

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ 3D ДРУКУ ІНЖЕНЕРНИМИ ПЛАСТИКАМИ

Виконав: студент 2 курсу, гр. АУТПм21-1
Тарапатов Артем Олександрович
(прізвище, ініціали)

Спеціальність

151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

освітньої програми Автоматизоване управління
технологічними процесами

(код і повна назва напрямку)

Тип програми Освітньо-професійна
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Косенко В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

14.12.2022

Тарапатов Артем Олександрович

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Автоматизоване управління технологічними процесами (код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____

Тарапатову Артему Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оптимізація технологічних параметрів 3D друку інженерними пластикамизатверджена наказом по університету від 07.11.2022 №1463Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____

3. Вихідні дані до роботи Пластики: ABS, PLA, CoPET, NYLON, TPU, Elasthan.

Параметри якості: механічна міцність, шорсткість, відповідність розмірів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1 Аналіз предметної області

4.2 Типи філаменту, що використовуються в друці за технологією FFF

4.3 Визначення впливу технологічних факторів на параметри якості друкованої моделі із інженерних матеріалів

4.4 Експериментальні дослідження

4.5 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (2022 КІТАМ Тарапатов А О презентація.pptx) – 17с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	07.09 – 14.09	виконано
2	Типи філаменту, що використовуються в друці за технологією FFF	15.09 – 05.10	виконано
3	Визначення впливу технологічних факторів на параметри якості друкованої моделі із інженерних матеріалів	06.10 – 18.10	виконано
4	Експериментальні дослідження	19.10 – 31.10	виконано
5	Охорона праці	01.11 – 10.11	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	11.11 – 16.11	виконано
7	Подання у ЕК	12.12	виконано

Дата видачі завдання

Студент

Керівник роботи

(підпис)

(підпис)

Тарапатов А.О.

проф. Косенко В.В.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи містить в своєму складі: 93 с., 3 табл., 96 рисунків, 2 дод., 14 джерел.

3D-PRINTER, FDM, FFF, FLEX, NYLON, CURA, PRUSA, МОДЕЛЮВАННЯ, 3D-ДРУК.

Актуальність теми – Сьогодні 3D-друк стає поширюваним явищем не лише в прототипуванні а й у різних сферах виробництва. Використання 3D-друку можливе в автомобілебудуванні, у військовій сфері, медичній тощо. Все це можливе за рахунок великої кількості типів пластиків, які мають власні фізичні характеристики, які можуть використовуватися для різного призначення.

Використання у виробництві пластиків різних інгібіторів та добавок роблять характеристики пластиків мінливими. Мінливість характеристик та великий набір різноманітних типів пластиків потребують визначення та оптимізації технологічних параметрів для отримання в друкованій деталі всіх необхідних якісних показників, що дозволять використовувати деталі в необхідних умовах.

Мета роботи – оптимізація технологічних параметрів 3D-друку інженерними пластиками та аналізу параметрів друку цими пластиками

Методи дослідження – в якості методів дослідження використовувалися змішані методи, що включають в себе емпіричний метод, зокрема використовувалися експериментальні дослідження, зрівняння, виміри та використовується регресійний аналіз.

Із теоретичного методу використовувалися аналіз, уявне модулювання, індукція та дедукція.

ABSTRACT

Explanatory note certification work contains in its composition: 93 page, 3 table applications, 96 drawings, 2 additions, 14 sources.

3D-PRINTER, FDM, FFF, FLEX, NYLON, CURA, PRUSA, MODELING, 3D-PRINT.

Relevance of the topic – Today, 3D printing is becoming a widespread phenomenon not only in prototyping, but also in various areas of production. The use of 3D printing is possible in automotive, military, medical, etc. All this is possible due to the large number of types of plastics that have their own physical characteristics that can be used for different purposes.

The use of various inhibitors and additives in the production of plastics makes the characteristics of plastics variable. The variability of characteristics and a large set of various types of plastics require the determination and optimization of technological parameters to obtain all the necessary quality indicators in the printed part, which will allow the parts to be used in the required conditions.

The purpose of the work is to optimize the technological parameters of 3D printing with engineering plastics and to analyze the parameters of printing with these plastics

Research methods – as research methods, mixed methods were used, including the empirical method, in particular, experimental studies, comparisons, measurements, and regression analysis were used.

Analysis, imaginary modulation, induction and deduction were used from the theoretical method.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень і термінів.....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз предметної області.....	12
1.1 Огляд і аналіз технології 3D-друку за технологією FFF.....	12
1.2 Параметри якості надрукованих моделей.....	23
1.3 Висновки до першого розділу.....	34
2 Типи філаменту, що використовуються в друці за технологією FFF.....	35
2.1 Вимоги до моделей надрукованих інженерними пластиками.....	35
2.2 Аналіз існуючих пластиків, що використовуються в технології 3D- друку FFF	38
2.3 Висновки до другого розділу	49
3 Визначення впливу технологічних факторів на параметри якості друкованої моделі із інженерних матеріалів.....	51
3.1 Визначення технологічних параметрів, що впливають на кінцеву якість друкованої моделі.....	51
3.2 Вплив температури стола та екструдера на друк інженерними пластиками	57
3.3 Вплив швидкості на вихідну якість отриманої моделі із інженерних пластиків.....	61
3.4 Вплив охолодження моделі на кінцеву якість отримуваної моделі.....	65
3.5 Висновки третього розділу.....	68
4 Експериментальні дослідження	69
4.1 Постановка задачі експериментальних досліджень	69
4.2 Багатофакторний регресійний аналіз	75
4.3 Висновки четвертого розділу.....	84

5 Охорона праці	85
Висновки	87
Перелік джерел посилань	88
Додаток А. Результати експериментальних досліджень та розробка математичної моделі проведеного дослідю	90
Додаток Б. Демонстраційний матеріал у вигляді презентації	94

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- КГП – кулько-гвинтові пари;
- ПЗ – програмний засіб;
- ПЕТФ – поліетилентерефталат;
- ЧПК – числове програмне керування;
- ABS – acrylonitrile butadiene styrene;
- CoPET – polyethylene terephthalate;
- FDM – fused deposition modeling;
- FFF – fused filament fabrication;
- PLA – polylactide;
- RAMPS – rewrap arduino mega pololu shield;
- TPU – thermoplastic polyurethane;
- 3D – 3 dimensions.

ВСТУП

В сьогоденні неможливо представити собі життя без використання 3D-принтера в розробці новітніх високотехнологічних приладів, для польоту в космос було розроблено друковані на 3D-принтерах двигуни, друк протезів для медичної сфери, використання 3D-принтерів для створення нових витворів мистецтва. На сьогодні, із-за доступності і дешевизни 3D-принтерів і матеріалів для друку, все частіше адитивний метод отримання нових деталей, шляхом друку їх на 3D-принтерах, стає все частішим та розповсюджується по світу кожного дня.

У все більших майстернях та промислових цехах з'являються 3D-принтери, що дозволяють створювати макети та готові вироби без витрат зусиль на виробництво. Наявність великої кількості різних матеріалів з різними властивостями розширюють можливу сферу використання 3D-друку. На сьогодні є пластики, які мають струмопровідні властивості, що дозволяє науці сьогодення зробити великий крок вперед і впровадити нові більш досконалі пристрої у життя.

Таким чином метою магістерської випускної кваліфікаційної роботи є знаходження параметрів та факторів, що впливають на кінцеву якість надрукованої моделі з інженерних матеріалів за технологією 3D-друку методом пошарового наплавлення ниток.

Об'єкт дослідження – технологія 3D-друку методом пошарового наплавлення ниток.

Предмет дослідження – якісні показники друку 3D-принтера.

Методи дослідження – експеримент, спостереження, аналіз, індукція, дедукція, математичний аналіз.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати необхідні умови для нашарування моделі;
- визначити частку впливу на вихідну якість кожного фактору;

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1] та керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2], методичними вказівками [3] та публікацією, що була надрукована в збірнику конференції: X Міжнародна науково-практична конференція Eurasian scientific discussions [електронне видання][4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Огляд і аналіз технології 3D-друку за технологією FFF

Сьогодні 3D-друк стрімко розвивається і стає все більш популярним. Його застосування можна побачити в медичних цілях, військових та багато інших галузях виробництва. Масове застосування 3D-друку набуло поширення у малосерійному та одиничному виробництві за рахунок простоти переналаштування і способів використання друківаних деталей.

На сьогодні є декілька поширених технологій і однією з них є технологія виробництва методом пошарового наплавлення ниток або fused filament fabrication [5].

Ця технологія використовує видавлювання через нагріте сопло пластику, що знаходиться у вигляді прутка, який при проходженні через сопло стає більш м'яким та вкладається шарами на поверхню робочої платформи. Принцип роботи даної технології зображено на рисунку 1.1.

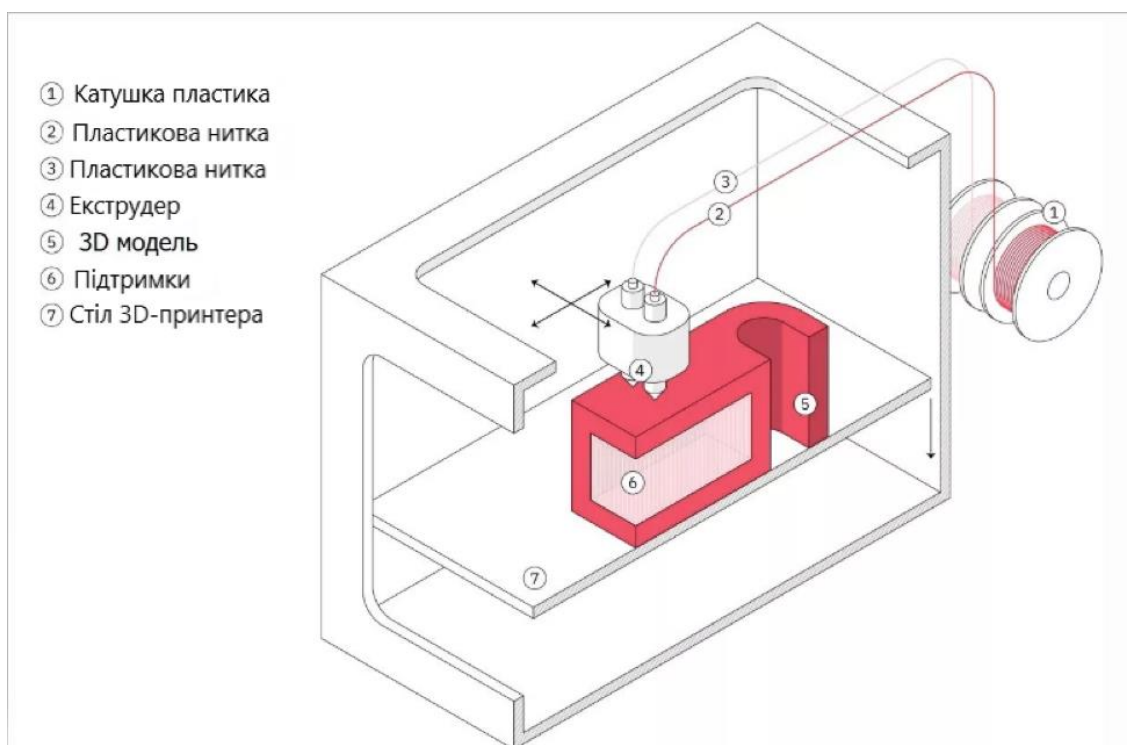


Рисунок 1.1 – Будова принтер по технології FFF

Для коректної роботи технології FFF було розроблене ПЗ, що переводить тривимірні моделі у набір команд, які виконуються принтером. Таке ПЗ отримало назву слайсер (рисунок 1.2). Воно відповідає за безпосереднє розташування моделі на платформі, його розміри та технологічні параметри, що будуть в подальшому виконуватися для даної моделі та принтера. Після налаштування параметрів, слайсер переводить тривимірну модель у G-Code, мову програмування для приладів з числовим програмним керуванням.

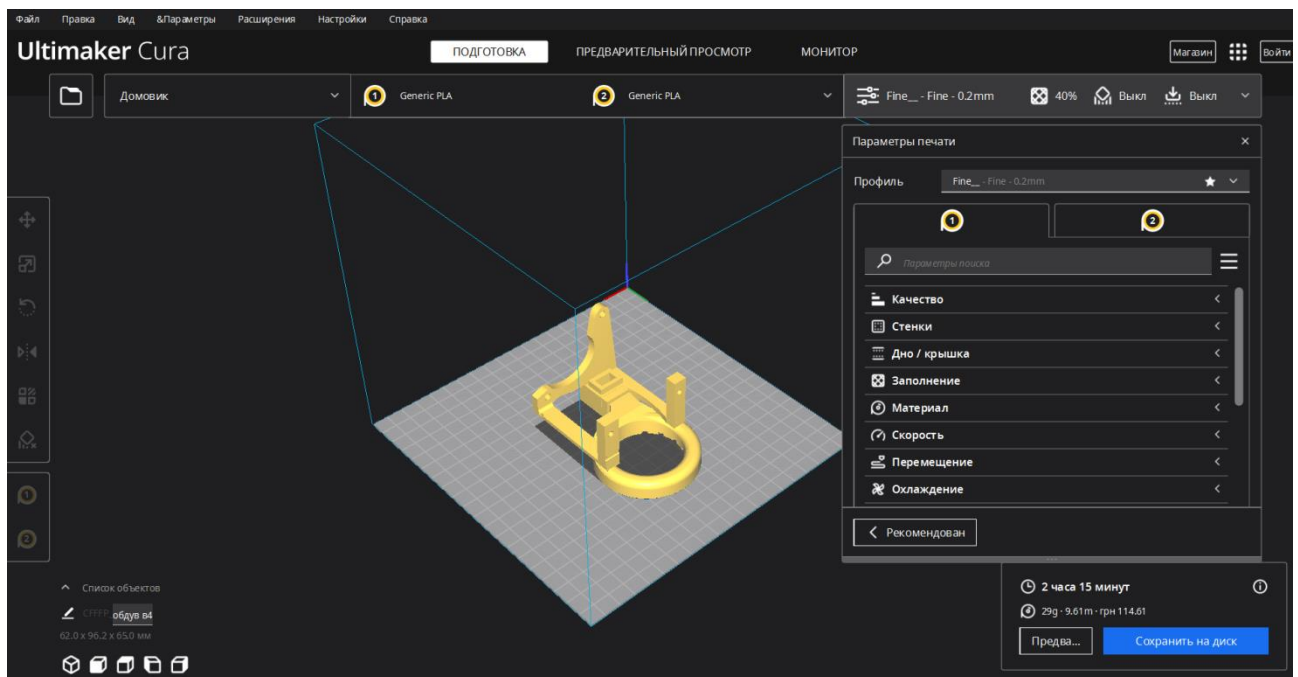


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд слайсеру

Ця мова програмування приладів керує нагрівом або охолодженням нагрівальних елементів систем, переміщенням по осям тощо. Прикладом даної мови програмування систем з ЧПК є команда `G1 Z0`, ця команда є основною та виконує переміщення трьох осей в координати `Z0`. Таким чином команди відправляються на плату керування, яка послідовно виконує їх. Приклад такого G-Code файлу можна побачити на рисунку 1.3. Команди є технологічними та основними. Технологічні команди змінюють інструмент, включають та виключають нагрівання екструдеру та столу, включають та виключають вентилятори тощо. Основні команди виконують переміщення робочого

інструмента – екструдера на каретці, керує параметрами екструдера, його системою координат [6].

```

;FLAVOR:Marlin
;TIME:13188
;Filament used: 17.6829m, 0m
;Layer height: 0.2
;MINX:34.625
;MINY:22.7
;MINZ:0.3
;MAXX:165.359
;MAXY:177.3
;MAXZ:26.1
;Generated with Cura_SteamEngine main
T0
M140 S50
M105
M190 S50
M104 S200
M105
M109 S200
M82 ;absolute extrusion mode
G28 ;Home
G1 Z15.0 F6000 ;Move the platform down 15mm
;Prime the extruder
G92 E0
G1 F200 E3
G92 E0
G92 E0
G92 E0
G1 F2400 E-6.5
;LAYER_COUNT:130
;LAYER:0
M107
G1 F600 Z1.3
;MESH:Wrench_Holder_Rev01.stl
G0 F3600 X51.703 Y30.928 Z1.3
;TYPE:WALL-INNER
G1 F600 Z0.3
G1 F2400 E0
G1 F2100 X52.092 Y30.278 E0.03779

```

Рисунок 1.3 – G-Code моделі для друку на 3D-принтері

Слайсер також має можливість керування діями принтера, нагрівом екструдера, стола, налаштуванням швидкості та прискорення. В функції слайсера також входить робота з моделлю, яка полягає в позиціюванні,

масштабуванні, модифікації та аналізу моделі. В результаті всіх маніпуляцій зі слайсером можливо коригування отримуваної якості вихідного виробу, його міцності. Швидкість друку можливо збільшити шляхом зменшення його заповнення (рисунок 1.4), що змінює внутрішню структуру моделі, його вихідну вагу та якість зовнішніх стінок та нависань. Зменшення заповнення часто приводить до зменшення фізичної міцності моделі.

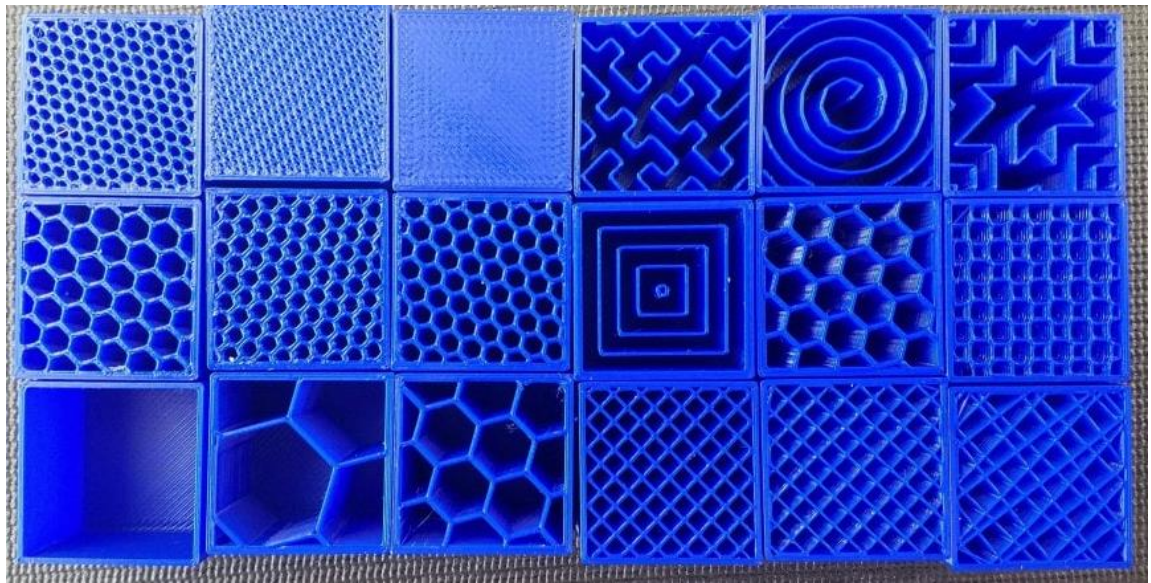


Рисунок 1.4 – Види заповнення друківаних моделей

Самі 3D-принтери будуються на основі плати Arduino Mega 2560 або STM32, які є платформами для автоматизації та побудови робототехнічних приладів з мовою програмування C++. Для використання їх у 3D-принтері було розроблено декілька відкритих прошивок, які виконують G-Code подібно до верстатів с ЧПК. Найпоширеніші прошивки мають назву Marlin та Repieter, які відповідають за безпосереднє керування принтером, встановлюють команди G-code, відповідають за швидкість осей та температуру сопла.

Прошивка налаштовує швидкість передачі даних, налаштовує вихідні порти для керування периферійними засобами, встановлює типи датчиків, встановлює тип механіки, що використовується в принтері, напрямок переміщення, кінцеві вимикачі тощо.

В складі принтера, прошивка виконує аналіз та перетворення файлів G-Code у фізичні дії та дає можливість отримувати друковані деталі з принтера. Типовий принтер зображений на рисунку 1.5.

