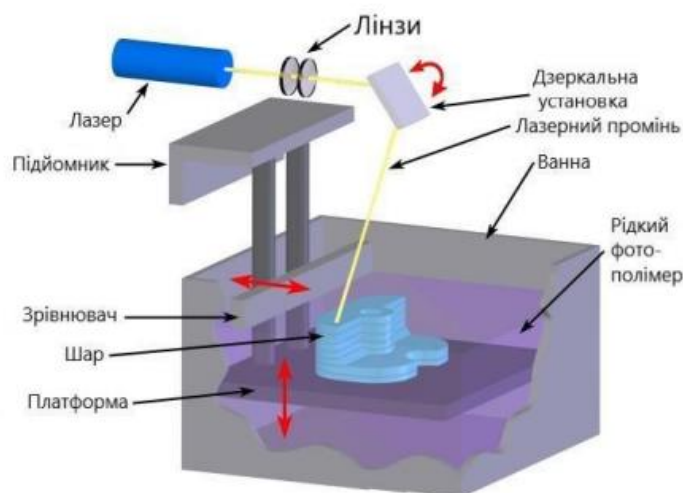


Рис.1.2. Процес створення прототипів за допомогою технології стереолітографії

Стереолітографія має низку переваг та недоліків про які треба згадати, особливо якщо це може критично вплинути на виробництво продукції на підприємстві. Щодо переваг, то SLA має: високу точність та деталізацію, що дозволяє створювати об'єкти з точністю до декількох мікрон; також об'єкти які були надруковані цим методом мають дуже гладку поверхню, що мінімізує

необхідність в додатковій грубій обробці виробу; на сьогоднішній день існує безліч видів фотополімерних смол з різноманітними властивостями, включаючи жорсткі, прозору, гнучкі, біосумісні, залежно від того які характеристики мають бути у вашого виробу. Існує також декілька недоліків цієї системи, а саме: висока вартість обладнання та матеріалів для виготовлення виробів зазвичай дорожчі ніж для інших технологій 3D друку; потреба в додатковій УФ-обробці та миття виробу, що додає часу до процесу виготовлення; як і в усіх технологіях 3D друку, має обмежену область друку, що ускладнює створення габаритних об'єктів.

SLA є однією з найбільш поширених технологій швидкого прототипування, охоплюючи низку галузей виробництва, починаючи з медицини (виготовлення стоматологічних моделей, медичних інструментів та протезів) та ювелірної індустрії (створення високоточних воскових моделей) й закінчуючи інженерією (прототипування складних деталей з високою деталізацією) та мистецтвом (виготовлення деталей для анімацій та фігурок).

### **1.2.2. Селективне лазерне запікання (SLS)**

SLS або селективне лазерне запікання – це технологія 3D-друку, яка використовує енергію лазерного проміння для спікання порошкових матеріалів у тверді об'єкти. На відміну від SLA технології, лазерний промінь є джерелом тепла, а не світла. Потрапляючи на шар порошку, промінь спікає його частки та формує тверду масу, яка відповідає формі заданої деталі. Цей метод є популярним у промислових застосуваннях завдяки своїй здатності створювати міцні і складні деталі. [9]

Схема за якою працює SLS технологія є наступною (Рис.1.3):

- Як у всіх технологіях спершу розробляється цифрова 3D модель за допомогою САП і розрізається на тонкі шари за допомогою спеціального ПЗ

- Порошковий матеріал рівномірно розподіляють по поверхні робочої платформи де буде випікатися виріб
- Після підготовки, лазер спрямовується на порошковий шар, спікаючи його в тверду масу згідно з контурами кожного шару моделі. Після завершення спікання шару, платформа опускається й наноситься новий шар порошку. Процес повторюється шар за шаром, доки об'єкт не буде повністю сформований.
- Після завершення друку виріб витягується з платформи, очищається від незв'язаного порошку та, за необхідності, піддається додатковій обробці.



Рис.1.3. Процес створення прототипів за допомогою технології селективного лазерного запікання

Як і всі технології, SLS має свої переваги та недоліки, розглянемо їх дещо детальніше. Однією з ключових переваг даної технології над іншими є відсутність додаткових підтримок для виробу, оскільки незв'язаний порошок сам по собі служить підтримкою для надрукованих шарів. Деталі які були виготовлені за допомогою SLS зазвичай мають високу міцність і можуть використовуватись вже як готові продукти, а не тільки як прототипи. Через

специфіку друку, селективне лазерне запікання дозволяє створювати дуже складні та детальні геометричні форми які дуже складно або взагалі неможливо створити іншими методами. Через велику різноманітність матеріалів (термопласти, метали, кераміка тощо) дану технологію використовують в різноманітних галузях. До основних недоліків SLS відносять: високу вартість обладнання та матеріалів, що робить її менш доступною для індивідуальних користувачів, поверхня готових виробів може буде шорсткою, що потребує додаткової обробки, з чого випливає наступний недолік – потрібно очищення деталі від залишків порошку та додаткова обробка, що може зайняти значний час. Під час роботи з технологією селективного лазерного запікання потрібно дотримуватися декількох правил техніки безпеки, а саме: носити рукавички, захисні окуляри та респіратор щоб уникнути потрапляння дрібних частинок порошку на частини тіла які можуть подразнюватись, обов'язково працювати в приміщенні з гарною вентиляцією або над витяжкою, зберігати матеріали в сухому місці та подалі від джерел тепла та регулярно очищати принтер та робочу зону від залишків порошку або запобігти пожежі. В порівнянні з SLA, SLS використовують ще в промисловому виробництві (виготовлення деталей для машин та механізмів) та авіації (виготовлення легких та міцних компонентів).

### **1.2.3. Технологія пошарового наплавлення (FDM)**

Однією з найпопулярніших та розповсюджених технологій швидкого прототипування є FDM (Fused Deposition Modeling або технологія пошарового наплавлення). На відміну від SLA та SLS технологій, в яких за допомогою лазера «запікають» матеріал, в даній RP-системі моделі створюються за допомогою розплавленого пластику. Даний метод має таку популярність завдяки універсальності та доступності, що дозволяє створювати різноманітні об'єкти з широкого спектра матеріалів, роблячи його ідеальною для прототипування, малих виробничих серій й для використання в освіті. [11]

Вироби створюються в даній технології за даним алгоритмом (Рис.1.4):

- Цифрова 3D модель створюється за допомогою САП і розрізається на тонкі шари за допомогою спеціального програмного забезпечення (slicer).
- Термопластичний матеріал, зазвичай у вигляді нитки (філаменту), подається в екструдер, де він нагрівається до температури плавлення.
- Розплавлений пластик видавлюється через сопло екструдера, який переміщається в горизонтальній і вертикальній площинах під контролем алгоритмів, аналогічних використуваним в ЧПУ верстатах і наноситься на робочу платформу, де він швидко охолоджується і твердне, формуючи шар моделі.
- Платформа опускається на товщину одного шару, і процес повторюється шар за шаром, доки об'єкт не буде повністю надрукований.
- Після завершення друку можливе додаткове оброблення виробу, такі як видалення підтримок, якщо в моделі були використані нависаючі структури й шліфування, якщо виріб виявився занадто шорстким.