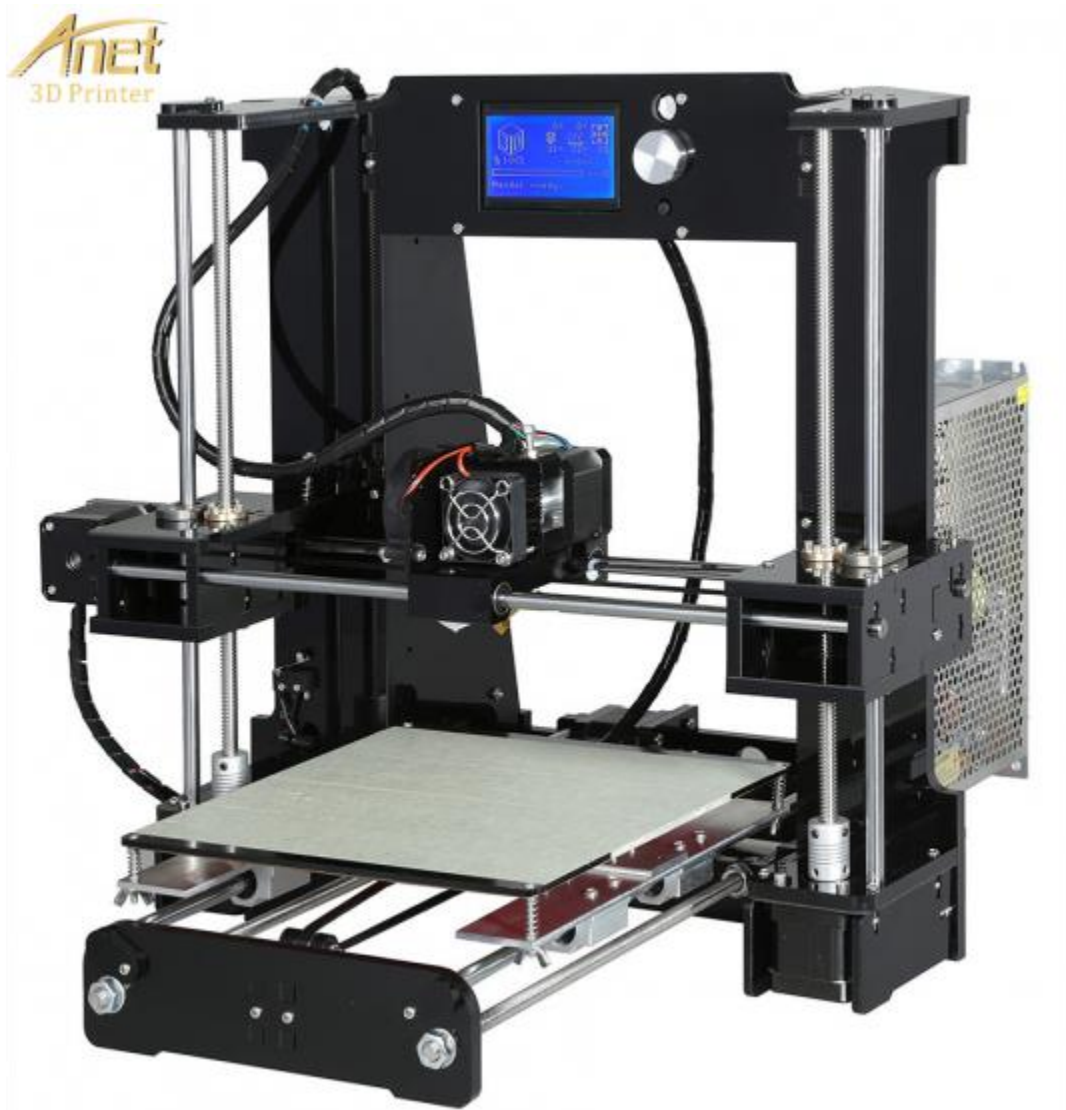


Рисунок 1.5 – 3D-принтер Anet A6

Всі принтери мають у своєму складі 3 осі, по яким виконується переміщення екструдера, самого екструдера, який включає в себе сопло, блок нагріву з електричним нагрівачем та термістором, що передає значення температури на головну плату, радіатор та вентилятор, який охолоджує радіатор. Конструкція екструдера зображена на рисунку 1.6.

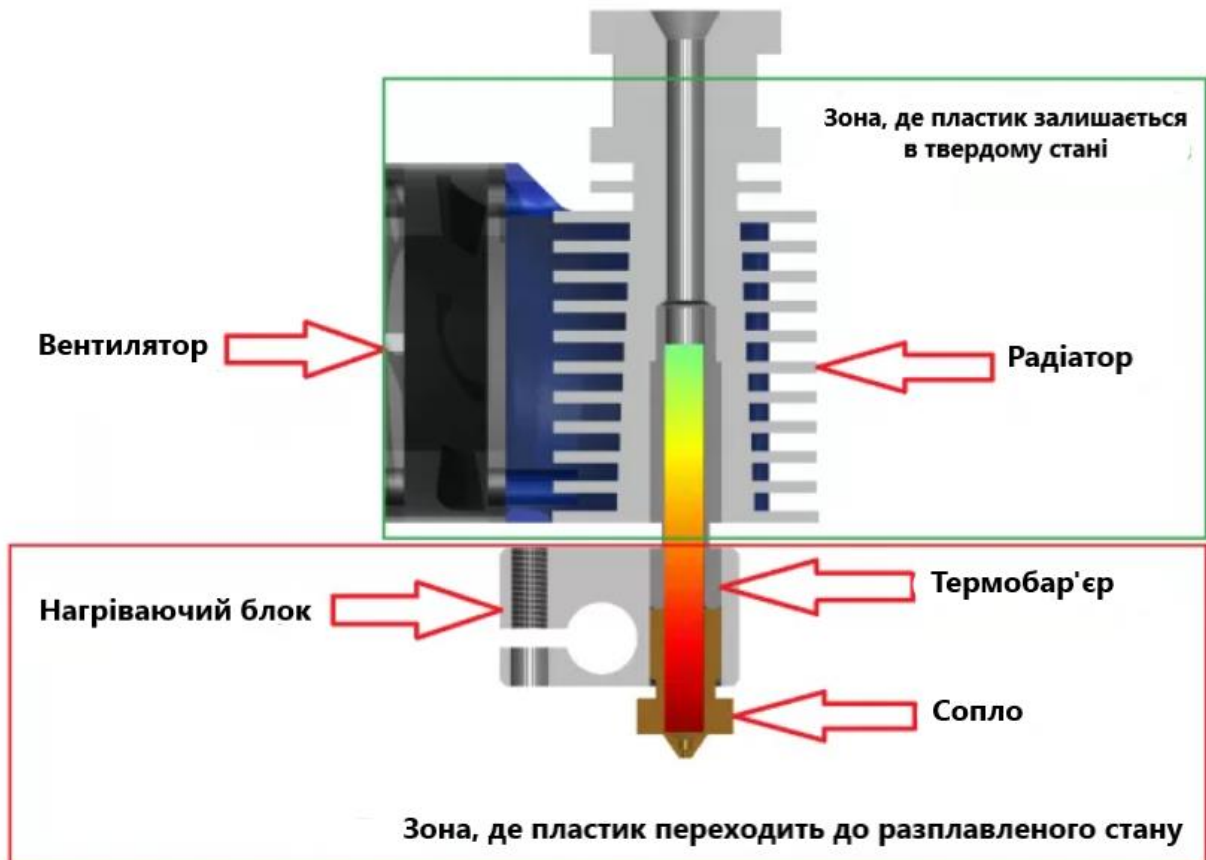


Рисунок 1.6 – Будова екструдера

Наступним елементом є електроніка принтера (рисунок 1.7), що включає в себе двигуни Nema 17 та драйвери, які виконують керування двигунами, забезпечуючи переміщення осей, блок живлення на 12В, плату керування Arduino Mega 2560 та RAMPS 1.4 або інші спеціальні плати, розроблені окремо для 3D-друку, що забезпечують управління та підключення всієї електроніки.

Керування температурою екструдера та стола виконується за допомоги термісторів, нагрівача в екструдері та поверхні стола з нагрівальними елементами. Обмеження осей забезпечується кінцевими вимикачами, що при натисканні посилають сигнали на центральну плату керування про припинення руху. Керування принтера виконується або через слайсери на ПК або через встановлений екран на самому принтері.



Рисунок 1.7 – Електроніка принтеру

3D-принтери за технологіє FFF можуть конструюватися за різними кінематиками, це може бути кінематика Prusa, що використовує два двигуна Z та один двигун на осі X та один двигун на осі Y. Зовнішній вигляд кінематики зображений на рисунку 1.8. Перевагами даної кінематики є простота конструкції та легке обслуговування, що не потребує розбору корпусу для доступу до основних компонентів. Недоліками конструкції є відкрита робоча камера, що робить друк деякими пластиками неможливим, інертність, що пов'язана зі столом, який переміщується по осі Y з великою швидкістю, в результаті чого друк високих та тонких моделей стає неякісним

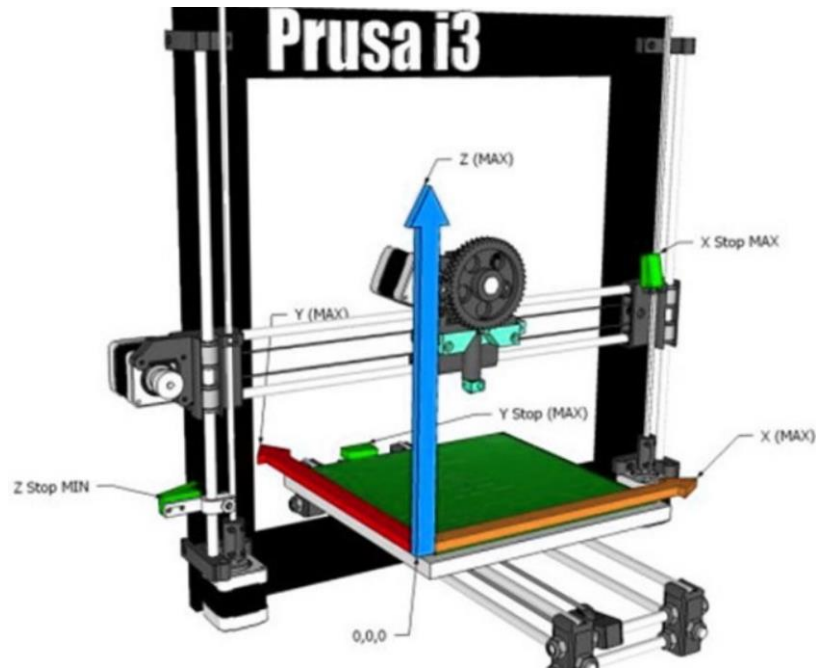


Рисунок 1.8 – 3D-принтер з кінематикою Prusa

Кінематика CoreXY, яка є альтернативою кінематиці Prusa, яка має в своєму складі два ремня, і переміщення робочої платформи не по осі Y, як у Prusa а по осі Z. Вісь X та Y знаходяться вгорі та змінюють координати самого екструдеру.

Схема кінематики зображена на рисунку 1.9.

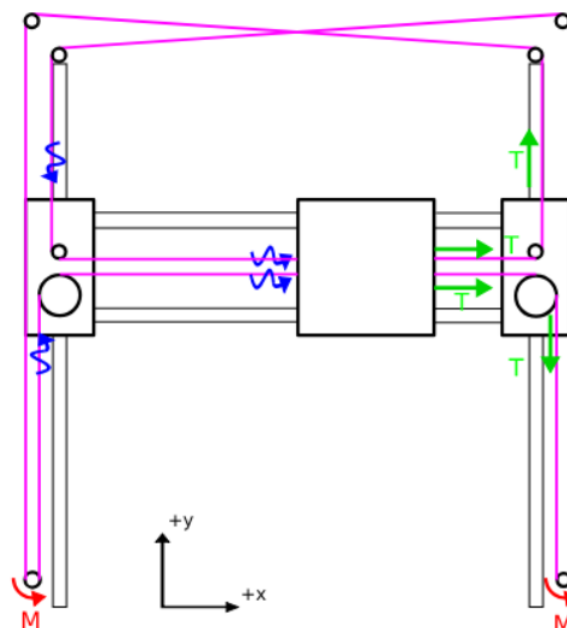


Рисунок 1.9 – Кінематика Core XY

Дана кінематика є більш швидшою ніж кінематика Prusa та більш точною. Недоліками є більш складна конструкція, яка збільшує складність обслуговування.

Використання великої кількості різних кінематик, які забезпечують різні можливі швидкості друку моделей та різну вихідну якість дає можливість підлаштовувати 3D-друк під необхідні задачі.

Також відмінність конструкцій полягає у використанні систем, що дозволяють друкувати декількома пластиками одночасно, такі принтери оснащені екструдером, що розрахований на два, три, чи більше пластиків. Конструкція екструдера з двома пластиками зображена на рисунку 1.10.

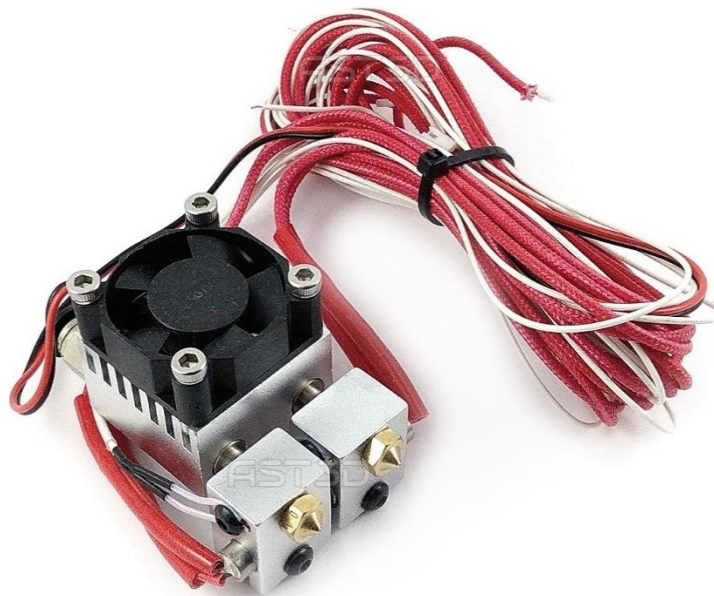


Рисунок 1.10 – Екструдер Химера, що розрахований на два пластика

Є декілька можливих конструкцій для друку декількома пластиками. Перша конструкція була зображена на рисунку 1.10. Це система, що має незалежні канали подачі пластика. В цій системі пластик не змішується, при використанні двох нагрівачів на нагрівальному блоку є можливість використання двох різних пластиків, що мають різні температури плавлення. Недоліками такої системи є складність калібрування висоти сопла відносно робочої платформи, яка повинна бути однаковою для обох.

Наступною конструкцією є система з екструдерами, що хитаються, які змінюють своє положення на робоче за допомоги двигуна або серводвигуна. Його перевагою є те, що поки один екструдер виконує друк, другий екструдер може бути менш розігрітим для зменшення витікання пластика з неактивного сопла та зменшення можливості неактивним екструдером зачепити модель. Схема побудови такої конструкції зображена на рисунку 1.11.

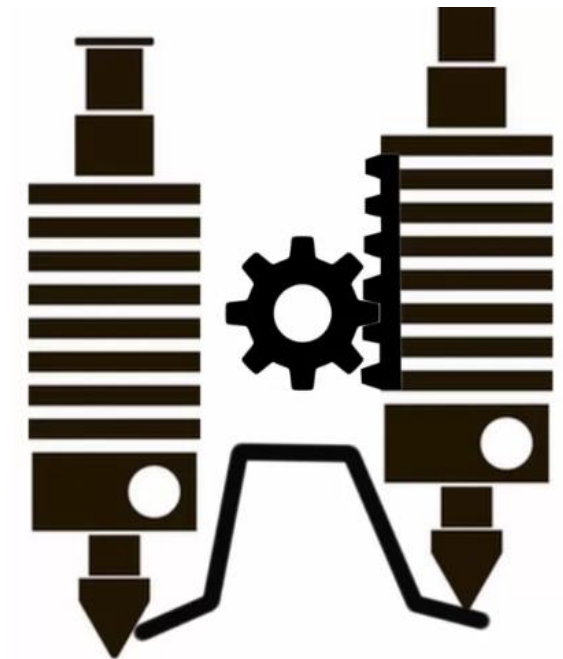


Рисунок 1.11 – Система хитаючих екструдерів

Наступною конструкцією є система зі змінними екструдерами, що отримала назву Tool Change. Де можливе використання до 7 змінних екструдерів, що знаходяться за межами робочої області, та використовуються по необхідності. Така схема має багато переваг. Першою перевагою є велика кількість змінних екструдерів, мала вага кожної окремої каретки з екструдером, що дає можливість швидшого друку аніж попередні варіанти. Недоліком є висока складність конструювання такої схеми та її налаштування. Ця система побудована на основі конструкції систем ЧПК з програмним керуванням (рисунок 1.12).

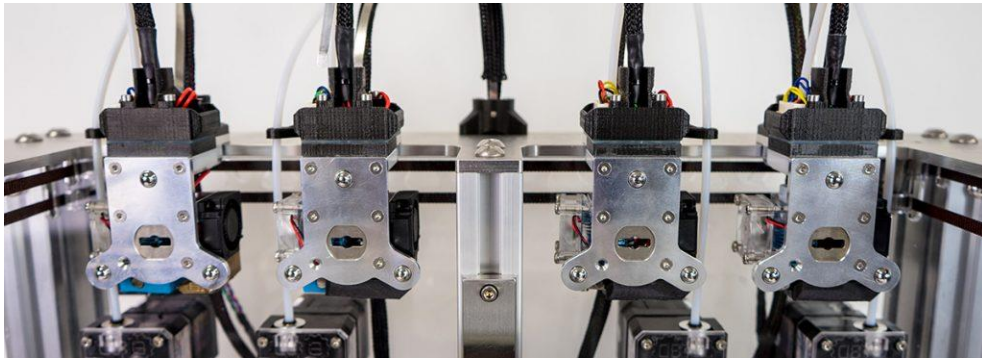


Рисунок 1.12 – Система Tool Change

Таким чином 3D-принтери можуть друкувати великою кількістю пластиків одночасно, використовуючи різні матеріали для заповнення, зовнішніх стінок та підтримок.

Однією з визначальних конструкційних особливостей є будова подачі пластику, яка виконує подачу пластику в зону розігріву. Будова подачі може бути двох типів, це будова bowden та direct. Bowden подача побудована з окремим розміщенням механізму подачі, що подає пластик в зону розігріву, пластик проходячи через механізм попадає в довгу тefлонову трубку, що направляє пластик до радіатора екструдера а далі в нагрівальний блок, де виконується розігрів та розплавлення матеріалу.

Direct подача знаходиться на каретці принтера та поєднана з екструдером, подача пластику після механізму подачі здійснюється безпосередньо в екструдер, скорочуючи шлях прутка та зменшуючи на нього навантаження. Конструкції обох типів подач зображені на рисунку 1.13.

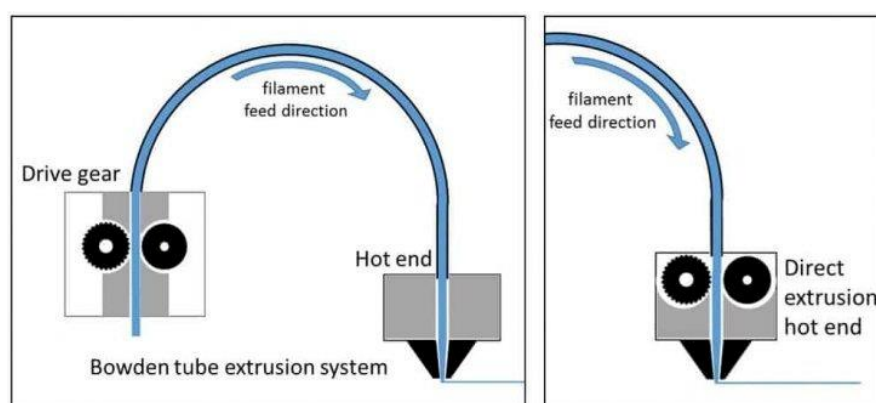


Рисунок 1.13 – Віддалена та пряма подачі пластику

Особливості використання конкретного типу подачі полягає у необхідності використання різних матеріалів. Такі матеріали як ABS, CoPET, PLA є достатньо жорсткими і для них використовується віддалена подача. Для матеріалів TPU, ELASTAN, які є гнучкими, віддалена подача буде створювати надломи на пластику, що ускладнить проходження через сопло та приведе до дефектів на поверхні або браку.

Таким чином на сьогодні існує багато видів принтерів, що мають різну конструкцію, різне застосування та можуть використовувати різні пластики для друку деталей з різними фізичними властивостями.

1.2 Параметри якості надрукованих моделей

На сьогодні проблема якості надрукованих моделей є дуже важливою. Від якості залежить не тільки зовнішній вигляд а й його цільове застосування. Використання моделей у відповідальних сферах, таких як медична, військова тощо. потребують чіткого дотримання встановлених параметрів якості. При недотриманні цих параметрів можливе виникнення аварійних ситуацій або загрози життю людини. Таким чином необхідно дослідити, отримувані за допомоги 3D-друку, вихідні параметри якості.

Першим параметром якості є відповідність встановлених розмірів. Цей параметр має важливе значення, він відповідає за збереження вихідних розмірів, отриманих при моделюванні деталі в САПР. Дані розміри також впливають на саму геометрію отримуваної моделі.

Відповідність встановлених розмірів залежать від кінематики принтера, його конструкції та використаних електричних та механічних компонентів, налаштуванні прошивки принтера, налаштування слайсеру, усадка матеріалу, та температури навколишнього середовища.

Кінематика принтера впливає на відповідність розміру за рахунок використання в своєму складі ременів, така як H-Vot, яка в своєму складі має один великий ремінь, який при переміщеннях по осям Y та при переміщенні по

діагоналі, при відсутності високої жорсткості конструкції дають скошення (рисунок 1.14), при якому основна робота буде виконуватися але вихідні розміри будуть змінені по всім осям або тільки по одній.

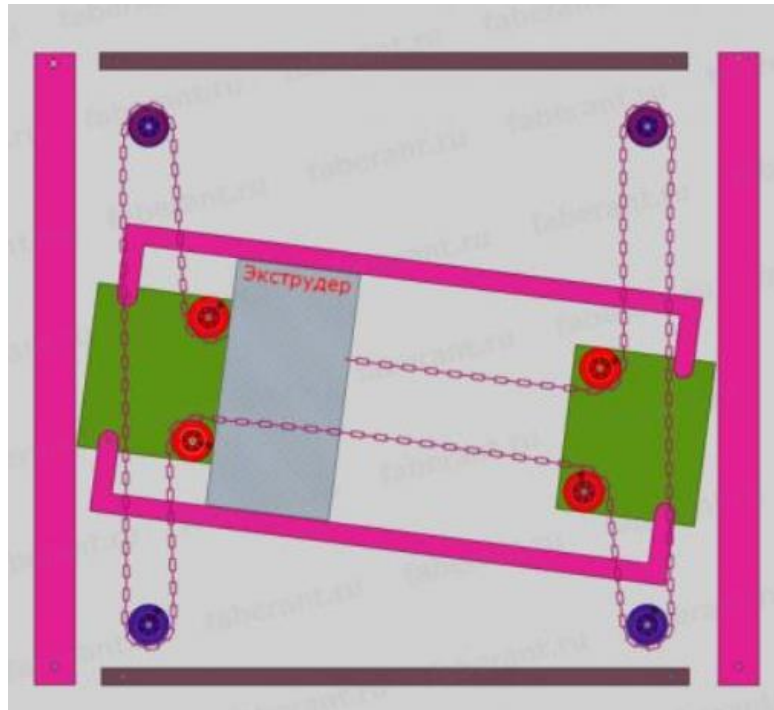


Рисунок 1.14 – Скошення при переміщенні у кінематики H-Bot

Конструкція принтера, до якої входить і кінематика сильно впливає на кінцеві розміри. Використання двигунів з різними характеристиками, використання кулько-гвинтової пари (КГП) та гвинт-гайки на осі Z, різних шківів тощо. Всі ці параметри напряду впливають на кінцеву відповідність розмірів. Точність принтера, що використовує в своєму складі двигуни, що мають 0.9° на оберт, будуть більш точними та будуть мати менше відхилення від встановлених розмірів аніж двигуни що мають 1.8° на оберт. Ці двигуни зможуть зробити більше кроків з меншим дискретним розміром. Використання КГП або гвинт-гайки на осі Z буде впливати на розміри моделі по осі Z. Використання високоточної КГП дає змогу друкувати з мінімальним шаром 50 мкм.

Для найбільш ефективного використання попередніх компонентів необхідно встановити драйвери, що керують двигунами. Є драйвери, що можуть дробити крок на $1/8$, що дасть мінімальний крок 100 мкм, а є драйвери що

дроблять крок на 1/256 (рисунок 1.15), що може дати мінімальний шар у 10 мкм і зменшити пошарове відхилення моделі від розмірів. Те ж саме відноситься до шківів на осі X та Y, при зменшенні кількості зубців, також збільшується точність друку. Таким чином конструкція принтера за виключенням кінематики також є важливим фактором в збереженні встановлених розмірів друкованої моделі.

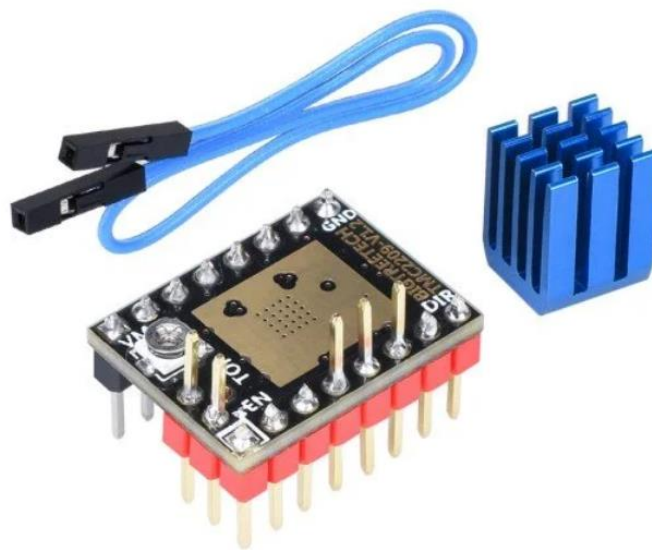


Рисунок 1.15 – Драйвер крокового двигуна TMC2209

Прошивка принтера напряму впливає на вихідні розміри друкованої моделі, в ній встановлюються швидкості друку та прискоренні осей, при неправильному налаштуванні яких будуть зменшуватися або збільшуватися розміри (рисунок 1.16), будуть створюватися дефекти поверхні. Наступним параметром, що впливає на розміри є налаштування `step_per_unit`, яка визначає якої довжини сигнал потрібно передати на двигуни, щоб вони перемістилися на 1 мм. Даний параметр залежить від використаних драйверів двигуна, його можливості дроблення кроку, крокового двигуна, та використаної гвинт-гайки, КГП або шківів.



Рисунок 1.16 – Зміна розмірів деталі

Слайсер налаштовує температуру екструдера, температуру робочої платформи, яка при невідповідності збільшить або зменшить усадку матеріалу, буде створюватися недоекструзія або переєкструзія пластику (рисунок 1.17), яка не тільки змінить розміри а й створить на поверхні дефекти.

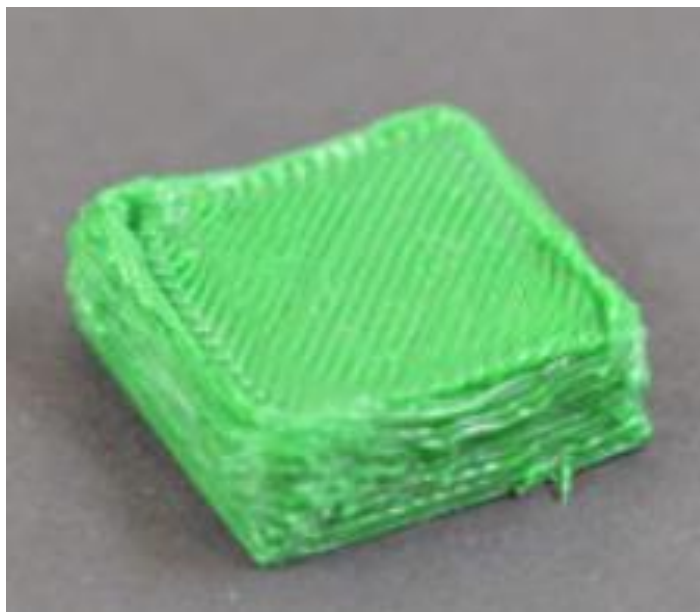


Рисунок 1.17 – Переєкструзія поверхні друкованої моделі

Також слайсер налаштовує розмір сопла, що встановлене в екструдері, цей параметр впливає на кількість пластика, що буде подаватися. В слайсері є параметри, що можуть компенсувати усадку, тим самим при неправильному налаштуванні можуть створити невідповідність розмірів.

Усадка та розширення матеріалу залежить від самого матеріалу, від його виробника, хімічного складу, від вологості та температури в приміщенні (рисунок 1.18), температури екструзії при друці. Як було зазначено вище, цей параметр можливо компенсувати налаштуванням слайсеру.

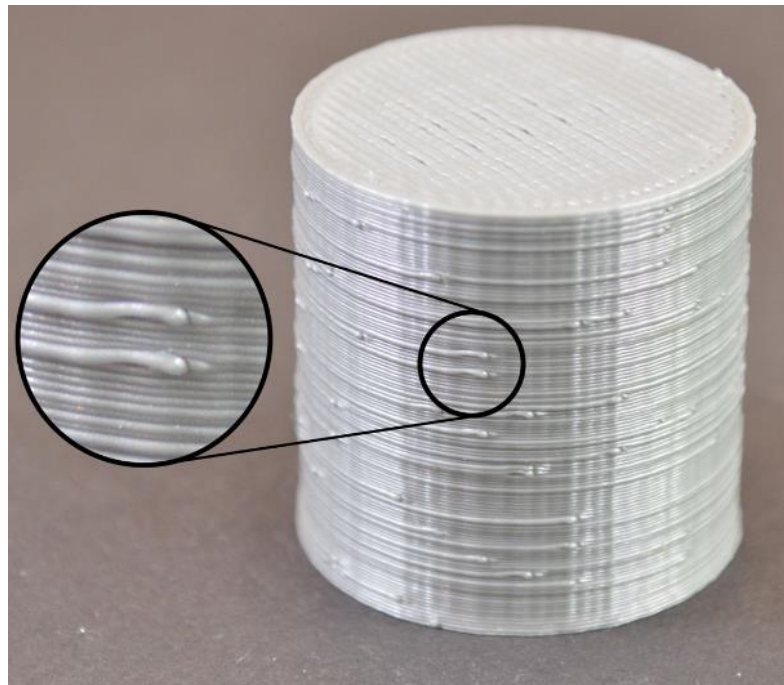


Рисунок 1.18 – Надрукована деталь вологим пластиком

Наступним параметром якості є шорсткість поверхні отримуваної деталі. В друкованих моделях шорсткість поверхні залежить від висоти шару, таким чином існує залежність між висотою шару та гладкістю поверхні. Прикладом може слугувати рисунок 1.19, де зліва зображено 200 мкм шар, посередині 100 мкм та з правої сторони – 50 мкм шар.

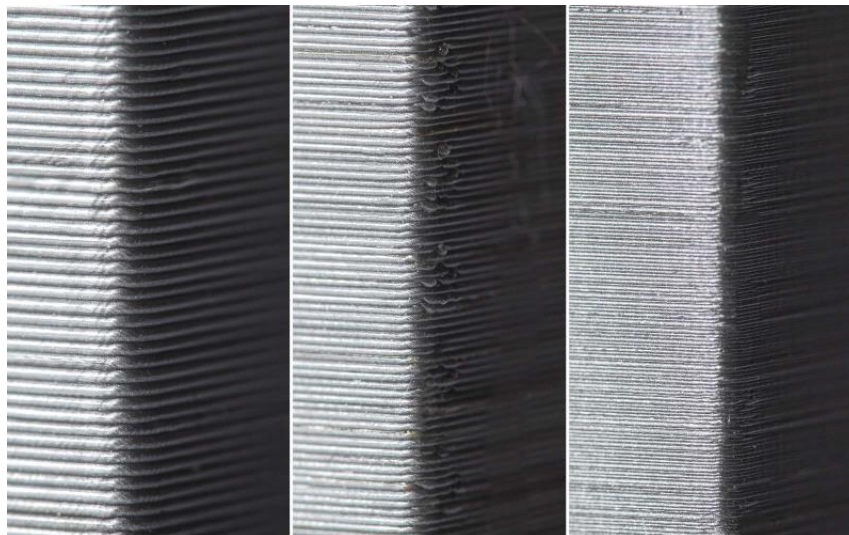


Рисунок 1.19 – Порівняння друкованих моделей з різною товщиною шару філаменту

До погіршення шорсткості поверхні може призвести коливання температури, неправильно налаштовані `Steps_per_mm`, із-за яких буде створюватися недоекструзія або переекструзія.

Збільшення швидкості може призвести до створення на поверхні ефекту вертикальних полос (рисунок 1.20), із-за можливого входження крокових двигунів в резонанс, що створить коливання каретки із-за пропуску кроків та втрати синхронності.

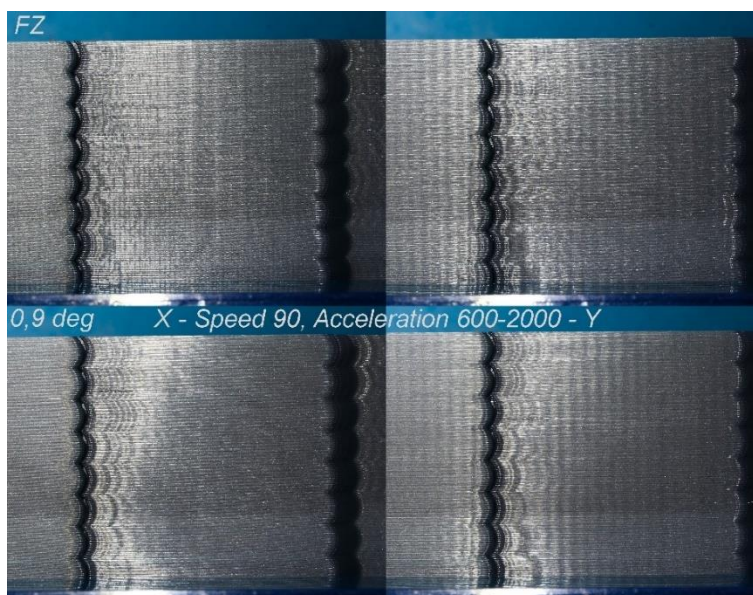


Рисунок 1.20 – Ефект вертикальних полос на надрукованій моделі

Шорсткість поверхні залежить від власних властивостей філаменту, який при друці може розширюватися або звужуватися, що дасть поверхню зображену на рисунку 1.21:

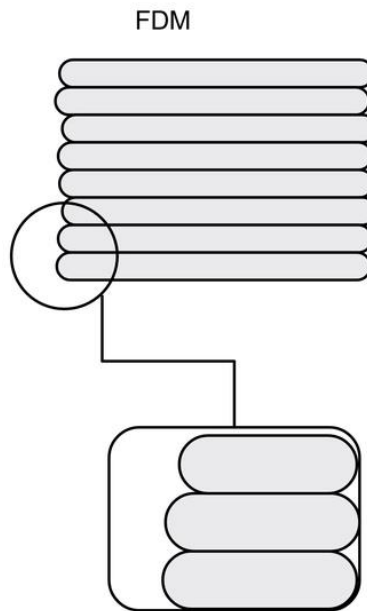


Рисунок 1.21 – Змішення шару в друкованій моделі

Дефект шорсткості може створюватися на горизонтальних та вертикальних отворах, так як програмне забезпечення принтера, перетворює коло на велику кількість прямолінійних відрізків, створюючи ефект ступінчастості (рисунок 1.22).

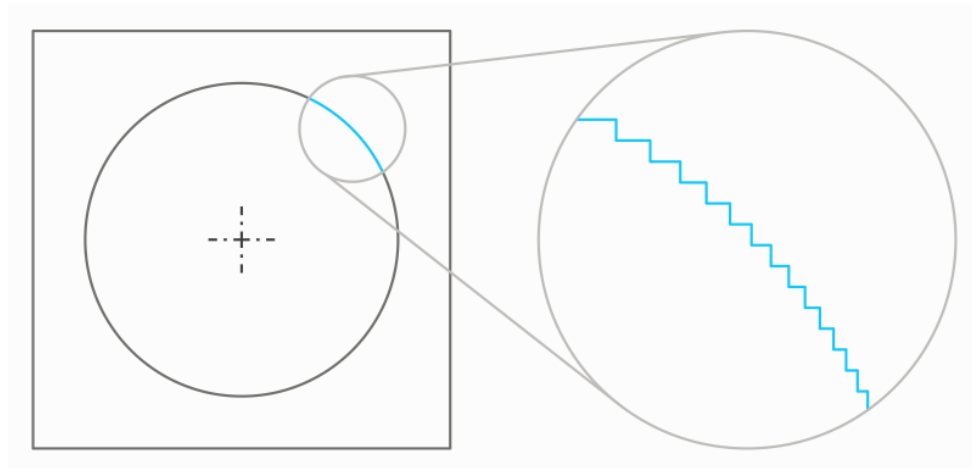


Рисунок 1.22 – Ефект ступінчастості в друкованих моделях

Модельована в слайсері шорсткість вертикальних отворів зображена на рисунку 1.23.

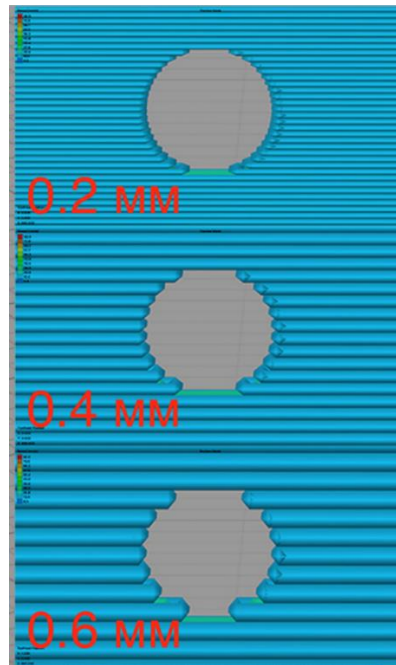


Рисунок 1.23 – Шорсткість поверхні, яка змодельована у слайсері

Використання розчинників для окремих філаментів здатне змінювати шорсткість поверхні, шляхом хімічного розплавлення поверхневих шарів моделі, тим самим роблячи поверхню глянцевою і гладкою. Прикладом є надруковані деталі з ABS пластику оброблені в ацетоні, що зображено на рисунку 1.24.



Рисунок 1.24 – Оброблені в ацетоні друковані моделі

Наступним параметром, що впливає на шорсткість поверхні є використане сопло екструдера (рисунок 1.25). Чим менше діаметр сопла, тим менша товщина нитки філаменту, що робить можливим друк більш точної форми стінок.



Рисунок 1.25 – Сопла, що використовуються в екструдері 3D-принтера

Мінімальним існуючим соплом, що використовують в FFF/FDM технології є сопло розміром 0.1 мм. Порівняння використання сопіл різного діаметра показано на рисунку 1.26. Зліва використане мінімальне сопло 0.1 мм, справа використане сопло 0.4 мм.

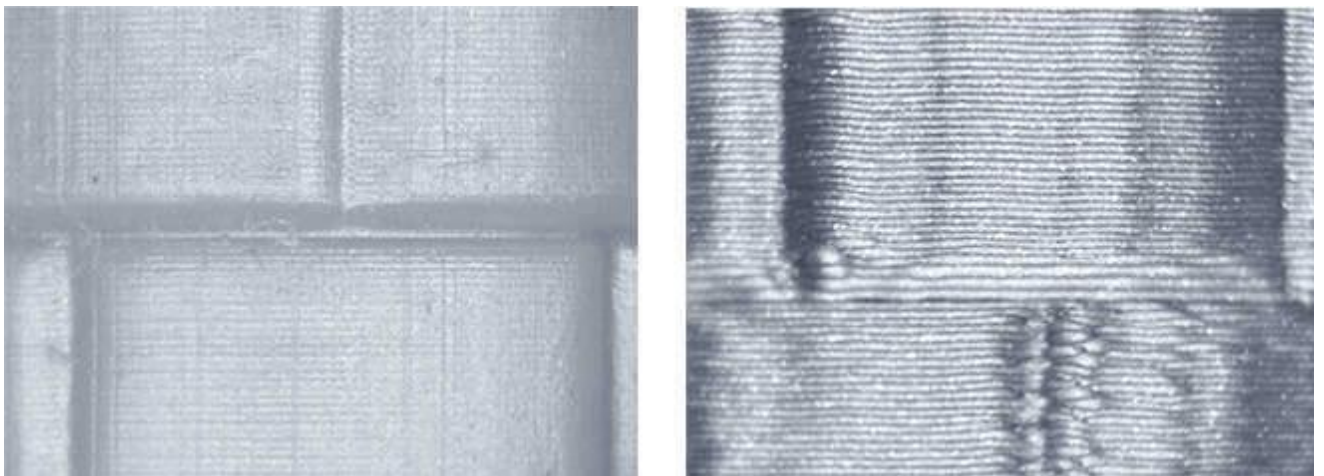


Рисунок 1.26 – Шорсткість поверхні з використанням сопла з різним діаметром

Також вплив розміру сопла на друковану модель можна побачити на рисунку 1.27, де показана різниця між товщиною стінок, надрукованих різними соплами.