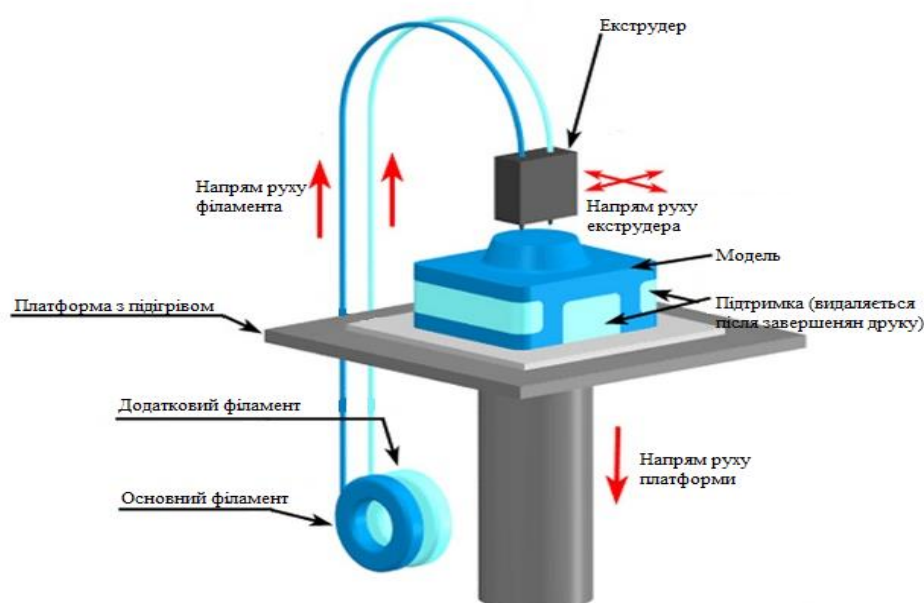


Рис.1.4. Процес створення виробу за допомогою технології пошарового наплавлення

Основна перевага FDM RP-принтерів полягає в їх низькій ціні, відносно інших видів 3D-принтерів, що робить цю технологію найбільш доступною для індивідуального користування та малих підприємств. Також даний тип принтерів легкий в налаштуванні та використанні, що дозволяє новачкам освоїтися в даній галузі. FDM-принтери мають великий вибір відносно дешевих термопластичних матеріалів з різноманітними властивостями, що дозволяє їх використовувати для виготовлення прототипів з різної метою.

Деякі принтери з технологією пошарового наплавлення мають досить великі області друку, що дозволяє створювати великі деталі або об'єкти. Але через свою технологію виготовлення виробів, дана RP-система має декілька недоліків, а саме: низька роздільна здатність в порівнянні з іншими методами; об'єкти надруковані таким методом, часто мають видимі шари і потребують додаткової обробки для досягнення потрібної поверхні; також ця методика потребує використання підтримок при друку складних геометричних виробів, які будуть видалені після друку. При роботі з даним обладнанням потрібно дотримуватися техніки безпеки, щоб не допустити отримання опіків.

#### **1.2.4. Multi Jet Fusion (MJF)**

Також існує потужна технологія 3D-друку, яка забезпечує високу швидкість, точність і міцність надрукованих об'єктів, що робить її привабливою для широкого спектра промислових і медичних застосувань - Multi Jet Fusion (MJF). Це передова технологія, була анонсована в 2014 році компанією HP та після періоду тестування та виправлень недоліків в 2016 році офіційно запустили свої перші комерційні MJF-принтери. Основна суть даних принтерів полягає в почерговому струменевому нанесенні сполучних реагентів і теплову обробку для створення міцних і детальних об'єктів з порошкових матеріалів.

Схема процесу створення прототипу за допомогою MJF-технології наступна:

- Цифрова 3D модель створюється за допомогою CAD-системи і розрізається на тонкі шари за допомогою спеціального програмного забезпечення.
- Тонкий шар порошкового матеріалу (зазвичай нейлону) рівномірно розподіляється по робочій платформі.
- Струменеві головки наносять сполучний реагент на місця, де має утворитися тверда деталь, і деталізуючий реагент на краях для поліпшення точності та чіткості.
- Після нанесення реагентів потужні лампи нагрівають шар порошку, змушуючи його затвердіти в тих місцях, де був нанесений сполучний агент.
- Платформа опускається, і процес повторюється шар за шаром, доки об'єкт не буде повністю сформований.
- Після завершення друку об'єкт виймається з порошкового матеріалу, очищається від незв'язаного порошку і, при необхідності, піддається додатковій обробці.

MJF-технологія має декілька переваг над іншими видами друку. Більшість технологій для 3D друку, які використовують підприємства за для отримання високоякісного друку, стикаються з тим, що на виготовлення виробів необхідно витрачати багато часу. Multi Jet Fusion зменшує час друкування без втрати якості моделі. Більше швидкість друку досягається тим, що одночасно обробляється цілий шар виробу, а не точка за точкою, як в більшості технологій 3D друкування. Єдиними недоліками Multi Jet Fusion є висока вартість обладнання та матеріалів, що збільшує собівартість виготовленої продукції та обмежений вибір матеріалів для використання. Також варто не забувати про техніку безпеки при роботі з даним типом обладнання.

### 1.3. Матеріали для 3D друку в промисловості

Існує безліч матеріалів які використовують для виготовлення моделей технологією 3D друку, тому поділ за технологіями не буде коректним тому, що один і той самий матеріал може використовуватися в декількох методах друку.

Розрізняють декілька типів матеріалів які використовуються для 3D друку в промисловості:

- **Пластики.** Пластики є найпоширеніший тип матеріалу для 3D-друку, завдяки своїй доступності, простоті використання та різноманітності властивостей. До пластиків належать ABS, PLA, PETG, нейлон, полікарбонат та інші.
- **Смоли.** Смоли використовуються для SLA, DLP та інших технологій друку, де потрібна висока точність та гладка поверхня. Існують різні типи смол з різними властивостями, такими як жорсткість, гнучкість, прозорість та стійкість до хімічних речовин.
- **Порошки.** Метали поширені у вигляді порошків та використовуються в SLS та інших технологій друку, де потрібна міцність, жорсткість та теплопровідність. До поширених металевих порошків належать алюміній, титан, сталь та нікель.
- Існують й інші, більш екзотичні матеріали для 3D-друку, такі як кераміка, піщаник, харчові продукти та біологічні матеріали. Їх використання обмежене специфічними технологіями друку та сферами застосування.

Також матеріали розрізняють за фізичними властивостями:

- **Міцність:** Деякі матеріали, такі як нейлон і полікарбонат, відомі своєю міцністю та жорсткістю, що робить їх ідеальними для деталей, які повинні витримувати значні навантаження.

- Гнучкість: Інші матеріали, такі як TPU (термополіуретан), гнучкі та еластичні, що робить їх придатними для деталей, які повинні згинатися або деформуватися.
- Стійкість до хімічних речовин: Деякі матеріали, такі як поліпропілен, стійкі до хімічних речовин та корозії, що робить їх придатними для використання в агресивних середовищах.
- Біорозкладність: Деякі матеріали, такі як PLA, біологічно розкладаються, що робить їх більш екологічними.
- Точність: Деякі матеріали, такі як смоли, дозволяють друкувати деталі з дуже високою точністю та гладкою поверхнею.
- Вартість: Деякі матеріали, такі як ABS і PLA, відносно недорогі, тоді як інші, такі як метали та деякі спеціалізовані смоли, можуть бути значно дорожчими.