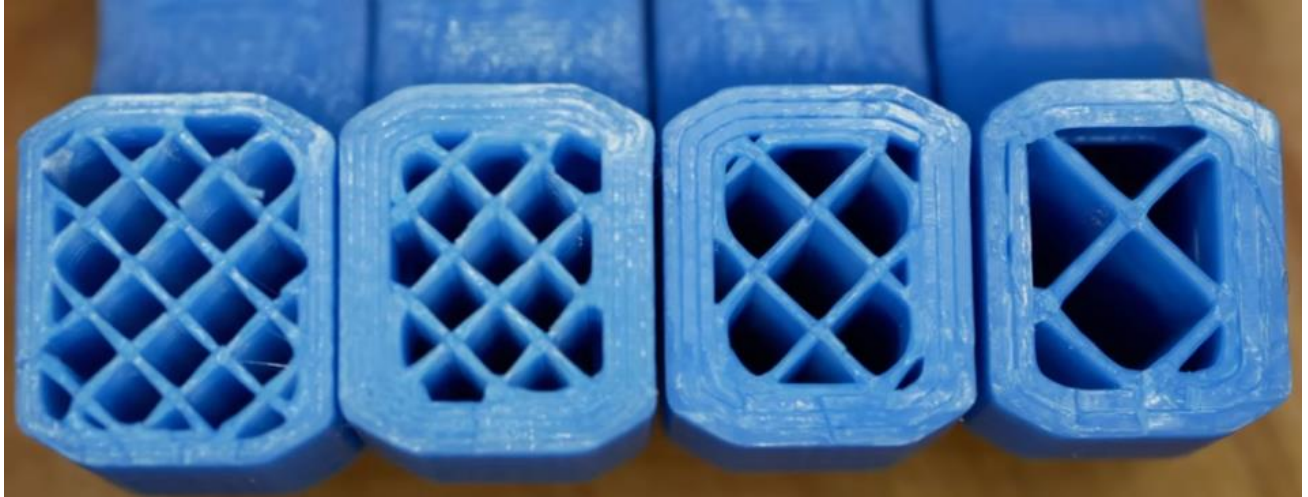


Рисунок 1.27 – Друковані моделі з різною товщиною стінок

Останнім параметром якості є міцність отримуваної деталі, яка також залежить від багатьох факторів.

Першим фактором від якого залежить отримувана міцність друкованої деталі є фізичні характеристики пластика. Прикладом може слугувати порівняння пластиків PLA та CoPET. PLA пластик за своїми характеристиками має твердість по Роквелу в 70-90 одиниць, відносне подовження при розриві має 3.8%, міцність на вигин має 55.3 МПа, міцність на розрив – 57.8 МПа. При цьому пластик CoPET має твердість по Роквелу в 106 одиниць, що є більшим ніж у PLA, відносне подовження при розриві має 50%, міцність на вигин має 76.1 МПа, міцність на розрив – 36.5 МПа. Таким чином за власними характеристиками CoPET пластик буде витримувати більше навантаження ніж PLA незалежно від технологічних параметрів друку.

Наступними фактором що впливає на міцність є товщина шару. Є залежність між розміром шару і отримуваної міцності, де чим менший шар друку тим деталь буде міцніша із-за більшої адгезії між шарами.

Міцність деталі залежить від використаного параметру налаштування слайсера, що має назву заповнення (рисунок 1.4). Заповнення створює внутрішню структуру деталі та її внутрішню геометрію. Чим більше заповнення, тим більша міцність друкованої деталі. Також міцність залежить від структури заповнення. Їх буває декілька типів: сітка, лінії, трикутник, шестигранник, концентричне, гироїд, блискавка тощо. Шестигранник та гироїд вважаються самими міцними заповненнями в 3D-друці.

Наступним фактором є товщина периметру, яка залежить від сопла і кількості ліній (рисунок 1.28). Чим більше товщина периметру, тим більше буде міцність вихідної моделі.

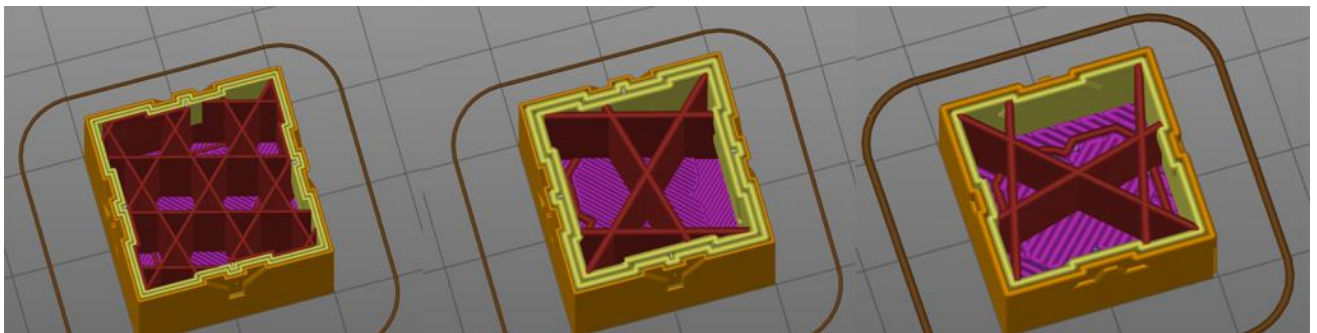


Рисунок 1.28 – Налаштування в слайсері параметру товщини стінок

Також міцність буде залежати від напрямлення прикладання зусиль на шари друкованої моделі. Якщо прикладати зусилля вздовж шарів, його міцність буде більшою ніж якщо прикладати зусилля поперек шарів (рисунок 1.29).

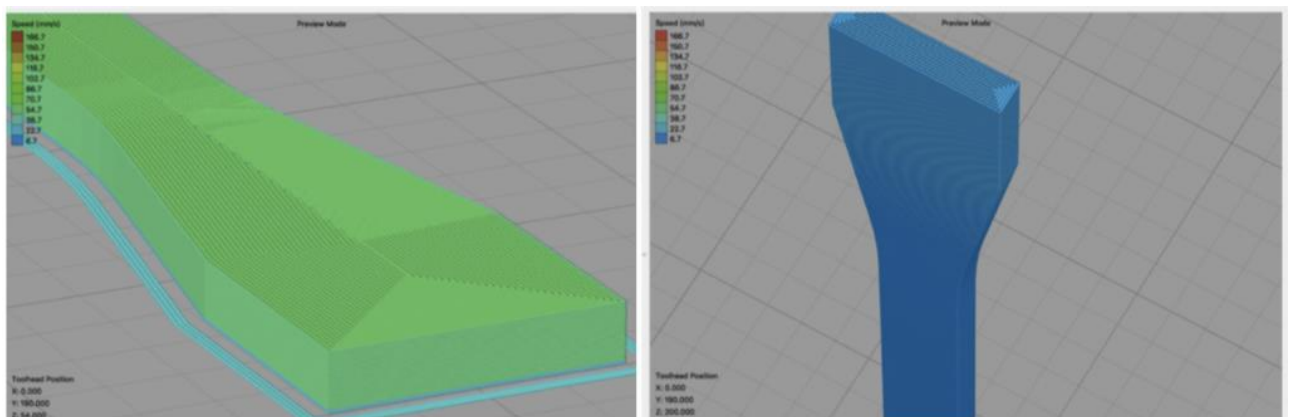


Рисунок 1.29 – Друк моделі з різним розташуванням шарів

Якщо брати тестову модель зображену на рисунку 1.30, отримаємо те, що модель помічена зеленим кольором, на згин буде більш міцною ніж синя модель, яка при невеликому зусиллі буде зламана з меншими зусиллями.

Останніми факторами що впливають на міцність друкованої деталі є температура друку та вологість пластику. При неправильно встановленої температури друку міцність деталі буде зменшено із-за поганого спікання шарів між собою, що може призвести до розшарування та деформації при прикладанні невеликих зусиль. Вологість створює в структурі пластика каверни, які зменшують міцність. Також вологий пластик втрачає задані властивості, що робить друк не міцним і призводить до дефектів.

1.3 Висновки до першого розділу

В результаті аналізу предметної області було :

- проаналізовано технологію 3D-друку за технологією FFF;
- визначені особливості, переваги та недоліки технології FFF та конструкції принтерів;
- проаналізовані параметри якості, які встановлюються для друкованих виробів та фактори що впливають на ці параметри.

2 ТИПИ ФІЛАМЕНТУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ДРУЦІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ FFF

2.1 Вимоги до моделей надрукованих інженерними пластиками

На сьогодні розвиток 3D-друку став настільки стрімким, що дозволяє його використання не лише для прототипування, а й для створення конструкційних деталей, що можуть бути використані в будь-якій сфері. Прикладом може слугувати автопромисловість, де друкуються корпуса повітряних фільтрів або інші необхідні деталі автомобілей. Таким чином, використання 3D-друку може бути застосоване влюбій сфері де необхідне використання виробів з пластику. Виходячи з вищесказаного, до виробів з пластику висуваються вимоги по дотриманні необхідних фізичних характеристик та параметрів якості, які були описані вище, що забезпечать його використання у необхідних умовах. Для різних сфер використання висуваються свої необхідні вимоги.

Інженерними пластиками називають пластики, що мають кращі фізичні властивості, та можуть використовуватися у відповідальних конструкціях, в деяких випадках, використані інженерні пластики можуть замінити собою вироби з металу та кераміки [7].

Інженерні пластики мають гарні механічні характеристики, добре оброблюються та мають чітку величину усадки, яку можна компенсувати на етапі підготовки до друку.

Також властивостями що відносять пластик до конструкційних є висока хімічна стійкість до розчинників та гарна зносостійкість. Наступними властивостями є висока термостійкість, при якій деформація пластика починається від 100°C.

Відношення до інженерних пластиків також забезпечується унікальними характеристиками, що дозволяють використання пластика в особливих умовах, прикладом яких є використання пластику з струмопровідними властивостями,

що дозволяють використовувати вироби як антистатичний або електромагнітний екран (рисунок 2.1).

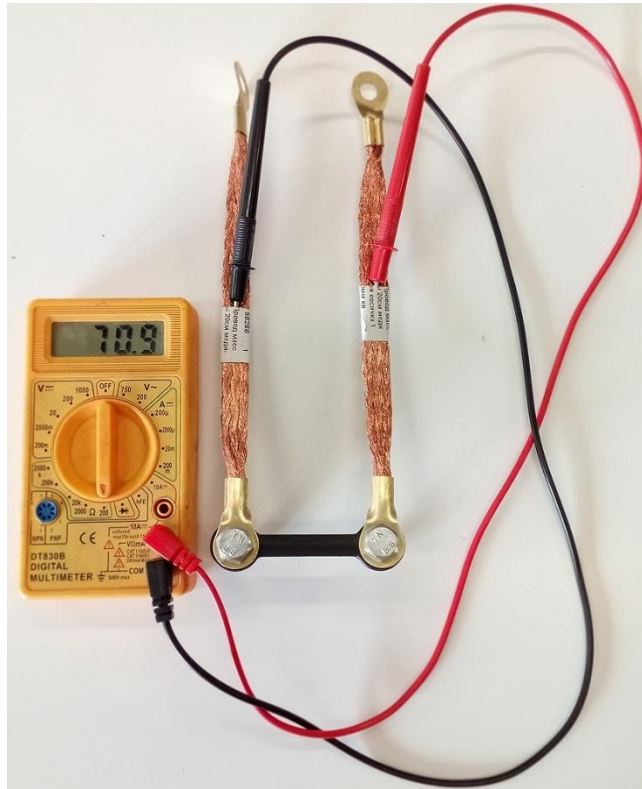


Рисунок 2.1 – Тестування струмопровідного пластика за допомогою мультиметра

Конструкційний пластик може слугувати для виготовлення майстер-моделей, що при литті не будуть залишати після себе попилу, що забезпечить якісне лиття у гіпсову форму (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Порівняння майстер-моделі і отриманого золотого виробу

Включення в склад пластика додаткових компонентів роблять зі звичайного пластика композиційний матеріал. Якщо додати порошок металу, отримуємо матеріал, який після друку можливо випекти та отримати на виході деталь, яка по своїм характеристикам буде наближена до металевих (рисунок 2.3).

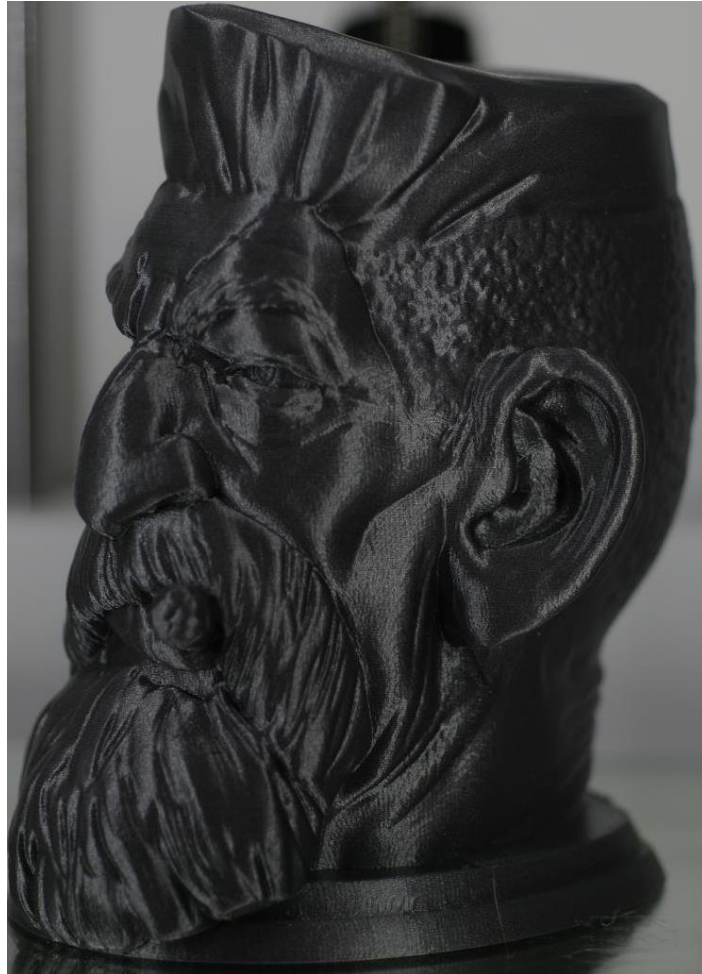


Рисунок 2.3 – Модель виконана із пластика з використанням алюмінієвого порошку

Використання наповнення подрібненими вуглецевими волокнами дає більшу жорсткість, стійкість до згинаючих навантажень та стиснення. Структура матеріалу PLA-CCF з вуглецевими волокнами зображена на рисунку 2.4.

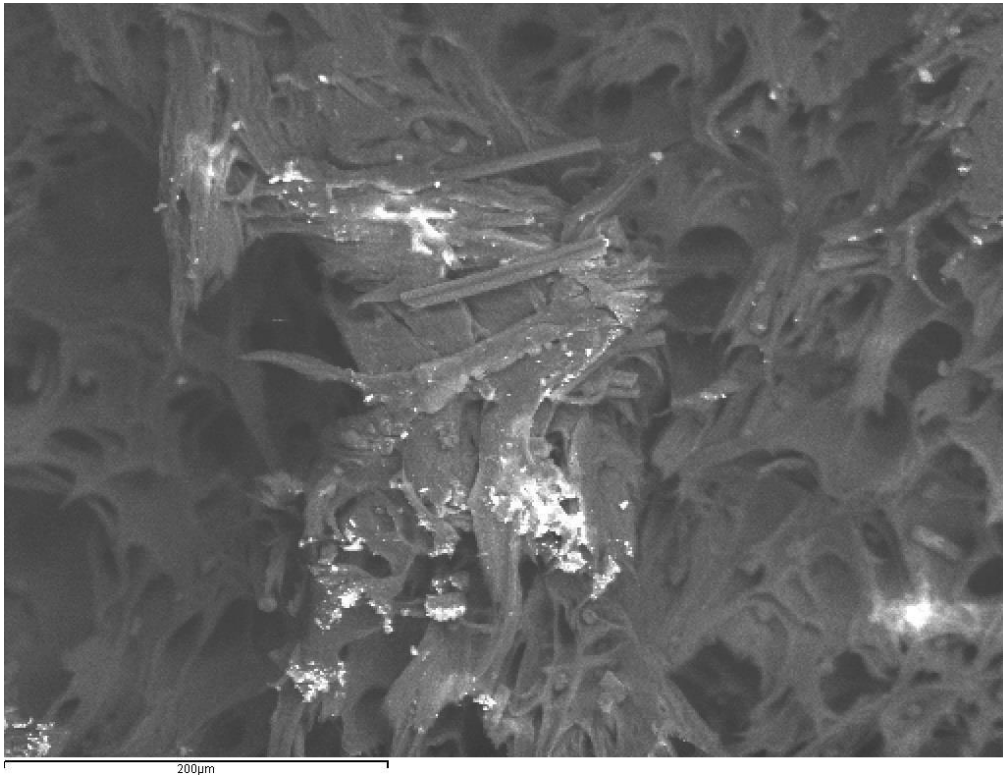


Рисунок 2.4 – Мікрофотографія мононитки PLA-CCF з подрібненим вуглецевими волокнами

Недоліком такого матеріалу є зменшення в'язкості під час друку, більше стирання сопла принтера, при зберіганні потребує більшої обережності із-за більшої крихкості нитки.

2.2 Аналіз існуючих пластиків, що використовуються в технології 3D- друку FFF

Однією з причин, які призвели до масового використання 3D-принтерів у всьому світі, стало створення великого різноманіття використовуваних матеріалів, що дають змогу отримувати деталі з потрібними характеристиками, властивостями та зовнішнім виглядом. Сьогодні весь пластик, що використовується в 3D-друці має вигляд прутка, що скручуються у бобіни (рисунок 2.5) В першу чергу пластики поділяються за зовнішнім діаметрі прутка, які можуть бути стандартні 1.75 мм та 3 мм. Пластики 1.75 є найбільш популярними на сьогодні по всьому світі.



Рисунок 2.5 – Пластик полікарбонат у бобінах для використання у 3D-принтері

Пластики, які використовуються для 3D-друку є термопластами, що можуть при нагріванні переходити в еластичний стан, що і забезпечує роботу технології. Виготовлення пластиків для 3D-друку виконується з гранул, які розігріваються до температури плавлення та проходять через екструдер, отримуючи на виході з сопла прутки потрібного діаметра, які в подальшому використовуються в 3D-принтерах. Таким пластиком є полілоктид, який скорочено має назву PLA, акрилонітрилбутадієнстирол, що скорочено має назву ABS, поліетилентерефталат-гліколь, який скорочено називається CoPET тощо.

Ці пластики мають різні фізичні властивості, мають різні параметри друку. Якщо робити порівняння між PLA та ABS, то отримаємо те, що PLA пластик має більш низьку температуру плавлення, яка становить 190-205°C в той час як ABS потребує температури у 235-240°C, для того щоб перейти у в'язко-текучий стан. По фізичним характеристикам ABS пластик є більш міцним та має характеристику ударостійкості, що забезпечує його використання у виробництві корпусних деталей тощо. PLA пластик створений на основі крохмалю кукурудзи та інших натуральних продуктів. У даного пластика відсутня токсичність, може використовуватися в харчовій промисловості [8].

Пластик PLA також має низьку усадку, не розчиняється в більшості розчиннів [9]. Його хімічна формула зображена на рисунку 2.6:

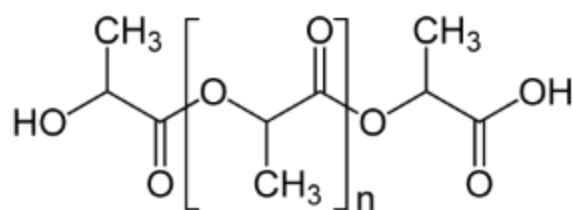


Рисунок 2.6 – Хімічна формула PLA

Оснівні параметри для друку цим типом пластиків, окрім температури сопла є температура робочого стола, яка становить 50-60°C, а в деяких випадках може зовсім не потребувати нагріву робочої платформи. Цей параметр забезпечується високою адгезією пластика. Також даний пластик не потребує використання закритого корпусу, що зберігає всередині принтера сталу температуру. Так як пластик має високу жорсткість, можливе використання як прямої так і віддаленої подачі, що розширяє перелік використовуваних 3D-принтерів.

Серед його недоліків відмічається погана оброблюваність після друку, деформація при низькій температурі, що становить 50°C, його висока крихкість, що не дає його використовувати в промисловості та його руйнування під дією ультрафіолетового випромінювання, що унеможливує його використання в навколишньому середовищі.

Таким чином, цей пластик є декоративним і найкращою сферою його застосування є вироблення декоративних виробів (рисунок 2.7), виробів харчової промисловості.



Рисунок 2.7 – Надруковані моделі різних кольорів із PLA

На сьогодні є модифіковані PLA пластики, які є флуоресцентними (рисунок 2.8) або які мають наповнення порошками різних матеріалів, це можуть бути як металевими порошками, такими як нікель, мідь, може бути наповнення графітом або деревиною для зміни їх механічних та декоративних властивостей.