Розглянемо найпоширеніші матеріали які використовують в адитивному виробництві

### **1.3.1 ABS-пластик**

ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол) пластик - це один з найпоширеніших і найдоступніших матеріалів для 3D-друку. Він відомий своєю міцністю, жорсткістю, стійкістю до ударів та хімічних речовин, що робить його придатним для широкого спектру застосувань. (Рис.1.5.)

Переваги ABS-пластику над іншими пластиками: міцність і жорсткість (ABS-пластик може витримувати значні навантаження, що робить його ідеальним для друку міцних деталей); стійкість до ударів (ABS-пластик стійкий до ударів, тому він не ламається при падінні або ударі); стійкість до хімічних речовин (ABS-пластик стійкий до широкого спектру хімічних речовин, включаючи кислоти, луги та масла); простота обробки (ABS-пластик легко

піддається механічній обробці, таким як шліфування, свердління, різання та фарбування); хороші якості склеювання (ABS-пластик добре з'єднується, що робить його ідеальним для створення складних деталей); відносно недорогий (ABS-пластик є одним з найдешевших матеріалів для 3D-друку), висока термостійкість (ABS-пластик має високу температуру плавлення (210-250°C), що робить його стійким до деформацій при високих температурах)



Рис. 1.5. Філамент який використовують для 3D-друку – ABS-пластик

До недоліків ABS-пластику відносять:

- ABS-пластик чутливий до УФ-випромінювання та з часом може пожовтіти або стати крихким під впливом сонячного світла.
- Під час роботи з ABS-пластиком, при нагріванні він може виділяти пари, які шкідливі для здоров'я. Важливо використовувати ABS-пластик в добре провітрюваному приміщенні та вживати заходів обережності, щоб уникнути вдихання парів.
- ABS-пластик не розкладається в навколишньому середовищі, що робить його проблемним в частині утилізації.

- Під час друку виробів з ABS-пластику, він може деформуватися при охолодженні, тому важливо використовувати друковане ложе з підігрівом.

ABS-пластик часто використовується для друку корпусів електроніки, завдяки його міцності та стійкості до хімічних речовин. Також ABS-пластик також використовується для друку деталей автомобілів. ABS-пластик є популярним матеріалом для друку іграшок, завдяки його міцності, стійкості до ударів і доступності. Даний пластик також використовується для друку різноманітних предметів, таких як інструменти, посуд, прототипи та декоративні вироби.

### **1.3.2. PLA-пластик**

PLA (полілактид) - це один з найпоширеніших і найдоступніших біорозкладних матеріалів для 3D-друку. Він відомий своєю простотою використання, екологічністю, гарною якістю друку та доступністю. [23]

PLA-пластик виділяється серед інших тим, то він виготовляється з поновлюваних ресурсів, таких як кукурудзяний крохмаль або цукровий буряк, тому він є біорозкладним. Це робить його кращим вибором для екологічно свідомих користувачів, порівняно з ABS-пластиком. PLA-пластик простий у друці і не вимагає нагрітого друкованого ложа, що робить його хорошим вибором для початківців. PLA-пластик не поступається якістю іншим матеріалам тож він забезпечує гладку поверхню та гарну деталізацію друку. PLA-пластик є одним з найдешевших матеріалів для 3D-друку. Також PLA-пластик не виділяє шкідливих парів при друці, що робить його безпечним для використання в домашніх умовах.

PLA-пластик має й декілька недоліків. По-перше, він менш міцний та менш стійкий до хімічних речовин, ніж ABS-пластик, і може деформуватися при високих температурах та взаємодії з ацетоном або бензином. Використання PLA-

пластику для гнучких деталей буде невдалим, тому що він не має такої властивості, на відміну від пластику типу TPU (термопластичний поліурітан). Також PLA-пластик плавиться при нижчих температурах (180-220°C), ніж ABS-пластик, що може призвести до забивання сопла, й додати зайвих клопотів, якщо не дотримуватися правильних налаштувань друку.

PLA-пластик активно використовують в прототипуванні через його дешевизну, простоту використання та доступності можна швидко створити недорогий прототип. PLA-пластик також добре підходить для друку декоративних виробів, таких як фігурки, вази та ювелірні вироби, завдяки його гарній якості друку. Через безпечність та простоту у використанні, цей вид пластику зарекомендував себе гарним матеріалом, щоб розібратися в сфері 3D-друку.

### **1.3.3 PETG пластик**

PETG (поліетилентерефталат гліколь) - це термопластичний поліестер, який стає все більш популярним матеріалом для 3D-друку завдяки своїм унікальним властивостям, простоті використання та доступності.

PETG-пластик міцний і жорсткий, як й ABS-пластик, але при цьому трохи гнучкіший. Це робить його придатним для друку деталей, які повинні витримувати значні навантаження, але при цьому не ламатися. PETG-пластик стійкий до широкого спектру хімічних речовин (кислоти, луги та масла). Це робить його придатним для використання в більш агресивних середовищах. PETG-пластик простий у друці, не вимагає нагрітого друкованого ложа і не схильний до забивання сопла. PETG-пластик забезпечує гладку поверхню та гарну деталізацію друку, подібно до PLA. PETG-пластик є доступним матеріалом, що робить його привабливим вибором для бюджетних користувачів.

PETG-пластик не виділяє шкідливих парів при друці, що робить його безпечним для використання в домашніх умовах.

#### 1.3.4. Смоли

Смоли - це рідкі або напівтверді матеріали, які використовуються в 3D-друкуванні для створення високоточних деталей з гладкою поверхнею. Вони відрізняються від ниткових матеріалів, таких як PLA, ABS і PETG, тим, що твердіють під дією світла або хімічних реакцій, а не за допомогою нагрівання та екструзії. (Рис.1.6)



Рис. 1.6. Приклад смоли яку використовують в методі друку SLA

Головною перевагою смол є точність моделі. Смоли дозволяють друкувати деталі з дуже високою точністю та гладкою поверхнею, що робить їх ідеальними для створення складних геометрій та прототипів. Як і пластиків, існує широкий спектр смол з різними властивостями, такими як жорсткість, гнучкість, прозорість, стійкість до хімічних речовин та біосумісність. Це робить їх придатними для широкого спектру застосувань. [13]

Головним недоліком смол є складність друку. Вони потребують спеціального дорогого обладнання, тонке налаштування та багато досвіду. Самі

смоли, як правило, дорожчі, ніж ниткові матеріали. Деякі смоли можуть мати сильний запах, тому важливо використовувати їх в добре провітрюваному приміщенні й використовувати засоби індивідуального захисту та дотримуватися правил безпеки.

### **1.3.5.Порошкові матеріали**

Металовмісні порошки використовуються в технологіях 3D друку, таких як DMLS (Пряме лазерне спікання металу), SLM (Селективне лазерне плавлення). Ці технології дозволяють створювати високоякісні деталі з металу для промислового використання.

Основні типи металовмісних порошків [7]:

- Прототипи виготовлені за допомогою алюмінієвих сплавів легкі з високою корозійною стійкістю та хорошою теплопровідністю, саме тому їх використовують в авіації, автомобілебудуванні, виробництві електроніки та інструментів.
- Титан і титанові сплави мають висока міцність, корозійну стійкість та біосумісність. Даний метал (або сплави з цим металом) активно застосовують в авіакосмічній промисловості, медицині (імпланти та протези) й автомобілебудуванні.
- Вироби з нержавіючої сталі теж мають висока міцність, стійкість до корозії, також мають хороша механічну оброблюваність. Застосовують у виробництві інструментів, деталей машин, декоративних елементів та харчовій промисловості.
- Кобальт-хромові сплави мають високу міцність, зносостійкість та біосумісність, за що їх дуже цінують в медицині (протези та імпланти).
- Нікелеві сплави характеризуються як стійкі до високих температур та корозії, за що їх активно використовують в авіакосмічній промисловості та енергетиці.

#### 1.4. Програмне забезпечення для швидкого прототипування

Програмне забезпечення яке використовують для швидкого прототипування відіграє ключову роль у підготовці моделей для 3D-друку, оптимізації процесу друку та подальшій обробці виробів. Існує безліч різноманітних програм для різних задач та різних технологій 3D друку та 3D моделювання. В процесі швидкого прототипування виділяють 2 групи програм: САПР-програми в яких моделюються прототипи та програми для нарізання моделі на шари та підготовки до друку (слайсери) [5] [15] [1]

Системи автоматизованого проектування (САП) - це програмні засоби, що забезпечують комплексні можливості для автоматизації процесів проектування та управління проектами. Вони поєднують у собі функціональність САД (комп'ютерного проектування) з іншими інструментами для аналізу, оптимізації та управління проектами. САП системи дозволяють інженерам та дизайнерам створювати та редагувати тривимірні моделі об'єктів, а також виконувати різноманітні аналізи, такі як аналіз міцності та тепловий аналіз. Крім того, вони забезпечують інструменти для керування версіями проектів, спільної роботи над проектами та інтеграції з іншими системами управління.

Слайсери є критично важливими інструментами в процесі 3D друку, забезпечуючи перетворення 3D моделей у набір команд, які зрозумілі 3D принтерам. Алгоритм дій слайсерів: слайсер приймає 3D модель у форматі STL, OBJ або іншому підтримуваному форматі і перетворює її на тонкі горизонтальні шари (кожен шар містить інформацію про те, як принтер повинен переміщувати екструдер або лазер для побудови цього шару); слайсер генерує G-код, який містить інструкції для 3D принтера щодо руху екструдера, температури, швидкості та інших параметрів (G-код є стандартною мовою програмування для управління машинами з числовим програмним керуванням (ЧПК)).

Слайсер дозволяє користувачам налаштовувати різноманітні параметри друку, включаючи: висоту шару, швидкість друку, температуру екструдера і платформи, відсоток заповнення, присутність підтримок в моделі та їх тип. Слайсер оптимізує траєкторію руху екструдера, щоб зменшити час друку та мінімізувати відходи матеріалу. Він також може розрахувати та мінімізувати необхідні підтримки для нависаючих частин моделі. [17]

Процес використання слайсера:

1. Імпорт 3D моделі
2. Завантаження 3D моделі у форматі STL, OBJ або іншому підтримуваному форматі.
3. Налаштування параметрів друку Вибір матеріалу друку (PLA, ABS, PETG тощо).
4. Встановлення висоти шару, швидкості друку, температури екструдера і платформи. Налаштування типу та кількості підтримок.
5. Перегляд шару за шаром для перевірки налаштувань та виявлення потенційних проблем.
6. Після завершення налаштувань слайсер генерує G-код, який зберігається на карту пам'яті або передається безпосередньо на 3D принтер.
7. Завантаження G-коду на 3D принтер і запуск процесу друку.

## **РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ШВИДКОГО ПРОТОТИПУВАННЯ ПРОТОТИПІВ ТА ВИРОБІВ**

Опановування всіх тонкощів мистецтва 3D друку роками, тому на самому початку всіх новачків у цій справі очікують різного типу помилки. Починаючи з процесу моделювання та закінчуючи роботою з 3D принтером.

### **2.1. Основні помилки та дефекти які можуть відбутися під час процесу швидкого прототипування.**

Під час моделювання для друку можуть виникнути різні помилки. Недостатня роздільна здатність може призвести до втрати дрібних деталей, а невідповідність кольорів може призвести до неправильного відображення. Нестабільність матеріалу або проблеми з його підтримкою можуть спричинити деформацію моделі або її неправильне друкування. Нестача товщини стінок або недоліки у сполученнях деталей також можуть вплинути на якість друку. Для уникнення таких помилок важливо ретельно перевіряти модель перед друкуванням та, за можливості, проводити тестування під час друкування.

Найпоширеніша помилка яка зв'язана з друком – це погане прилипання першого шару. Причиною даної проблем може бути декілька. Перша, платформа на якій буде друкуватися прототип недостатньо прогріта (перед друком переконуватися що платформа прогріта). Друга, платформа не вирівняна або не відрегульована (перед друком обов'язково перевіряти платформу). Третя, неправильна відстань між соплом та платформою через що філамент встигає остигнути (відрегулювати відстань між соплом та платформою, перший шар має бути злегка спресований).

Наступний дефект з якою може зустрітися користувач – павутина ( Рис. 2.1.). Вона з'являється тоді, коли під час друку 3D-моделі екструдер, що погано

втягує пластик назад в сопло, переміщається на нову позицію. Щоб вирішити цю проблему потрібно в налаштуваннях вибрати параметр втягування. Зазвичай чим більше пластику втягується, тим менше ймовірність появи павутини. Також проблема може бути в швидкості подачі філаменту. Ще одною причиною павутинки може бути надлишкова температура екструдера. При більшій температурі, пластику легше витекти з екструдера, тому важливо регулювати температуру залежно від філаменту який використовується.

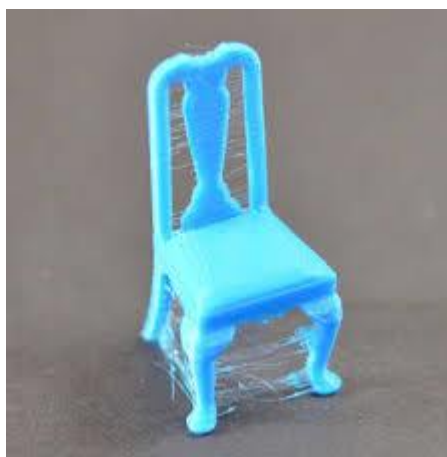


Рис. 2.1. Приклад появи павутини на 3D-моделі

Проблеми з адгезією між шарами в 3D-друці (Рис.2.2) можуть суттєво впливати на якість та міцність моделі. Основні причини таких проблем включають низьку температуру екструзії, неправильну швидкість друку, надто тонкий шар, недостатнє охолодження, проблеми з матеріалом та неправильні налаштування ретракції. Для вирішення цих проблем слід підвищити температуру екструзії до рекомендованого діапазону для конкретного філаменту (для PLA – 180-220°C, для ABS – 220-250°C), знизити швидкість друку, збільшити товщину шару (наприклад, з 0,1 мм до 0,2 мм), налаштувати охолодження для поступового охолодження шарів, використовувати якісний філамент і відрегулювати налаштування ретракції у програмному забезпеченні.

Проведення тестів допоможе визначити оптимальні налаштування для покращення адгезії між шарами. [10]



Рис. 2.2. Проблеми з адгезією між шарами в 3D-друці

Недостатнє подавання філаменту - це часта проблема під час 3D-друку, коли принтер не подає достатньо матеріалу для створення моделі. Причини можуть бути різними: забитість сопла або екструдера, низька температура екструзії, неправильні налаштування програми для нарізки моделі, знос екструдера або низькоякісний філамент. Щоб усунути цю проблему, потрібно регулярно очищати сопло та екструдер, налагоджувати температуру, перевіряти налаштування програми для нарізки, обслуговувати екструдер та використовувати якісний філамент.