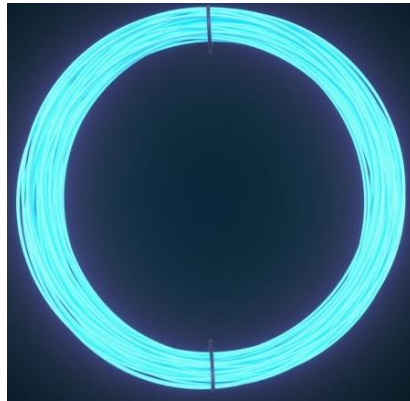


Рисунок 2.8 – PLA пластик з флуоресцентними властивостями

Як було зазначено вище, такі пластики, які мають наповнювач в своєму складі дають нові фізичні характеристики виробу. Прикладом є використання в PLA наповнювача графіту (рисунок 2.9), що дає поверхні низький коефіцієнт тертя і забезпечує антистатичні властивості. Жорсткість та теплостійкість у таких пластиках є вищими ніж у звичайних. Також такі пластики можуть взаємодіяти з радіохвилями, поглинаючи або екрануючи їх.



Рисунок 2.9 – Надрукована деталь з графітонаповненого PLA

АБС пластик на сьогодні є самим поширеним пластиком, що використовується у виробництві деталей під тиском. Його хімічна формула зображена на рисунку 2.10:

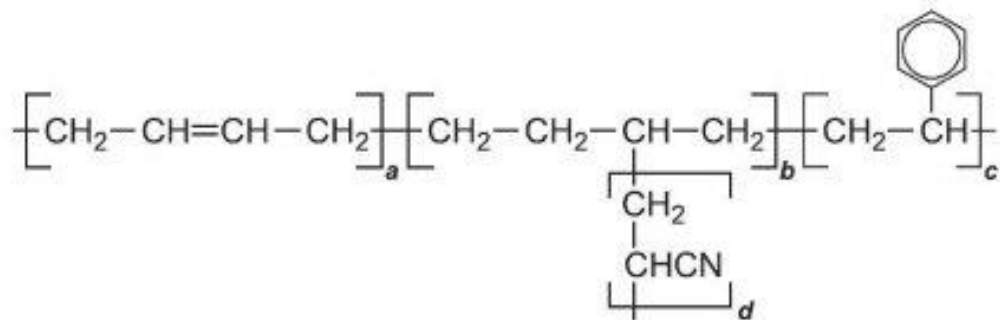


Рисунок 2.10 – Хімічна формула ABS

ABS це потрійний співполімер, його отримують полімеризацією стиролу з акрилонітрилом в присутності полібутадієну. Пропорції можуть варіюватися від 15 до 35% акрилонітрилу, від 5 до 30% бутадієну і від 40 до 60% стиролу. Співполімер стиролу (полістирол), бутадієну (каучук) і акрилонітрилу (SAN-пластики) зібрав в собі всі переваги цих полімерів. У даній комбінації акрилонітрил додає поверхневу твердість і стійкість до корозії, бутадієн забезпечує ударну в'язкість і міцність, а стирол надає матеріалу твердість.

Як було зазначено вище, він має гарні фізичні властивості, що забезпечує його використання як інженерного пластику для конструювання корпусних деталей тощо. В 3D-друці його властивості залишилися незмінними, але з'явилися особливості його використання. Однією з основних особливостей є його погана міжшарова адгезія, що призводить до частого пошкодження деталей (рисунок 2.11) та його велика усадка, що ускладнює друк габаритних моделей та потребує врахування кінцевих розмірів ще на стадії підготовки моделі до друку.



Рисунок 2.11 – Брак моделі, надрукованої з пластика ABS

ABS пластик потребує високої температури стола, яка повинна становити 90-100°C та використання принтера з закритим корпусом, що буде запобігати зміні температури в принтері під час друку. Даний пластик можливо оброблювати та склеювати ацетоном, що розчиняє зовнішні стінки моделі і робить їх гладкими і глянцевиими (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Порівняння зовнішнього вигляду моделей до і після ацетону

Використання виробів з ABS пластика можливе в широкому діапазоні температур і максимальною температурою для даного пластика є 130°C , після якої пластик починає деформуватися. Ультрафіолетове випромінювання є також шкідливим для виробів з ABS, тому для довгого використання деталі її необхідно фарбувати. Вироби виготовлені з ABS пластика зображені на рисунку 2.13.



Рисунок 2.13 – Деталі надруковані з ABS пластика

СоPET пластик є найбільш міцним серед розглянутих, при друкі відсутня усадка матеріалу, висока міжшарова адгезія, стійкість до УФ, можливість

використання в широкому діапазоні температур, не потребує закритої камери та прямої подачі.

Його хімічна формула зображена на рисунку 2.14:

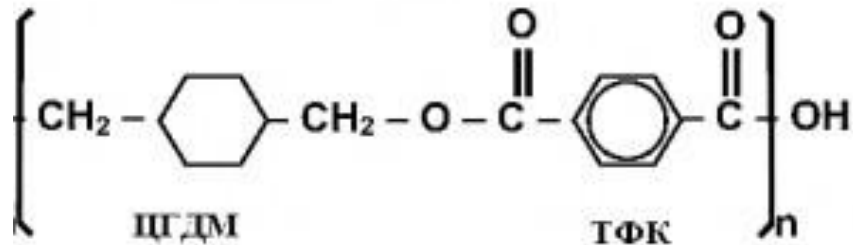


Рисунок 2.14 – Хімічна формула пластика CoPET

CoPET – інженерний пластик, який одержують введенням до складу базового полімеру (ПЕТФ, PET) 1,4-біс гідроксиметил циклогексана. Має гарну удароміцність та високі антифрикційні властивості. (рисунк 2.15). Відсутність токсичних елементів дає можливість використання його в харчовій промисловості [10].



Рисунок 2.15 – Надрукована з CoPET пластику шестерня

Із недоліків можна зазначити його високу текучість, що впливає на технологічні параметри друку та важкість постобробки. Цей пластик може бути хімічно оброблений діхлорметаном, що також як і ацетон для ABS пластику,

розплавляє зовнішній шар деталі. Має високу гігроскопічність, що ускладнює його зберігання.

Основними параметрами для друку пластиком CoPET є 235-240°C для екструдера та 50 °C для стола. Можливе використання як віддаленої так і прямої подачі.

Наступним пластиком є FLEX або як ще його називають TPU – термополуретан.

Це еластичний інженерний пластик, що схожий на резину. Використовується для виготовлення гнучких виробів. Має велику міцність на розрив та удар, жаростійкий, температура, при якій відбувається деформація становить 110°C. По своїм хімічним властивостям масло-бензостійкий. Має високу стійкість до стирання [11]. Температура екструдера для друку моделі становить 220-240°C, температура стола, яка є необхідною для друку, становить 90-110°C. Приклад використання FLEX пластику можна побачити на рисунку 2.16.

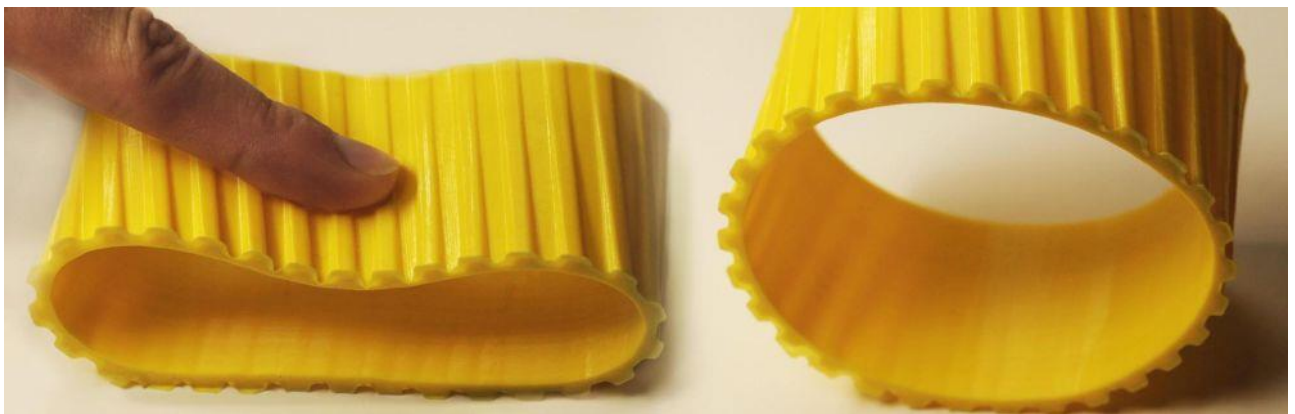


Рисунок 2.16 – Модель надрукована FLEX пластиком

Основними недоліками даного пластику є складність його друку та необхідність прямої подачі за рахунок великої гнучкості, що призводить до неможливості їм друкувати. Гнучкість даного пластику залежить від виробника та може бути як більш гнучкою, так і менш гнучкою.

Наступним інженерним пластиком є Nylon, синтетичний матеріал з сімейства поліамідів. Його хімічна формула зображена на рисунку 2.17:

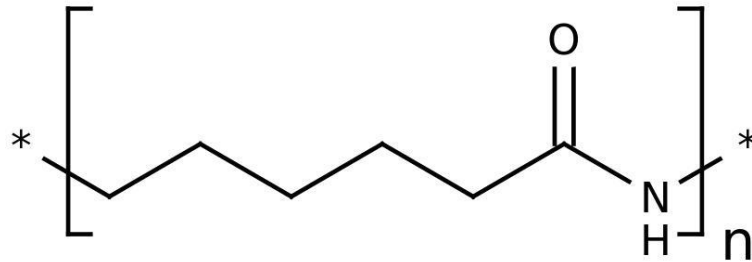


Рисунок 2.17 – Хімічна формула пластику Nylon

Має велику стійкість до стирання, що визначає його основне застосування – використання у вузлах кінематичних пар, має високу міцність, еластичність. Має високий коефіцієнт ковзання. Термостійкий та має високу стійкість до розчинників. Добре піддається постобробці. По сукупності фізичних характеристик є найбільш міцним пластиком серед усіх інших [12].

Недоліками пластику є висока усадка, висока гігроскопічність пластику, який без попереднього висушування неможливо буде друкувати. Потребує прямої подачі та закритої камери.

Основними параметрами друку є температура екструдера, що становить 240-260°C, ускладнюючи друк на звичайних екструдерах із-за використання в складі екструдера тефлонової трубки, у якої максимальна температура становить 270°C, що призводить до швидшого виходу екструдера з ладу. Температура стола становить 90-100°C. Деталі, що надруковані з пластику Nylon, зображені на рисунку 2.18.



Рисунок 2.18 – Модель надрукована із пластика Nylon

Наступним пластиком є HIPS, що розшифровується як high impact polystyrene або ударостійкий полістирол. Даний пластик є високостійким з високою термостійкістю. По своїм параметрам HIPS близький до пластику ABS. Його хімічна формула зображена на рисунку 2.19. Це аморфний матеріал, що являє собою співполімер стиролу з полібутадієном або іншими синтетичними каучуками, а, також, суміш співполімерів стиролу. Збільшення вмісту каучуку збільшує ударостійкість матеріалу, в цілому [13].

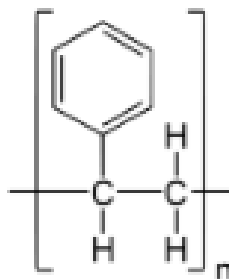


Рисунок 2.19 – Хімічна формула пластика HIPS

Із недоліків має високу усадку, деформацію та неприємний запах при охолодженні. Основною особливістю пластика є його повна розчинність в

составі D-Limonene (рисунок 2.20), що робить його гарним матеріалом для друку підтримок разом з ABS за допомоги двухекструдерних принтерів.

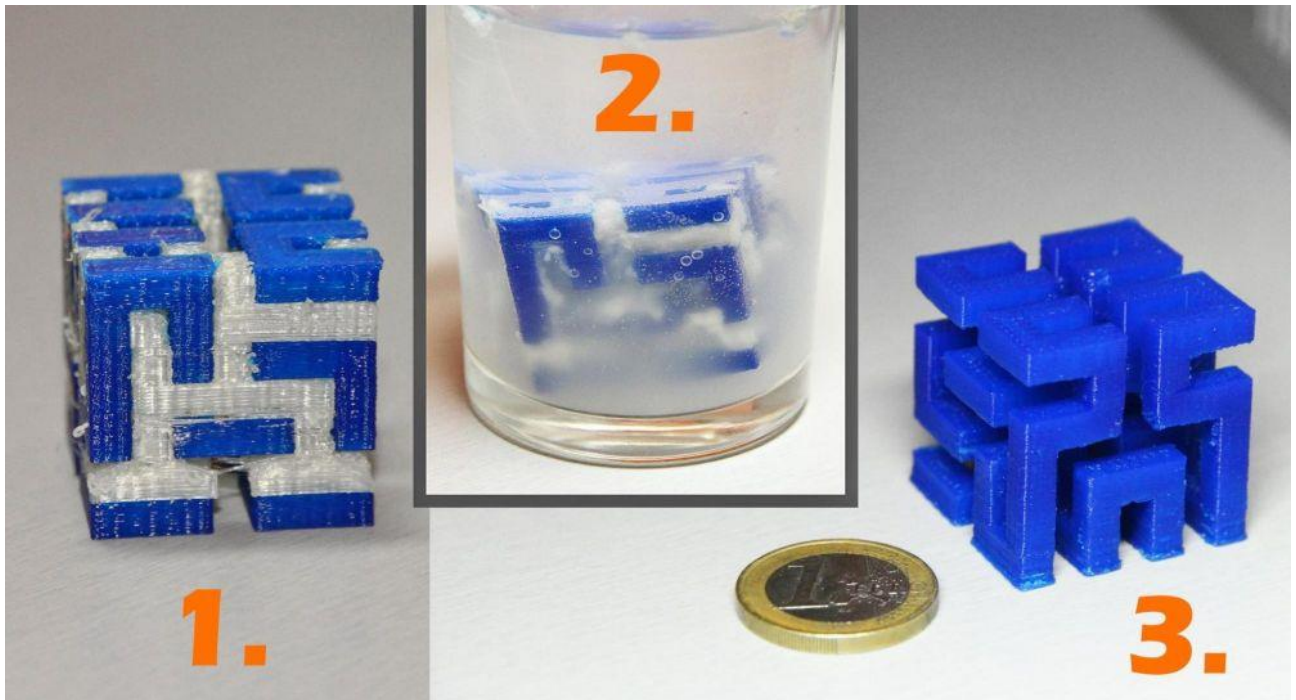


Рисунок 2.20 – Розчинений в D-Limonene пластик

Таким чином, на сьогодні для 3D-друку може використовуватися велика кількість різноманітних матеріалів для великої кількості сфер застосування, це може бути харчова сфера, медична, промисловість, та багато іншого.

Різноманіття технологічних параметрів спонукає розробників принтерів шукати нові більш вдосконалені конструкції, що будуть більш швидко друкувати моделі з найменшим отримуваним числом браку.

2.3 Висновки до другого розділу

В результаті аналізу вимог до інженерних пластиків та аналізу існуючих на сьогоднішній день доступних для 3D-друку типів філаменту було визначено, що основними інженерними пластиками є ABS, Nylon, CoPET, TPU та композиційні матеріали на основі всіх інших пластиків, які мають унікальні характеристики. До інженерних пластиків висуваються високі фізичні вимоги,

вимоги до температур, після яких пластик починає деформуватись, наявність хімічної стійкості до розчинників тощо.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ ДРУКОВАНОЇ МОДЕЛІ ІЗ ІНЖЕНЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Визначення технологічних параметрів, що впливають на кінцеву якість друкованої моделі

На сьогодні майже всі технологічні параметри встановлюються в слайсері. Для друку тестових моделей було вибрано слайсер Cura. Cura дає можливість швидко та просто налаштувати необхідні параметри (рисунок 3.1).

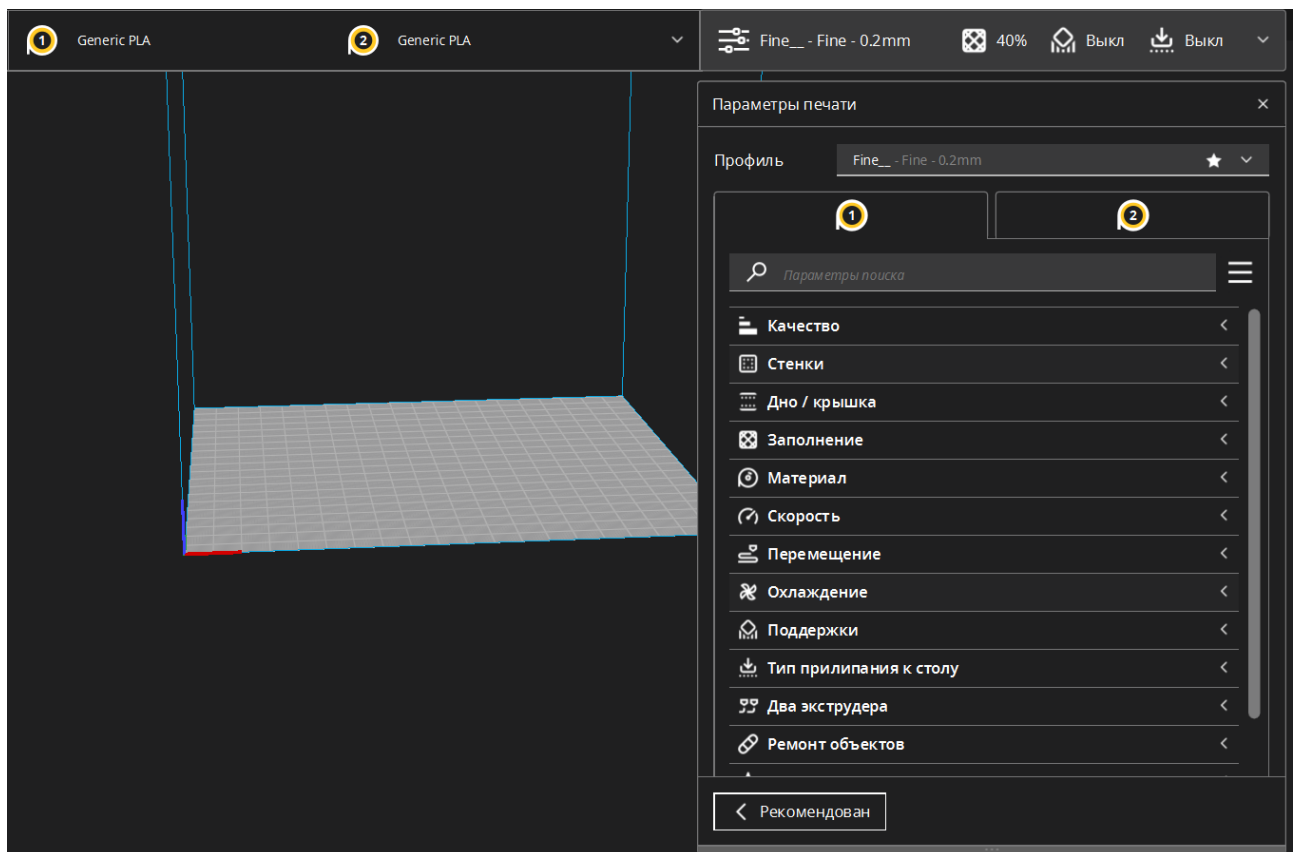


Рисунок 3.1 – Вікно налаштування параметрів Cura

Вкладка якість відповідає за висоту шару друку, висоту першого шару, ширину лінії (рисунок 3.2). Висота шару впливає на шорсткість поверхні та на час друку. При меншій висоті шару покращується шорсткість та збільшується

час друку. Звичайне налаштування цього параметра становить не менше $\frac{3}{4}$ від діаметру сопла.

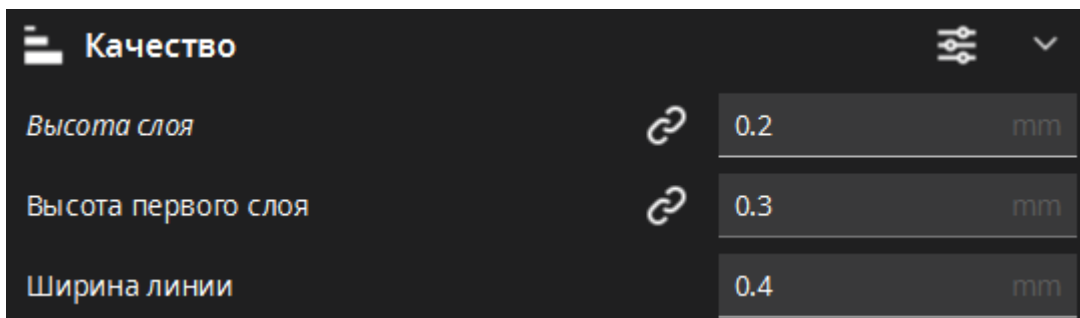


Рисунок 3.2 – Налаштування вкладки якості в слайсері Cura

Висота першого шару впливає на адгезію першого шару до столу, при збільшенні даного параметра адгезія збільшиться, пластик добре приліпиться до столу, заповнить собою всі нерівності робочої платформи. Зменшення параметра створить більш широкий перший шар, що вплине на фізичні розміри, та після закінчення друку необхідно буде виконати постобробку.

Ширина лінії зазвичай відповідає розміру сопла, якщо змінювати цей параметр, лінії будуть вкладатися або більш щільно, що добре вплине на міцність деталі при зменшенні параметру або будуть створюватися пропуски - при збільшенні, що негативно вплине на механічну міцність.

Таким чином основним параметром, що впливає на кінцеву якість отримуваної деталі є висота шару. Цей параметр є загальним для всіх пластиків.

Результат друку з різними параметрами зображений на рисунку 3.3.

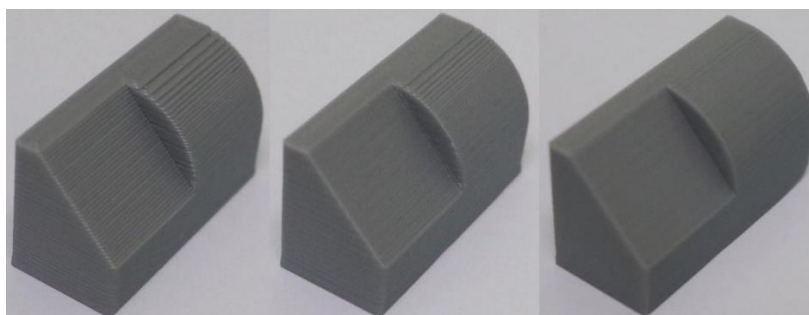


Рисунок 3.3 – Надруковані деталі з товщиною шару 200 мкм, 100 мкм та 50 мкм

Вкладка стінки (рисунок 3.4) включає в себе товщину стінок та кількість ліній стінок. Товщина стінок є похідним від товщини лінії та кількості ліній стінок. Кількість ліній стінок впливає на кінцеву міцність отримуваної деталі. Чим більше ліній, тим міцніша буде деталь. Горизонтальне розширення невілює усадку матеріалу, створюючи отступи від кожної поверхні.

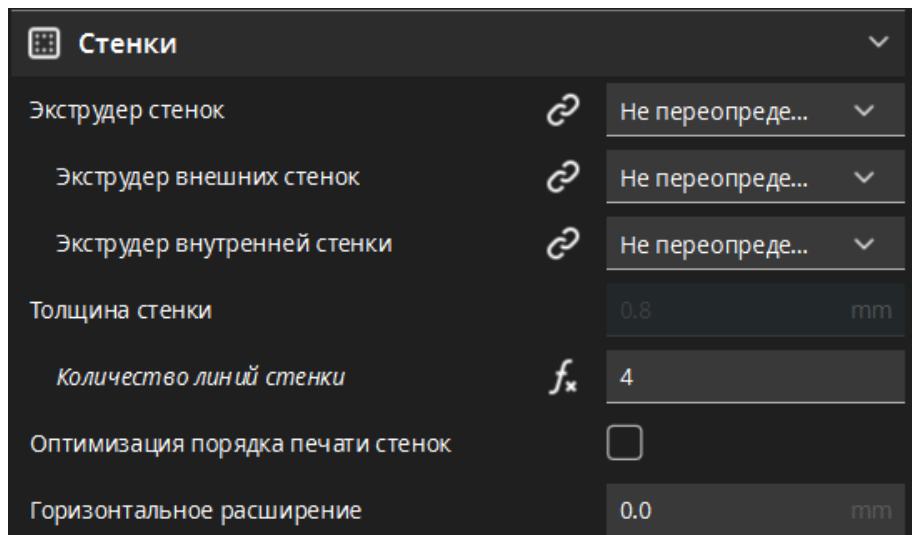


Рисунок 3.4 – Вкладка стінки в слайсері Cura

Наступною вкладкою є дно/кришка (рисунок 3.5). Цей параметр відповідає за товщину кришки та товщину дна, чим більше значення цих параметрів, тим більша міцність буде в отриманій деталі.

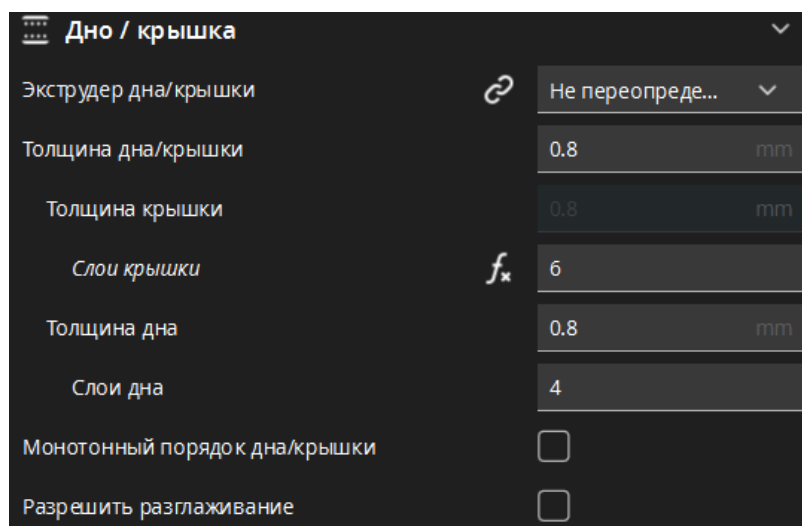


Рисунок 3.5 – Вкладка Дно/кришка

Вкладка заповнення відповідає за тип заповнення, щільність тощо. Параметри вкладки зображені на рисунку 3.6.

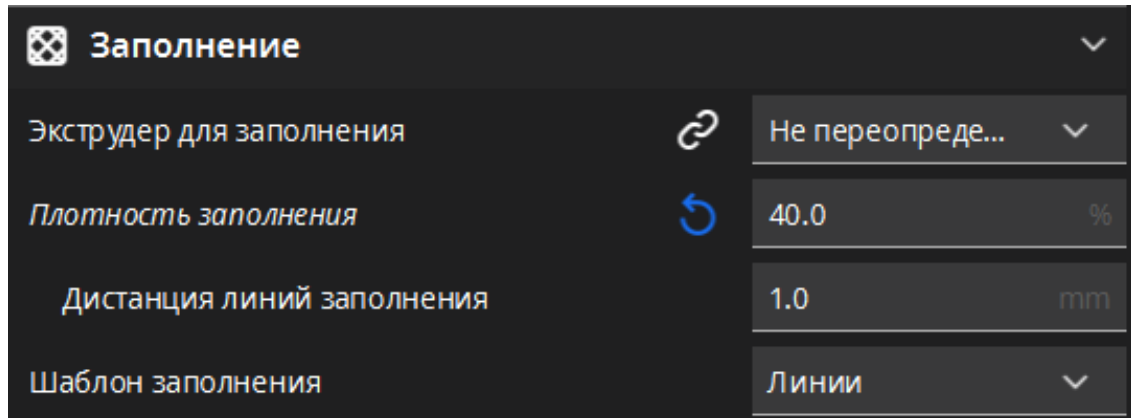


Рисунок 3.6 – Вкладка заповнення

Чим більша щільність заповнення, тим міцніша буде надрукована деталь. Типи заповнення зображені на рисунку 1.4.

Вкладка матеріали встановлює температуру сопла та температуру стола (рисунок 3.7).

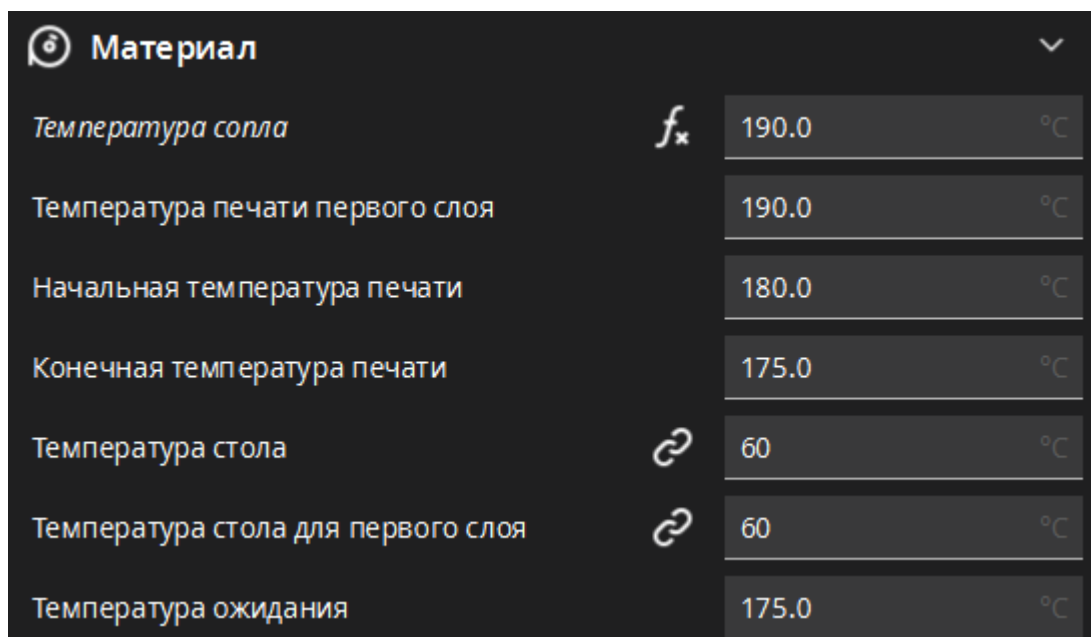
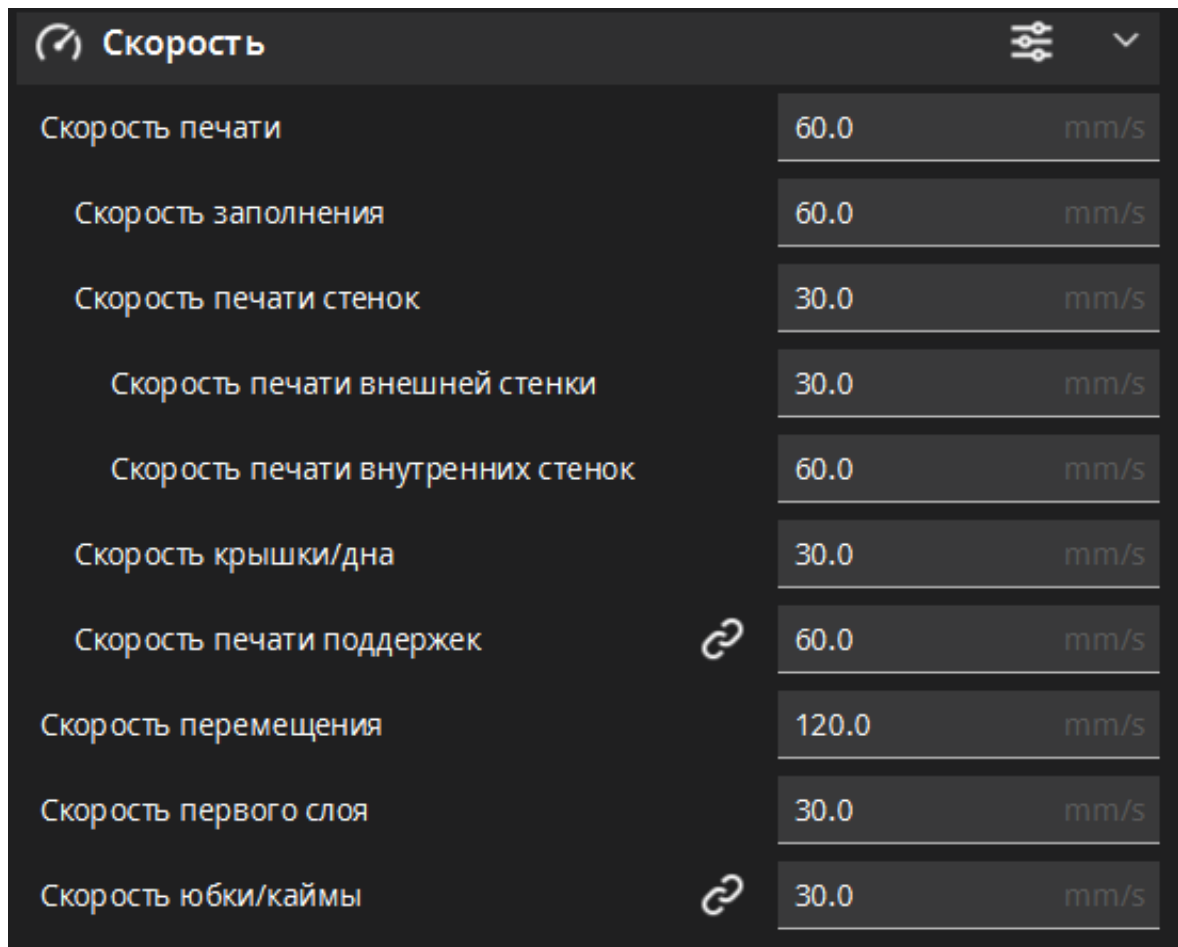


Рисунок 3.7 – Вкладка матеріали в слайсері Cura

Цей параметр є основним для друку різними матеріалами і вплив його є значним. Температура першого шару впливає на адгезію матеріалу до стола, зазвичай цей параметр повторює чи трохи перевищує температуру друку.

Вкладка швидкість є наступним основним параметром для друку (рисунок 3.8).



Скорость		
Скорость печати	60.0	mm/s
Скорость заполнения	60.0	mm/s
Скорость печати стенок	30.0	mm/s
Скорость печати внешней стенки	30.0	mm/s
Скорость печати внутренних стенок	60.0	mm/s
Скорость крышки/дна	30.0	mm/s
Скорость печати поддержек	60.0	mm/s
Скорость перемещения	120.0	mm/s
Скорость первого слоя	30.0	mm/s
Скорость юбки/каймы	30.0	mm/s

Рисунок 3.8 – Вкладка швидкість в слайсері Cura

Швидкість друку важливий параметр, що залежить від конструкції принтера та матеріалу, що використовується. При недостатній жорсткості конструкції на високих швидкостях буде створюватися вібрація, що значно впливає на кінцеву якість отримуваної деталі. Також при друці гнучкими матеріалами, висока швидкість буде призводити до браку із-за великої швидкості подачі, при якій пластик буде згинатися в тефлоновій трубці та призводити до закупорювання. Даний параметр впливає на швидкість друку.

Вкладка переміщення включає в себе параметри відкату, його швидкість та розмір (рисунок 3.9).

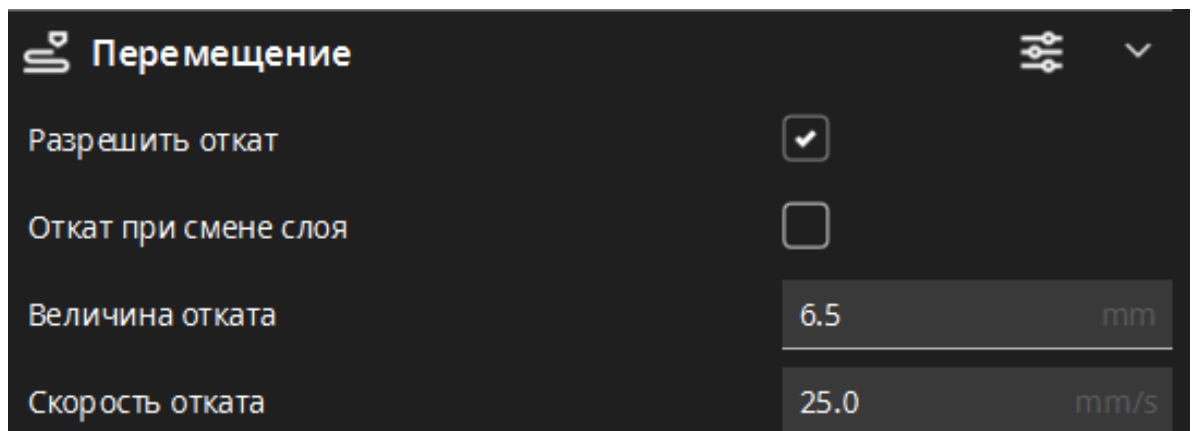


Рисунок 3.9 – Вкладка переміщення слайсеру Cura

Параметри величина відкату та його швидкість впливає на друк інженерними пластиками. Також дані параметри залежать від типу подачі. Для віддаленої подачі зазвичай використовуються більш низькі значення ніж для прямої подачі. Також величина відкату залежить від використаного екструдера.

Вкладка охолодження відповідає за налаштування швидкості вентиляторів. Для деяких пластиків даний параметр є дуже важливим і при неправильному налаштуванні може призвести до дефектів.

Таким чином на друк інженерними пластиками впливають такі параметри:

- температура стола;
- температура екструдера;
- швидкість друку;
- величина відкату;
- швидкість відкату;
- охолодження.

3.2 Влив температури стола та екструдера на друк інженерними пластиками

Температура екструдювання є найважливішим параметром, що впливає на кінцеву якість друку. Для різних пластиків, температури будуть різними і будуть впливати як на шорсткість поверхні, так і на отримувану міцність деталі. При дуже низькій температурі, пластик не зможе екструдуватися через сопло, створюючи пробку в отворі (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Забите сопло екструдера

При дуже високій температурі виникають напливи, нечіткі контури та велика кількість ниток, що створюються пластиком, що витікає із сопла (рисунок 3.11).

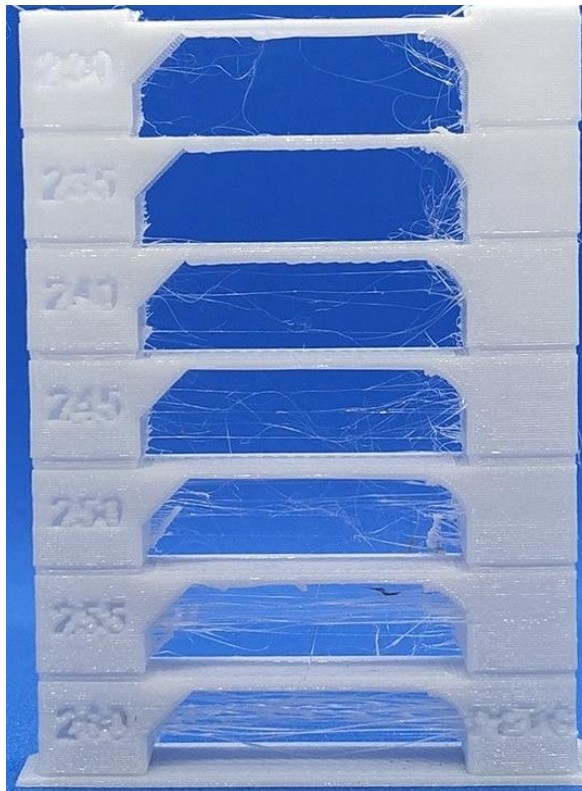


Рисунок 3.11 – Температурна вежа

На рисунку 3.11 зображена тестова модель надрукована з CoPET пластику, де поступово змінюється температура екструзії. Знизу температура починається з 260°C і зменшується до 230°C. При цьому добре видно, що при зменшенні температури зменшується кількість ниток.

Для пластика Neylon тестова модель при тих же параметрах буде мати зовсім інший вигляд (рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 – Тестова модель надрукована пластиком Neylon

Для друку даної моделі були встановлені ті ж самі температури, що й для CoPET пластику. Але як можна побачити на рисунку 3.12 вихідна якість друкованої моделі є незадовільною. Найбільш відповідною є температура 250°C. Для знаходження температури, яка дасть необхідну якість без дефектів, було проведено декілька тестових друків для уточнення результатів. В результаті було отримано друковану модель з достатньою шорсткістю, дана модель зображена на рисунку 3.13.



Рисунок 3.13 – Тестова друкована модель з Neylon

На рисунку 3.13 модель має гарну глянцеvu поверхню, дефектів немає. При збільшенні температури до 260°C поверхня не змінюється із-за високої максимальної температури, яка сягає 270°C. При зменшенні температури до 240°C виникає недоекструзія, що призводить до дефекту зображеного на рисунку 3.14.



Рисунок 3.14 – Дефект створений недоекструзією пластика

Для TPU пластика температура, що дає гарну шорсткість поверхні та не створює дефекти, становить 230°C. Мінімальна температура становить 220°C а максимальна 240°C. При встановленій температурі менше мінімальної створюються дефекти недоекструзії, що зображена на рисунку 3.14. При перебільшенні максимальної температури додатково створюються напливи пластику на поверхні (рисунок 3.15)



Рисунок 3.15 – Дефект оплавлення моделі

Даний дефект є однаковим для всіх пластиків та забезпечується фізикою витікання пластику зі сопла, що стає ще більш рідким.

Утворення дефектів від неправильної температури залежать також від температури в корпусі принтера або в зовнішньому середовищі, таким чином впливаючи на встановлені технологічні параметри температури пластиків.

Температура стола впливає на перші шари друкованої моделі, їх адгезію до платформи, на якій виконується друк моделі.

Для таких пластиків як ABS, Neylon, TPU температура стола становить 90°C та потребує використання сумішей, які збільшують адгезію платформи до пластика. Прикладом є суміш ацетону та пластика ABS, що розчиняється в ацетоні.

Прикладом неправильно встановленої температури є рисунок 3.16.