Також часто зустрічається проблема з надмірним подавання філаменту під час 3D-друку виникає, коли принтер витрачає більше матеріалу, ніж потрібно для створення моделі. Основними причинами є неправильна температура екструзії, висока швидкість друку, неправильні налаштування програми для нарізки, проблеми з калібруванням екструдера та загальне зношування деталей принтера. Для виправлення проблеми слід перевірити та налаштувати ці параметри в слайсері або на самому 3D-принтері.

## 2.2. Приклад помилок та їх вирішення на реальному прототипі.

Декілька основних помилок або дефектів, які можуть статися під час процесу швидкого прототипування, які були наведено вище, будуть продемонстровані на прикладі з реального кейсу (кардхолдер).

Проблема з якою може зустрітися користувач 3D-принтерів може бути навіть не зв'язана з роботою принтера. Перші прорахунки можуть відбутися ще на стадії проєктування та моделювання об'єкту. В деяких випадках є можливість це побачити ще на стадії моделювання й швидко переробити модель. В даному випадку, навіть теоретичний збір моделі нічого не показав, тому було зроблено рішення перекинути модель в слайсер та почати друкувати прототип (Рис.2.3).

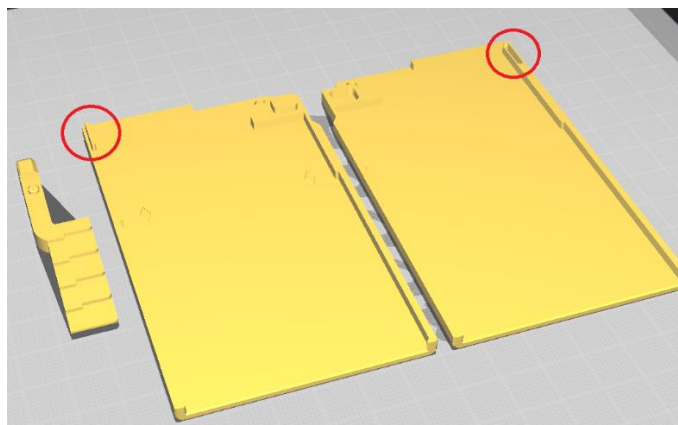


Рис. 2.3. Прототип кардхолдера в слайсері UltiMaker Cura

При першому зборі прототипу в виділених областях, деталі чомусь не з'єднувалися, було вирішено переглянути модель, але нічого, що могло заважати не виявили. Надрукувавши іншу деталь, була виявлена причина проблеми. Саме в тому місці 3D-принтер давав похибку. Усунувши дану проблему, було зроблено рішення, надрукувати ще раз прототип. Під час друку дефектів не було виявлено. Надрукувавши деталі та зібравши прототип, виявився головний недолік даного

прототипу. Він виявився в самій конструкції. Через недоліки, деталі хоч і з'єднувалися але погано трималися разом й прототип швидко розпадався.

На основі ідею даного прототипу, був створений інший (Рис.2.4) в якому взагалі не було з'єднань в корпусі, щоб мінімізувати фактори які могли вплинути на модель. Єдиний випадок коли даний прототип не буде функціонувати – коли зламається сам корпус або механізм подачі. В даному варіанті був вдосконалений механізм подачі карток та покращений дизайн.

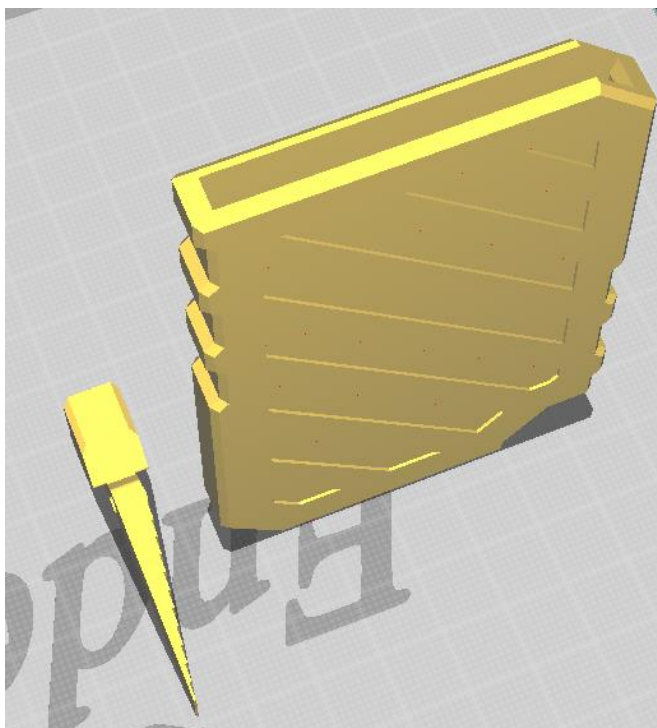


Рис. 2.4. Другий прототип кардхолдера

Під час виготовлення другого прототипу ніяких дефектів машини для швидкого прототипування не було виявлено. Прототип виготовився за короткий проміжок часу, був міцніший за попередню версію через збільшення товщини стінок. Але під час тестування другого прототипу виявився дефект. Якщо всі кишені для карток заповнювалися, самі картки видавалися не по черзі, а в шаховому порядку, що затрудняло доступ до певних карток. Тому щоб прототип

функціонував як планувався, треба було використовувати не більше половини кишень.

Через даний недолік було зроблено третій прототип кардхолдеру, який складався з 4 деталей (корпус, стінка між відділами, кришка та механізм подачі карток) (Рис. 2.5), з більшим функціоналом та з урахуванням недоліків попередніх моделей. Даний прототип мав товсті стінки для міцності (що не мав перший прототип) та було усунуто дефект другої моделі (проблему вирішили за допомогою зменшення кількості кишень для карток).



Рис. 2.5. Рендер деталей третього прототипу

Функціонал даного прототипу полягає в зберіганні не тільки карток, а й різних дрібних предметів. Третя версія кардхолдеру складалася з 2 відділів. Перший мав на меті зберігання карток (Рис. 2.6) в кількості до 5 штук.

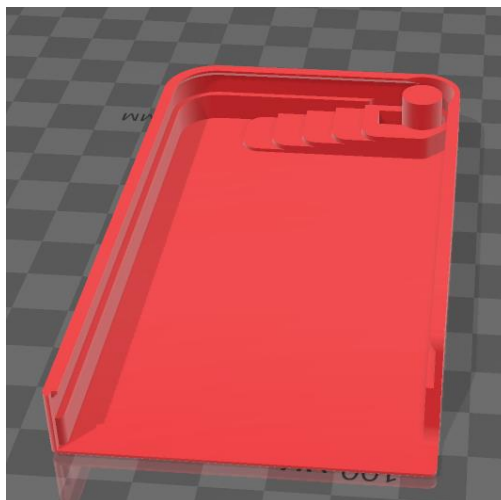


Рис. 2.6. Відділ кардхолдера для зберігання карток

Другий відділ, який створювався за допомогою стінки між відділами, який входив в паз в корпусі, мав на меті зберігання, наприклад грошей (Рис. 2.7).