Рисунок 3.16 – Друкована модель з недостатньою температурою столу

3.3 Вплив швидкості на вихідну якість отриманої моделі із інженерних пластиків

Є 3 технологічних параметра швидкості. Першим параметром є швидкість холостого ходу, цей параметр відповідає за переміщення екструдера, який не видавлює пластик. Наступним параметром є швидкість ретраку, цей параметр відповідає за швидкість прибирання пластика з сопла. Останнім параметром є швидкість друку, що відповідає за переміщення екструдера в момент екструдювання пластика.

Швидкість холостого ходу для всіх пластиків є сталою величиною, яка залежить від механіки принтера, збільшення швидкості скорочує час друку але може приводити до створення таких дефектів як зміщення шарів (рисунок 3.17), створює вібрацію принтера, що призводить до мікрозміщень шарів, що робить поверхню менш гладкою, створюються пропуски шарів.

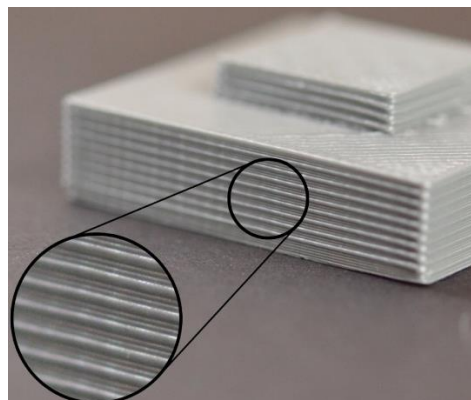


Рисунок 3.17 – Модель зі зміщеними шарами

Зменшення швидкості холостого ходу створює нитки пластику, що витік з сопла за час переміщення (рисунок 3.18).

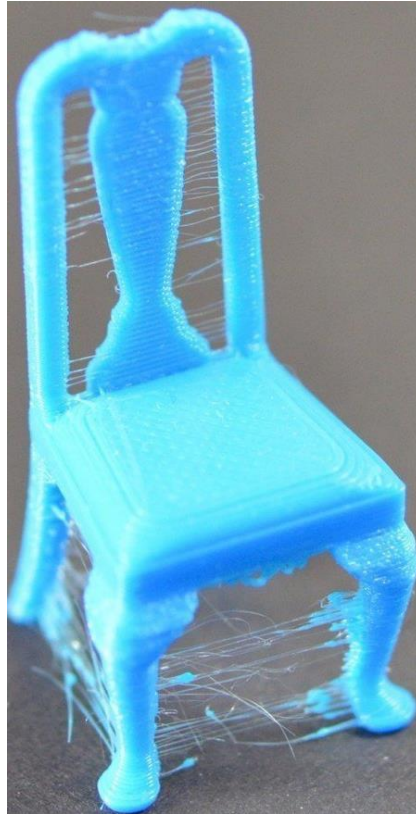


Рисунок 3.18 – Модель надрукована з маленькою швидкістю холостого ходу

Швидкість ретраку відводить пластик з сопла перед переміщенням холостого ходу. Маленька швидкість призводить до дефектів поверхні, на якій залишаються плями пластику (рисунок 3.19).

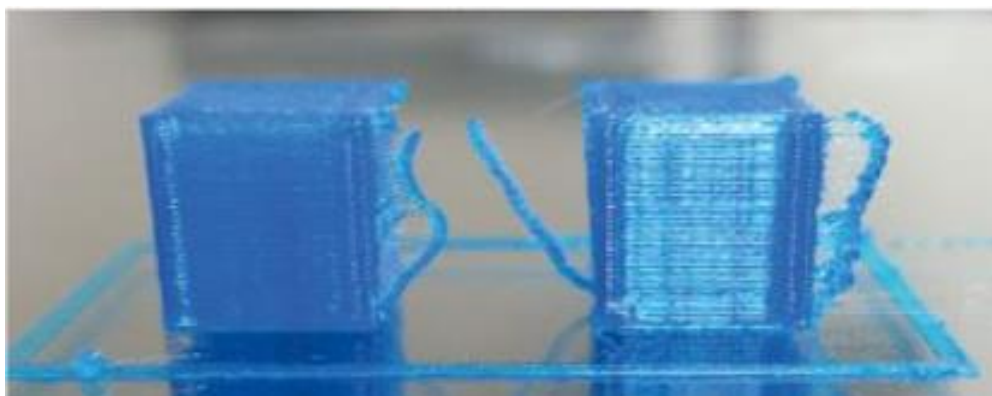


Рисунок 3.19 – Друк моделі друкованої з маленькою швидкістю ретрака

Швидкість друку – комплексний параметр, який відповідає за переміщення екструдера в процесі екструдювання пластика. Даний параметр, як і швидкість холостого ходу залежить від конструкції принтера, його кінематики, комплектуючих принтера, таких як направляючі. Використовуючи високопрецизійні направляючі рельсового типу HIWIN з каретками (рисунок 3.20), можливо досягти більш високих швидкостей аніж використовуючи лінійний вал з лінійними підшипниками.

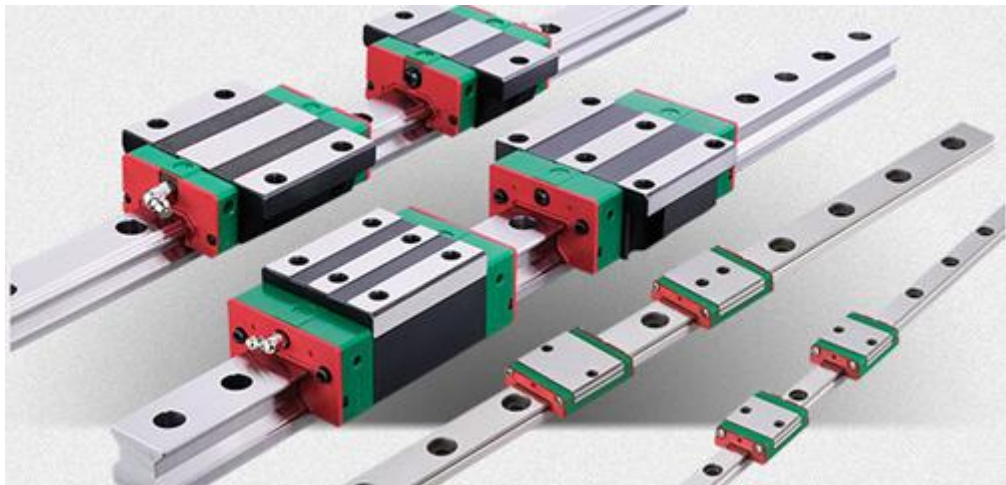


Рисунок 3.20 – Направляючі рельсового типу HIWIN

Направляючі HIWIN відрізняються від лінійного валу з підшипниками високою точністю, низьким коефіцієнтом тертя, плавне переміщення з низьким рівнем шуму та висока жорсткість. Лінійний вал з лінійними підшипниками (рисунок 3.21) відрізняється дешевизною, схильністю до вигину, має низький коефіцієнт тертя.



Рисунок 3.21 – Лінійні вали з лінійними підшипниками

Таким чином конструкція принтера є важливим фактором, що впливає на параметр швидкості.

Наступним елементом є налаштування параметрів швидкості, прискорення та джерків у прошивці.

Прошивка регулює максимально можливі прискорення та швидкість. Швидкість в прошивці задається параметром `#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {500, 500, 5, 25}`. Цей параметр вимірюється в мм/с. Він створений для врегулювання швидкості двигунів з кінематикою.

Наступним параметром в прошивці є обмеження максимального прискорення, цей параметр вимірюється в мм/с². Він відповідає за швидкість на прямих ділянках переміщення. В прошивці відображається таким чином: `#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {3000,3000,100,10000}`.

При перебільшенні цих параметрів будуть створюватися дефекти на друкованій моделі незалежно від параметрів пластику та налаштувань слайсера. Дефекти будуть створюватися у вигляді зміщення шарів моделі (рисунок 3.22).

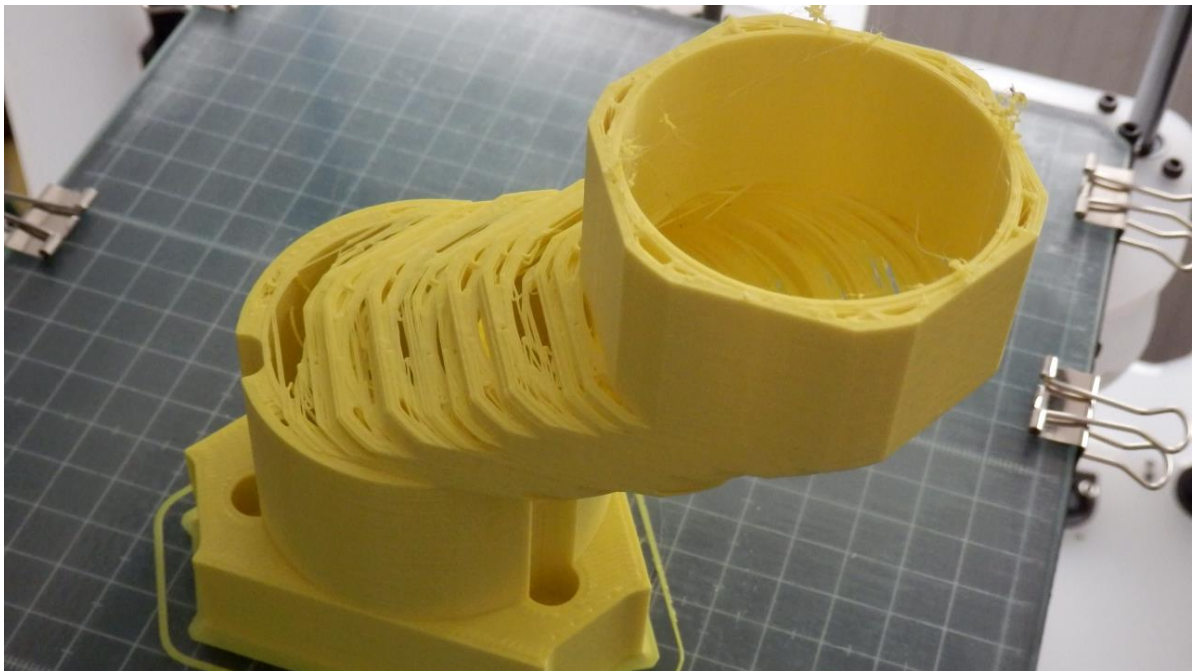


Рисунок 3.22 – Дефект зміщення шарів на друкованій моделі

Даний дефект також можна побачити на рисунку 3.23.



Рисунок 3.23 – Дефект зміщення шарів

В слайсері встановлюється швидкість, яка не може перевищувати швидкість, що встановлена в прошивці. Деякі виробники конструкційних пластиків обмежують швидкість друку із-за хімічних властивостей філаменту.

Перевищення встановлених швидкостей призводить до гіршого спікання між шарами пластику, зменшується міцність виробу, створюються дефект недоекструзії.

Рекомендованими швидкостями для CoPET, Elastan, Nylon та ABS є від 30мм/с до 80мм/с. Для TPU швидкість становить від 20мм/с до 30мм/с.

3.4 Вплив охолодження моделі на кінцеву якість отримуваної моделі

Охолодження моделі є останнім важливим елементом, що впливає на шорсткість поверхні і на кінцеві розміри моделі. Для охолодження використовуються вентилятори зображені на рисунку 3.24.



Рисунок 3.24 – Вентилятор охолодження моделі

Так як пластик за час проходження екструдера не встигає охолонути і прийняти тверду форму, наступне проходження екструдера по тому ж місці створює зміщення пластику. Ще одним елементом, на що впливає охолодження пластика в області біля сопла є побудова мостів. Мости – це поверхня, яка знаходиться між двома точками, та яка має кут нахилу відносно точок 90° . Такі мости зображені на рисунку 3.25.

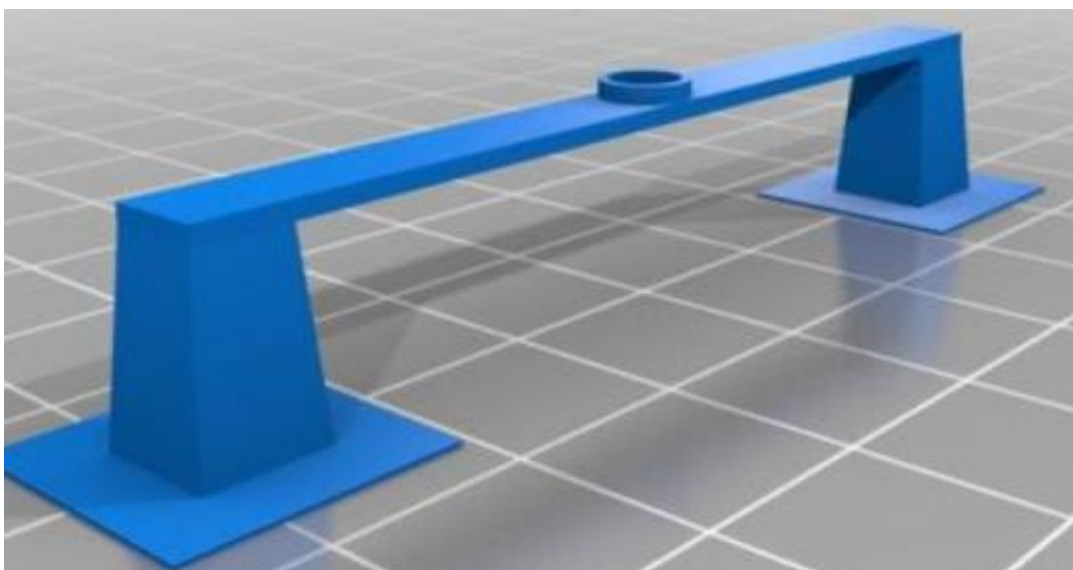


Рисунок 3.25 – Приклад друкованої моделі з мостом

Якщо обдув сопла буде недостатнім, буде створюватися дефект, який можна побачити на рисунку 3.26.



Рисунок 3.26 – Дефект друкованої деталі з мостом

В загальному виді, залежність шорсткості поверхні та наявності дефектів від проценту потужності вентилятора можливо побачити на рисунку 3.27

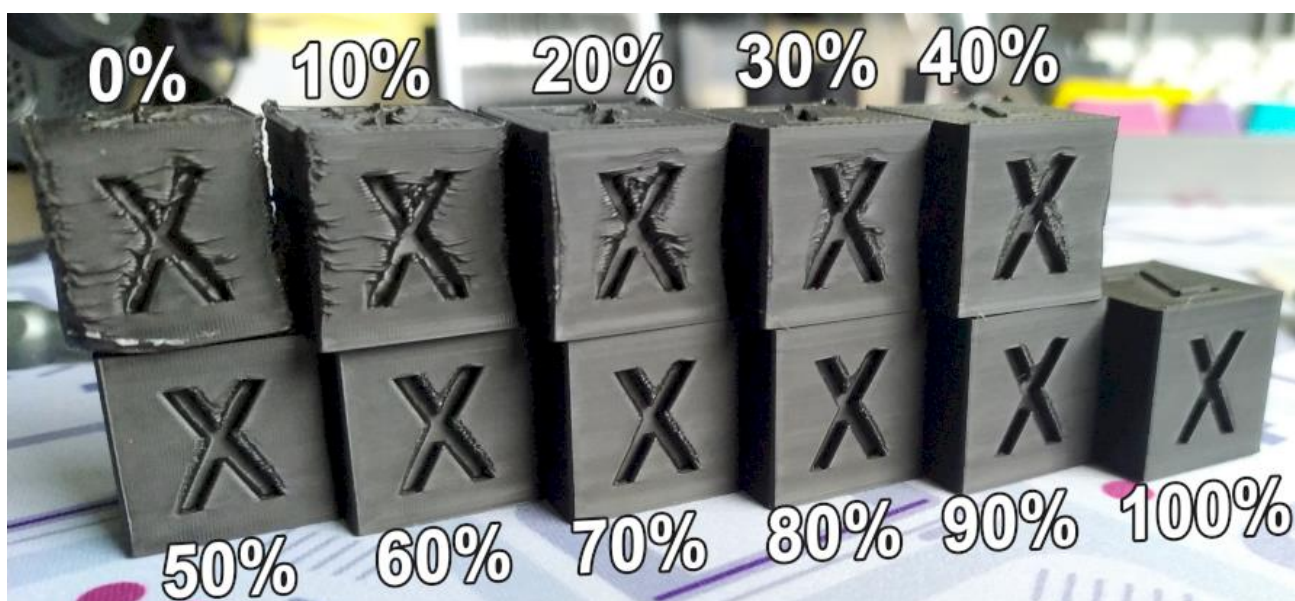


Рисунок 3.27 – Вплив потужності охолодження на друковані моделі

Деякі пластики, такі як Neylon та ABS не потребують використання обдуву із-за високого впливу на спікання між шарами, що може вплинути на кінцеву якість вихідної моделі.

3.5 Висновки третього розділу

В результаті аналізу технологічних параметрів, що впливають на кінцеву якість друкованої моделі були визначені основні технологічні параметри, що впливають на шорсткість поверхні, кінцеві розміри та на отримувану міцність друкованої деталі.

Було визначено які дефекти створюються при невідповідності технологічних параметрів на друкованих моделях, їх особливості та взаємозалежності між собою.

Такими технологічними параметрами є:

- температура стола та екструдера;
- швидкість друку, швидкість холостого ходу та швидкість ретраку;
- охолодження пластику в області біля сопла.

Всі інші технологічні параметри впливають на шорсткість поверхні та на кінцеві розміри незначно.

На міцність деталі впливають такі параметри як:

- висота шару;
- товщина стінок;
- товщина кришки та дна;
- температура стола та екструдера;
- заповнення.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Постановка задачі експериментальних досліджень

В третьому розділі були проаналізовані фактори, що впливають на якісні показники моделі надрукованої на 3D-принтері технології FFF. Дані фактори були отримані в результаті проведення серії експериментальних досліджень з використанням емпіричного методу дослідження. В процесі дослідження були використані різні значення технологічних факторів та проаналізовані вихідні результати, отримані в результаті експерименту. Таким чином був використаний промисловий експеримент.

Для уточнення даних, отриманих емпіричним шляхом, було проведено комп'ютерне моделювання характеристик міцності інженерних пластиків, таких як Neylon, CoPET, TPU, ABS, ELASTAN, PLA та HIPS.

В якості вихідних фізичних характеристик, було взято фізичні характеристики вказані розробником даного філаменту Monofilament, які були описані в розділі 2.2.

В результаті було проведено серію експериментів з друкованою пластиною, що зображена на рисунку 4.1.

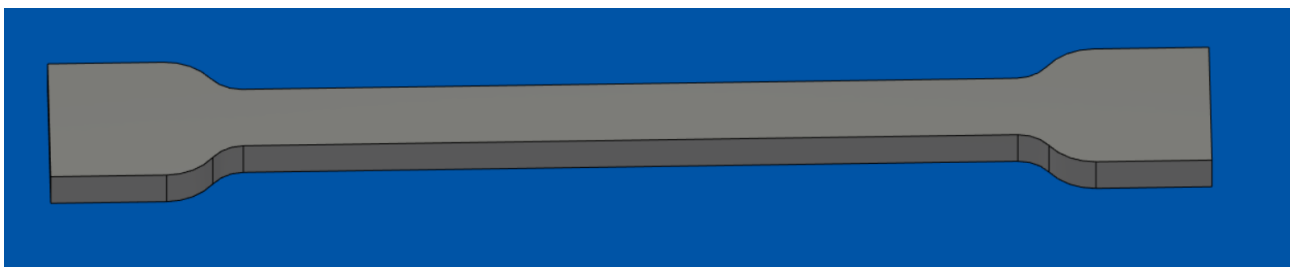


Рисунок 4.1 – Тестова модель для дослідження

Першим дослідженням стало дослідження статичного навантаження, де навантаження прикладається до поверхні (рисунок 4.2). В даному випадку є зафіксовані поверхні, які під час дослідження залишаються незмінними та поверхні до якої прикладається навантаження в 200 Ньютонів.