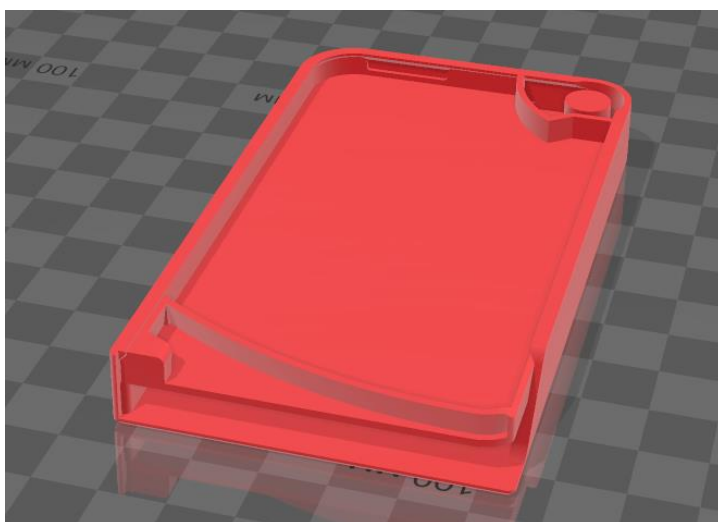


Рис. 2.7. Відділ для зберігання дрібних речей

Модель була завершеною коли четверта деталь (кришка кардхолдера) (Рис.2.8) ставала в свої пази та міцно зафіксувалася.

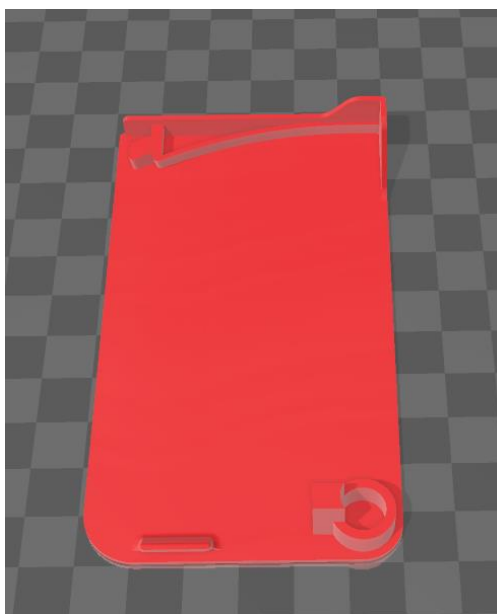


Рис.2.8. Фіксуюча кришка кардхолдера

Після друку деталей, кардхолдер збирався та тестувався. Дефектів деталей та процесу друку не було виявлено. Даний прототип функціонував як проєктувався.

Зробивши три різні прототипи кардхолдерів та зіткнувшись з різними проблемами та дефектами, усунувши їх, можна зробити висновок, що оптимальною методикою для створення прототипів у промисловості буде:

1. Створення цифрової моделі (концептуальний дизайн та 3D-моделювання)
2. Підготовка моделі до друку (виявлення помилок у цифровій 3D-моделі та нарізання моделі)
3. Вибір матеріалу (вибрати матеріал залежно від вимог до прототипу)
4. Налаштування принтера (налаштувати основні параметри під вибраний прототип)
5. Процес друку (завантаження G-коду в 3D-принтер та контроль за процесом, для оперативного усунення проблем)
6. Обробка прототипу після друку (видалення підтримок, якщо вони були, шліфування та обробка поверхонь, якщо це необхідно)

7. Перевірка та тестування прототипу (перевірити прототип, чи функціонує він так, як проєктувався)
8. Аналіз тестувань (виявлення недоліків у процесі тестування, які потребують покращення та внесення змін до цифрової моделі, підготовка до повторного друку та тестування)

### РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДИКИ ШВИДКОГО ПРОТОТИПУВАННЯ ДЛЯ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ

Для реалізації методики яка була описана вище були використані такі елементи: система автоматичного програмування – 3D builder, слайсер - UltiMaker Cura, 3D принтер з технологією друку FDM - Creality ender-3 v2 (Рис. 3.1.)

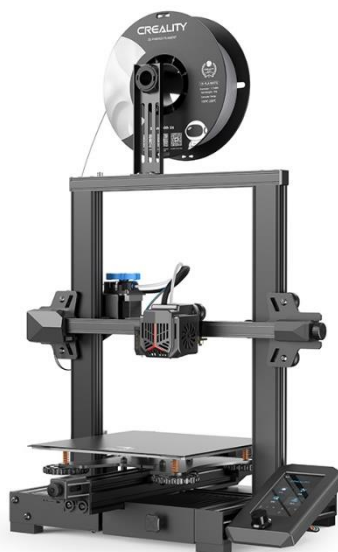


Рис. 3.1. 3D принтер Creality ender-3 v2

та як матеріал для виготовлення прототипів був використаний PLA-пластик. Перш за все були вибрані та спроектовані в САП системі 2 складні цифрові моделі прототипів (Рис.1 та Рис.2). Допрацювавши моделі та виправивши всі неточності в системі автоматизованого проєктування, імпортуємо (в STL форматі) цифрові моделі в слайсер для їх підготовки до 3D друку.

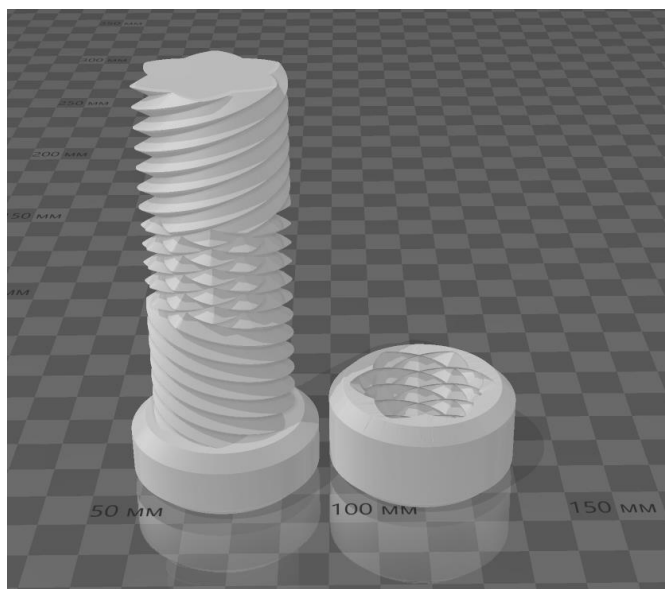


Рис. 3.2. Болт та гайка з двостороннім різьбленням в програмному забезпеченні 3D Builder

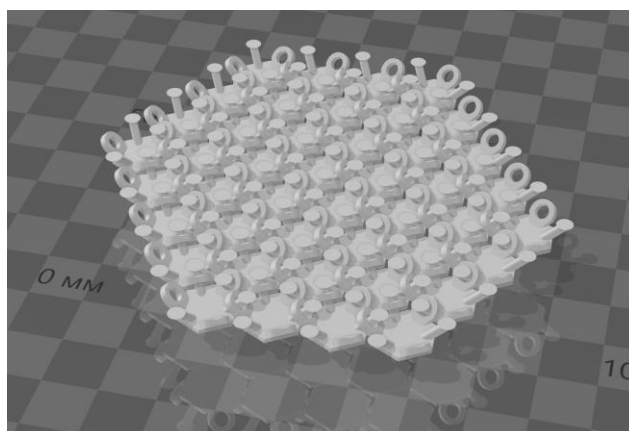


Рис. 3.3. Модель з кільцужним типом з'єднанням в програмному забезпеченні 3D Builder

Підготовка до друку моделей в слайсері відбувається в 3 етапи:

1. В слайсері вибираємо наявний 3D принтер, в даному випадку Creality ender3 v2 та починаємо налаштування програми для конкретної моделі.

Для виготовлення болта з гайкою та моделі з кольчужним типом з'єднання був вибраний матеріал PLA-пластик, через легкість та безпечність його використання та стандартне сопло на 0,4 mm (Рис.3.4)

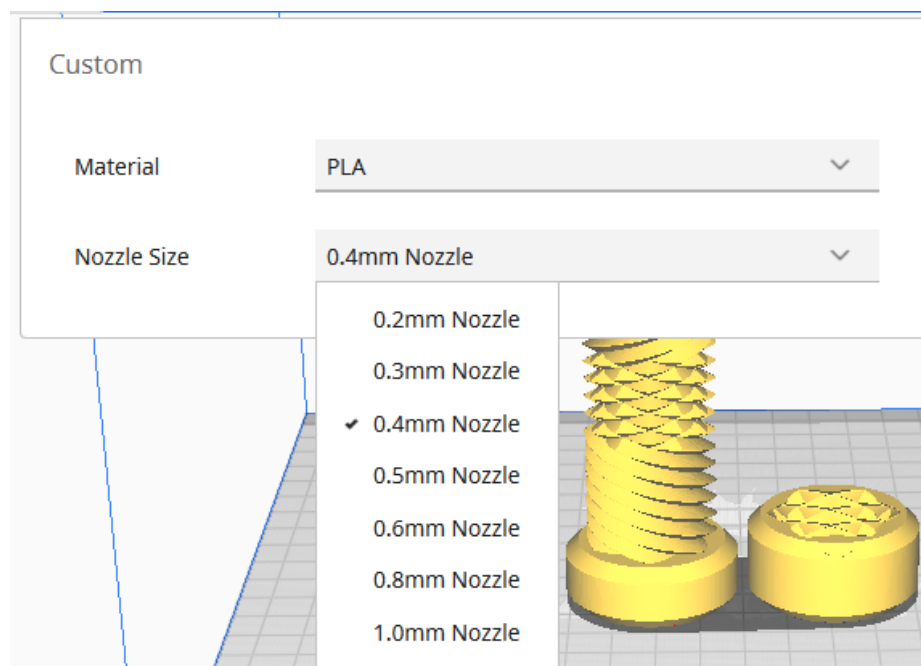


Рис.3.4. Вибір матеріалу та діаметра сопла

2. Далі відкриваємо меню з налаштуваннями друку, де вибираємо висоту шару, швидкість друку, температури екструдера і платформи (Рис.3.5.)

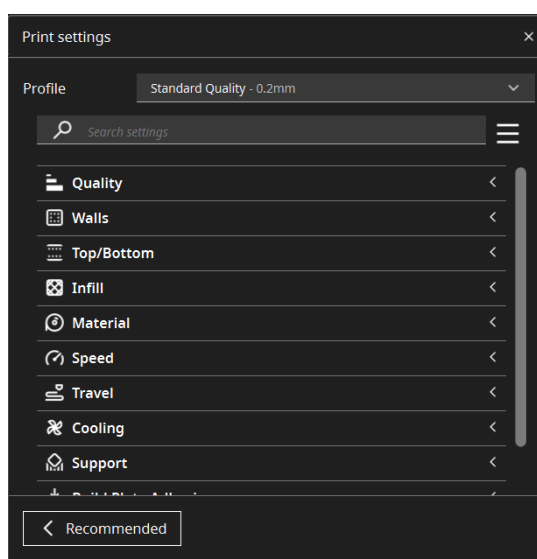


Рис. 3.5. Меню налаштування

Через те, що спроектовані моделі не мають складних звисаючих частин, потреба в використанні підтримок відсутня. Тому натиснувши кнопку «Slice», переходимо до наступної частини підготовки моделі до друку. Перед нами з'являється попередній перегляд процесу друку на 3D-принтері. В цьому режимі можна подивитися як буде друкуватися деталь пошарово й скільки потрібно часу на виготовлення даної деталі та скільки піде матеріалу.

Синій контур на даному риску не є частиною прототипу. Це так звана спідниця. Спідниця - це початковий шар матеріалу, який друкується навколо моделі, але не з'єднаний з нею. Основна мета використання спідниці полягає в тому, щоб підготувати екструдер і стабілізувати потік матеріалу перед тим, як розпочнеться друк самої моделі. Спідниця допомагає виявити потенційні проблеми з друком на ранньому етапі, дозволяючи зробити корекції до початку друку основної моделі. Вона також допомагає налагодити правильне налаштування відстані між друкуючою головкою і платформою. Правильне використання спідниці може значно покращити якість першого шару друку та загальний результат 3D-друку. (Рис.3.6)

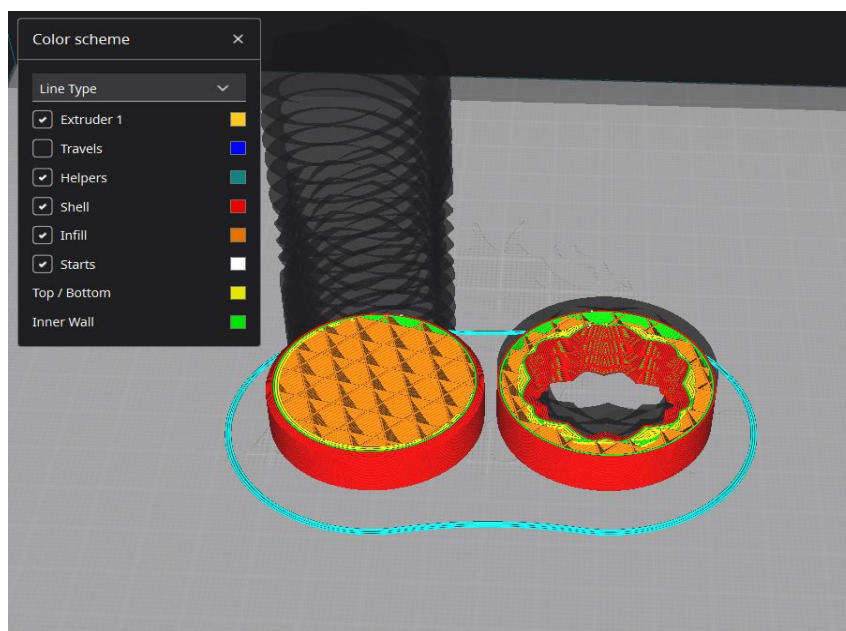


Рис. 3.6. Деталь в розрізі та «спідниця» навколо нього

Переглянувши, як будуть друкуватися шари та впевнившись, що відсутні проблем та дефекти при друці, переходимо до останнього етапу підготовки до друку, а саме - генерування G-коду.

3. G-код використовується для управління рухами і функціями принтера під час друку об'єкта. Він містить набір команд, які інструктують принтер, як саме друкувати модель шар за шаром. G-код генерується слайсером, який переводить 3D-модель у серію інструкцій, зрозумілих для принтера.

Основні команди G-коду, які використовуються для 3D-друку, включають:

- Переміщення головки (G0, G1): G0. Швидке переміщення головки без екструзії матеріалу. G1: Переміщення головки з екструзією матеріалу. Приклад: G1 X50 Y25 Z0.3 - переміщення головки до координат (50, 25, 0.3) з екструзією матеріалу.
- Екструзія (E). Визначає кількість матеріалу, що екструдується під час переміщення головки. Приклад: G1 X50 Y25 Z0.3 E1.5 - переміщення головки до координат (50, 25, 0.3) з екструзією 1.5 одиниць матеріалу.
- Швидкість переміщення (F). Визначає швидкість переміщення головки. Приклад: G1 X50 Y25 Z0.3 F1200 - переміщення головки до координат (50, 25, 0.3) зі швидкістю 1200 мм/хв.
- Температура екструдера (M104, M109). M104: Встановлює температуру екструдера без очікування. M109: Встановлює температуру екструдера з очікуванням до досягнення заданої температури. Приклад: M109 S200 - встановлення температури екструдера на 200°C і очікування до її досягнення.
- Температура платформи (M140, M190). M140: Встановлює температуру платформи без очікування. M190: Встановлює температуру платформи з очікуванням до досягнення заданої температури. Приклад: M190 S60 -

встановлення температури платформи на 60°C і очікування до її досягнення.

- Контроль вентилятора (M106, M107): M106: Увімкнення вентилятора охолодження. M107: Вимкнення вентилятора охолодження. Приклад: M106 S255 - увімкнення вентилятора на максимальну потужність.
- Зміна інструменту (T0, T1). Використовується для зміни активного екструдера у принтерах з кількома екструдерами. Приклад: T0 - вибір першого екструдера.
- Коментарі: Починаються зі знаку ; і використовуються для додавання пояснень, які ігноруються принтером. Приклад: ; Початок друку першого шару.

Нижче приведено частину коду згенерованого слайсером для створення першого шару:

G1 Z2.0 F3000 ; Move Z Axis up little to prevent scratching of Heat Bed

G1 X0.1 Y20 Z0.3 F5000.0 ; Move to start position

G1 X0.1 Y200.0 Z0.3 F1500.0 E15 ; Draw the first line

G1 X0.4 Y200.0 Z0.3 F5000.0 ; Move to side a little

G1 X0.4 Y20 Z0.3 F1500.0 E30 ; Draw the second line

Код завантажується на 3D-принтер та запускається процес друку.

## ВИСНОВКИ

Виконана кваліфікаційна робота підтверджує, що 3D-моделювання є ключовою технологією для швидкого прототипування складних моделей та виробів у промисловості. Впровадження 3D-друку значно прискорює процес розробки, знижує витрати та покращує якість кінцевих продуктів.

У рамках даної роботи було розглянуто основні аспекти 3D-моделювання а саме: вибір програмного забезпечення, методики створення моделей та процес підготовки до друку. Було досліджено системи автоматизованого проектування (САП) та програми для нарізання цифрової моделі на шари (слайсери), їх функціональність та можливості. Також приділена увага аналізу та оптимізації G-коду, який є основною мовою для управління 3D-принтерами, та його впливу на якість друку.

Практичні результати роботи демонструють, що використання сучасних САП-систем та слайсерів дозволяє досягти високої точності та деталізації моделей, що є критично важливим для виробництва складних виробів. Було підтверджено, що правильне налаштування параметрів друку та використання підтримуючих структур (в даному випадку спідниці), значно підвищують успішність друку та якість кінцевого продукту.

Загалом, з результату кваліфікаційної роботи можна зробити висновок, що 3D-моделювання та 3D-друк мають значний потенціал для подальшого розвитку в усіх сферах промисловості. Продовження досліджень у цій галузі може призвести до винайдення нового способу друку який буде швидший, якісніший та дешевший за попередні а вдосконалення існуючих технологій призведе до розширення їх застосування. Впровадження новітніх технологій 3D-друку сприятиме підвищенню конкурентоспроможності виробництва та інноваційному розвитку промисловості в цілому.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3D printing and its applications. *International journal of science and research (IJSR)*. 2016. Vol. 5, no. 3. P. 1532–1535. URL: <https://doi.org/10.21275/v5i3.nov162160>.
2. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography : patent US4575330A. Applied on 08.08.1984 ; published on 11.03.1986.
3. Bothmann O. 3D printers: a beginner's guide. East Petersburg, PA : Fox Chapel Publishing, 2015. 136 p.
4. Chua C. K., Leong · K. F. 3d printing and additive manufacturing: principles and applications : підручник. 5th ed. World Scientific Publishing Company, 2016. 456 p.
5. Chua C. K. Rapid prototyping: principles and applications. 3rd ed. New Jersey : World Scientific, 2010. 512 p.
6. Cooper K. Rapid prototyping technology. Taylor & Francis Group, 2019.
7. Das S., Bourell D. L., Babu S. S. Metallic materials for 3D printing. *MRS bulletin*. 2016. Vol. 41, no. 10. P. 729–741. URL: <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.217>.
8. Evans B. Practical 3D printers: the science and art of 3D printing. Apress, 2012. 336 p.
9. Falce G. 3D print : the 3D printing manufacture: learn 3D printing. Independently Published, 2021.
10. Gebhardt A., Kessler J., Thurn L. 3D printing: understanding additive manufacturing. Hanser Publications, 2018. 204 p.
11. Harušinec J., Suchánek A., Loulová M. Creation of prototype 3D models using RAPID PROTOTYPING. *MATEC web of conferences*. 2019. Vol. 254. P. 01013. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925401013>

- 12.Jamieson R., Hacker H. Direct slicing of CAD models for rapid prototyping. *Rapid prototyping journal*. 1995. Vol. 1, no. 2. P. 4–12.  
URL: <https://doi.org/10.1108/13552549510086826>.
- 13.Jordan J. M. 3D printing. The MIT Press, 2019.  
URL: <https://doi.org/10.7551/mitpress/11800.001.0001>
- 14.Nasr E. A., Kamrani A. K. K. Engineering design and rapid prototyping. Springer, 2014. 467 p.
- 15.Noorani R. 3D printing: technology, applications, and selection. Taylor & Francis Group, 2017. 271 p.
- 16.Shrock C. R., Heather S. AutoCAD 3D modeling. Industrial Press, Incorporated, 2017. 296 p.
- 17.Soloman S. Additive manufacturing: advanced manufacturing technology in 3D print deposit. Industrial Press, Incorporated, 2015.
- 18.Spalter A. M. The computer in the visual arts. Reading, MA : Addison Wesley Longman, 1999. 500 p.
- 19.Torta S. 3D Printing: An Introduction. Mercury Learning & Information, 2018. 370 p.
- 20.Thomas G., Dacombe S., Sleep D. 3D make and print: everything you need to know about 3D printing. Future Publishing, 2021.
- 21.Wimpenny D. I., Kumar L. J., Pandey P. M. Advances in 3D printing & additive manufacturing technologies. Springer, 2016. 186 p.
- 22.Hausman K. K., Horne R. 3D Printing for Dummies. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2017. 416 p.
- 23.Kloski L. W., Kloski N. Getting Started with 3D Printing: A Hands-On Guide to the Hardware, Software, and Services That Make the 3D Printing Ecosystem. Maker Media, Incorporated, 2021.
- 24.Shrock C. R., Heather S. AutoCAD 3D Modeling. Industrial Press, Incorporated, 2017. 296 p.