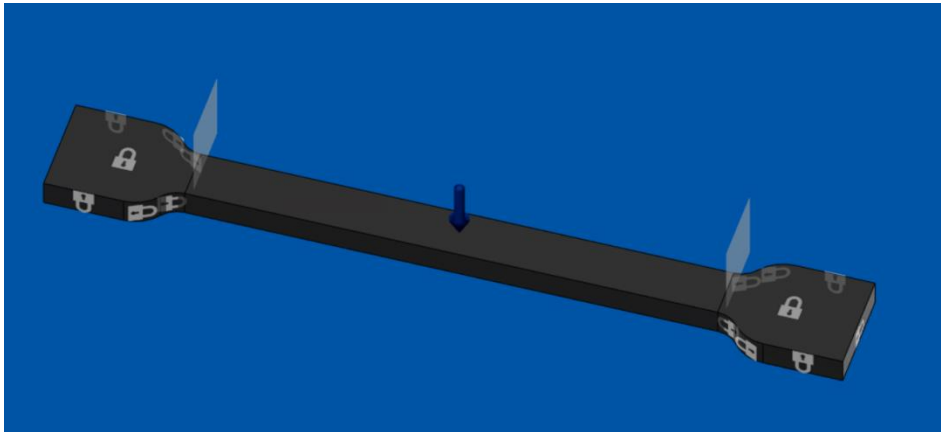


Рисунок 4.2 – Модель з визначеними поверхнями фіксації та поверхнею прикладання сили

В результаті проведення дослідження над пластиком ABS, були отримані значення максимального зміщення по осі Z в напрямку прикладання сили, що становить 2.773 мм, що зображено на рисунку 4.3

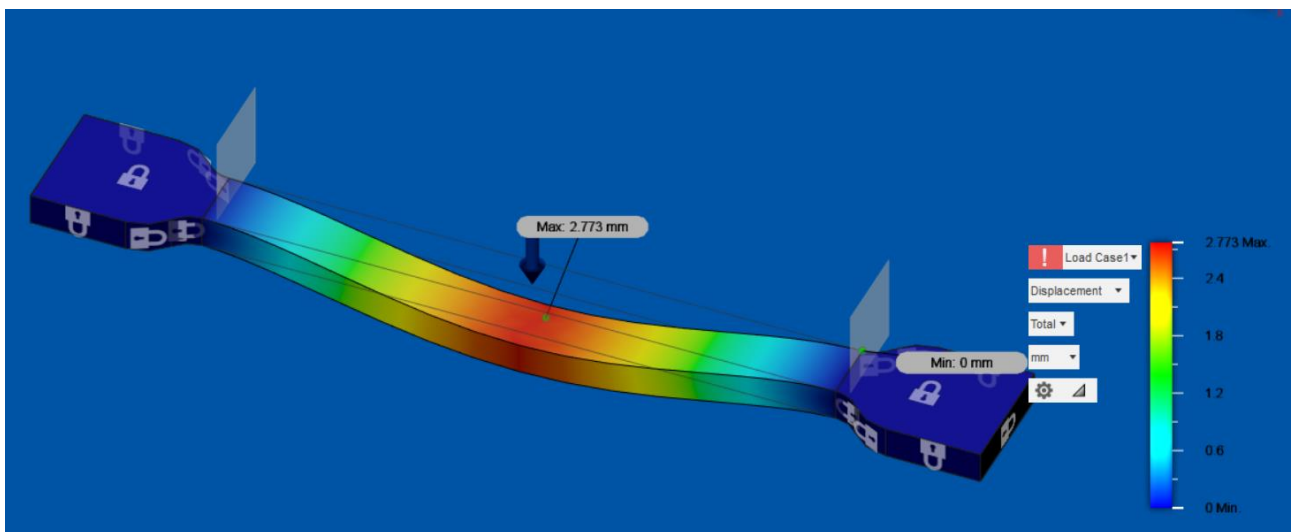


Рисунок 4.3 – Результат деформації пластини з пластику ABS

Для пластику CoPET було отримано наступні результати статичного навантаження, де максимальне зміщення по осі Z в напрямку прикладання сили 2.773 мм, яке є аналогічним до результатів пластику ABS.

Пластик TPU із-за його високої еластичності та високої міцності на розрив в результаті дослідження на статичне навантаження, максимальне зміщення становить 192.8 мм, що зображено на рисунку 4.4.

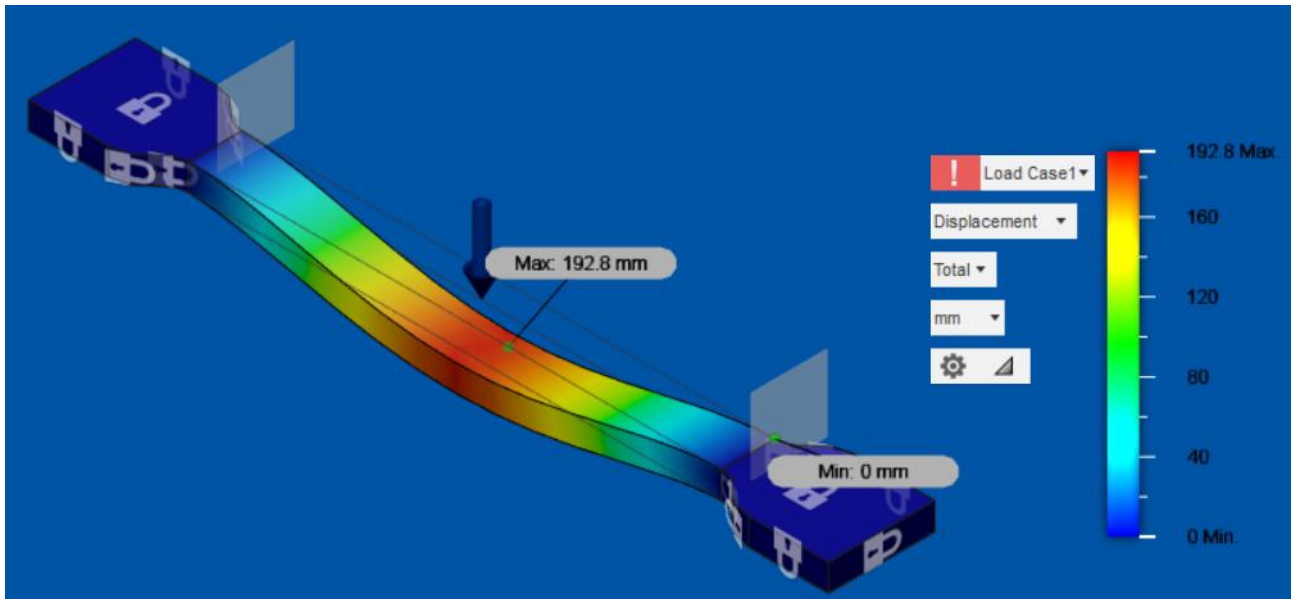


Рисунок 4.4 – Результат деформації пластини з пластику TPU

Пластик HIPS отримав значення максимально зміщення в 2.37 мм, що зображено на рисунку 4.5.

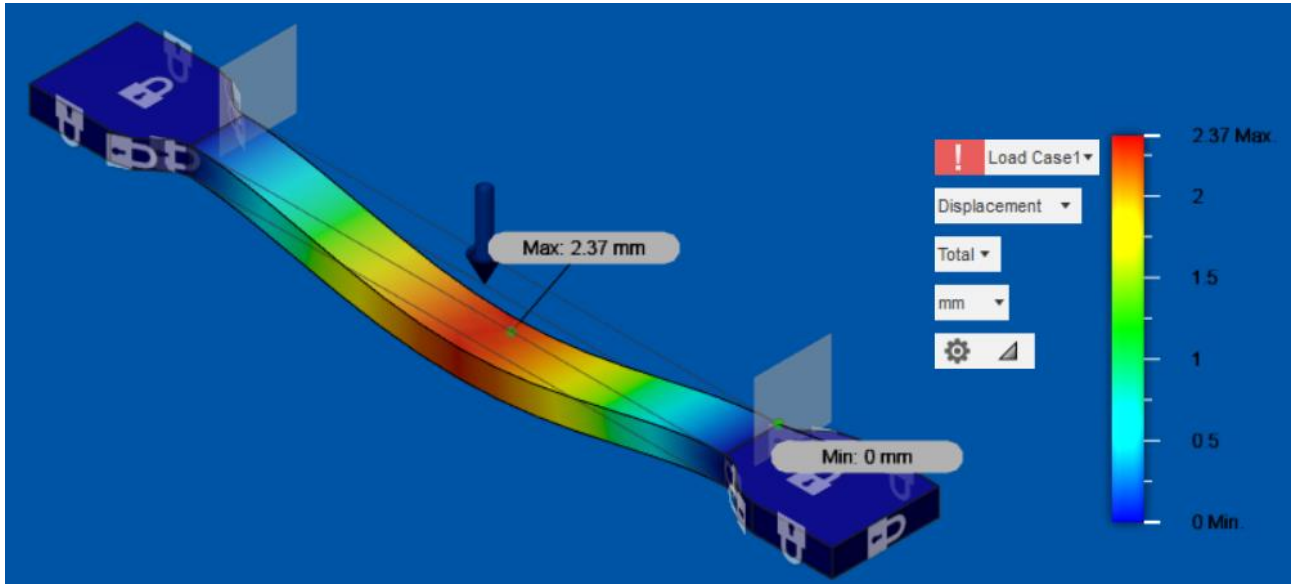


Рисунок 4.5 – Результат деформації пластини з пластику HIPS

Пластик Neylon отримав значення максимальної деформації у 2.832 мм, результат моделювання зображена на рисунку 4.6.

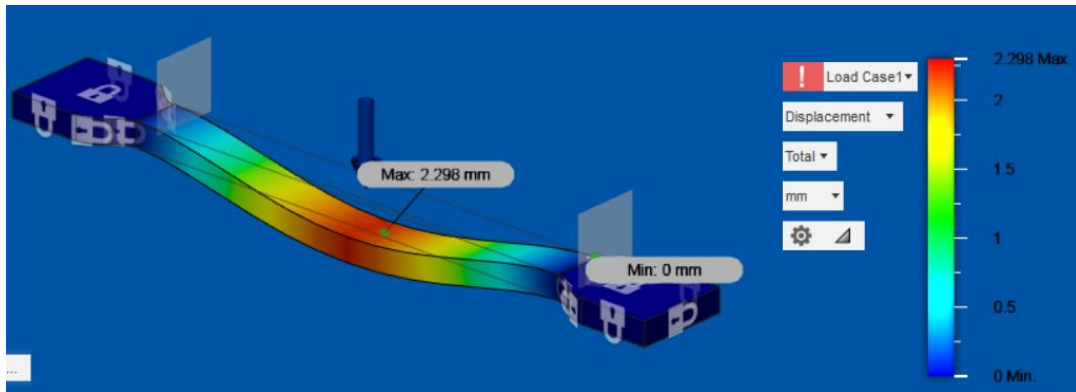


Рисунок 4.6 – Результат моделювання Neylon

Для PLA результатом моделювання стало зміщення в 2.298 мм, що зображено на рисунку 4.7.

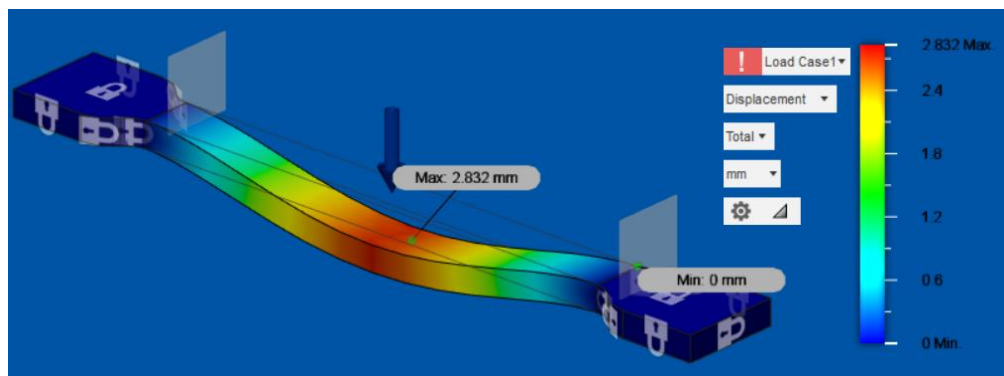


Рисунок 4.7 – Результат моделювання статичного навантаження для PLA

Для Elasthan значення зміщення становить 744.5 мм, що зображено на рисунку 4.8.

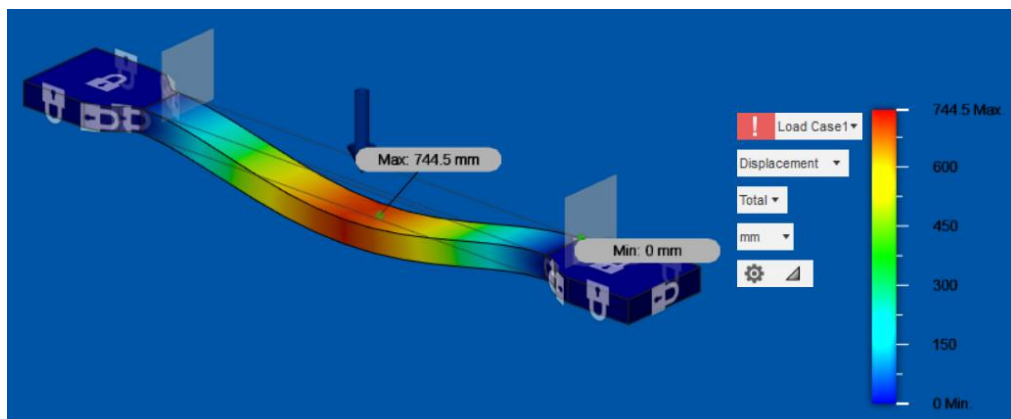


Рисунок 4.8 – Результат моделювання статичного навантаження для Elasthan

В результаті моделювання пластиків було визначено два найбільш еластичних пластика – Elastan та TPU, що відповідає заявленим властивостям виробника. Відповідно до результатів моделювання, TPU є менш еластичним ніж Elastan. TPU пластик в результаті статичного навантаження отримав значення зміщення в 192.8 мм при прикладанні сили в 200 Н. При тій же силі, результат навантаження для пластика Elastan становить 744.5 мм.

Найбільш жорстким пластиком по результатам моделювання став Neylon, який змістився під дією сили в 200 Н на 2.296 мм.

Таким чином, в результаті комп'ютерного моделювання статичного навантаження інженерних пластиків, було визначено найбільш жорсткий та найбільш гнучкий пластики, де найбільш жорстким матеріалом по результатам моделювання є Neylon а найбільш гнучким пластиком є Elastan.

Так як комп'ютерне моделювання не враховує технологічні параметри та технологічні особливості побудови моделі наступним елементом дослідження стане проведення регресійного аналізу для визначення впливу технологічних факторів на кінцеві якісні показники.

В результаті проведення аналізу буде вирішено такі завдання:

- визначення виду та форми залежності;
- оцінка параметрів рівняння регресії;
- перевірка значущості рівняння регресії;
- перевірка значущості окремих коефіцієнтів рівняння;
- побудова інтервальних оцінок коефіцієнтів;
- дослідження характеристик точності моделі.

В результаті емпіричних досліджень було визначено такі фактори:

- висота шару;
- процент заповнення;
- розмір сопла;
- температура стола;
- температура екструдера;
- швидкість;

- охолодження;
- товщина стінок.

Основним якісним показником є відповідність розмірів, залежність якої можливо відобразити виразом:

$$\Delta l = l_{\text{друк}} - l_{\text{вих}} \quad (4.1)$$

Для дослідження впливу технологічних факторів на кінцеві розміри, було надруковано модель з різними технологічними факторами (рисунок 4.9).

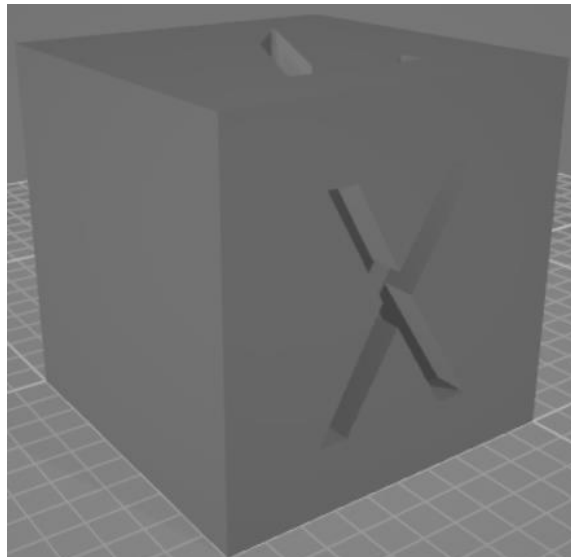


Рисунок 4.9 – Тестова модель для дослідження

Дана модель дає можливість прослідити за змінами розмірів в різній площині та впливом різних факторів на поверхню моделі.

В якості досліджуваних факторів на кінцеві розміри було вибрано три фактора:

- температура екструдера;
- швидкість;
- потужність охолодження.

Для дослідження було зроблено дослідження для деяких пластиків з різними температурами екструдера, швидкістю та потужністю охолодження.

4.2 Багатофакторний регресійний аналіз

Для багатофакторного регресійного аналізу отримані данні для пластику CoPET, Neylon та TPU, зведені в таблиці 4.1, 4.2, 4.3.

Таблиця 4.1 – Зведені параметри друку для пластику CoPET, отримані в результаті проведення дослідження.

CoPET			
Температура екструдера, °C	Швидкість, мм/с	Потужність охолодження, %	Відхилення розмірів, мкм
220	70	100	-100
225	60	75	0
235	30	0	200
240	70	100	0
210	60	0	-100
235	100	100	200
215	50	0	-100
245	40	50	200
220	30	0	-100
230	50	100	0
240	40	50	150

Максимальна температура в дослідженні для пластику CoPET становить 245°C, мінімальна температура становить 210°C. Мінімальна швидкість, що встановлювалася для цього дослідження, становить 30 мм/с, а максимальна 100 мм/с. Мінімальна потужність охолодження становить 0%, а максимальна 100%. В даному дослідженні найбільш гарні результати отримали при встановленій температурі 225°C, 230°C, 240°C. Швидкості, при яких немає відхилення в розмірах є швидкості 30 мм/с, 50мм/с та 70 мм/с. Всі результати без відхилення розмірів, надруковані зі 100% потужністю охолодження.

Результати регресійного аналізу для пластику CoPET зведено в додатку А.

Коефіцієнт детермінації, що був отриманий з регресійної статистики становить 0.81, що показує оцінку адекватності регресійної моделі.

Для першого дослідження, було отримано графіки підбору та залишків для температури, швидкості та охолодження.

Графіки температури екструдера зображені на рисунку 4.10.

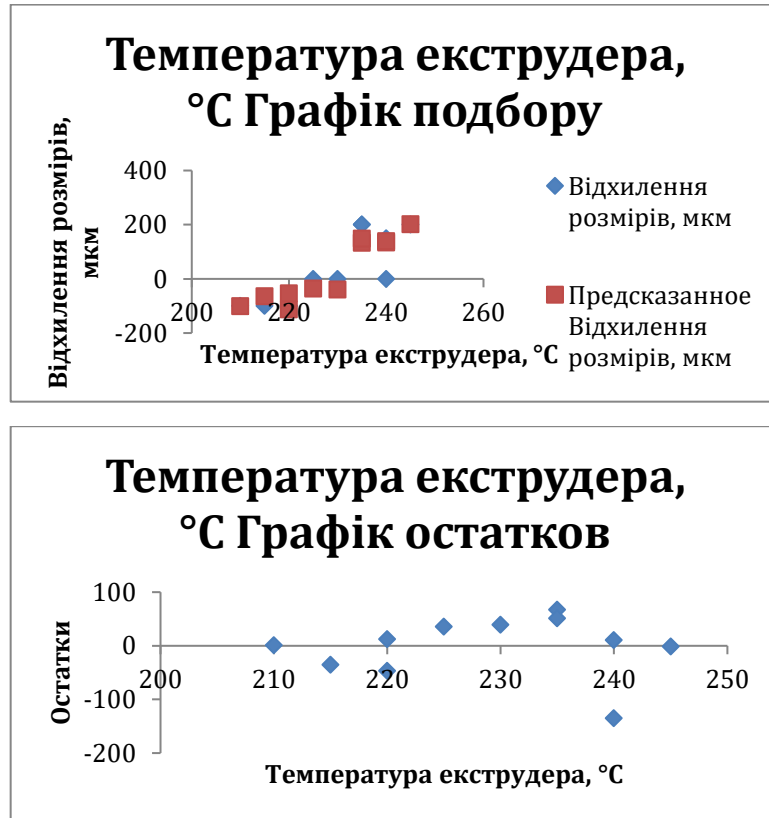


Рисунок 4.10 – Графіки підбору та залишків для температури екструдера

Графіки залишків для швидкості зображені на рисунку 4.11.

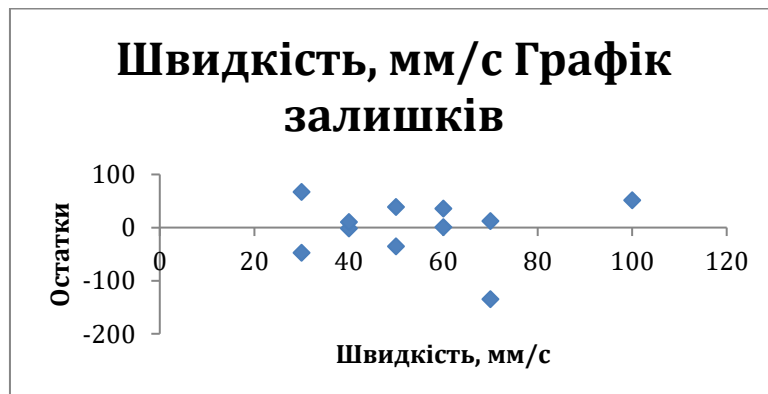


Рисунок 4.11 – Графік залишків для швидкості

Графік підбору для швидкості зображено на рисунку 4.12.

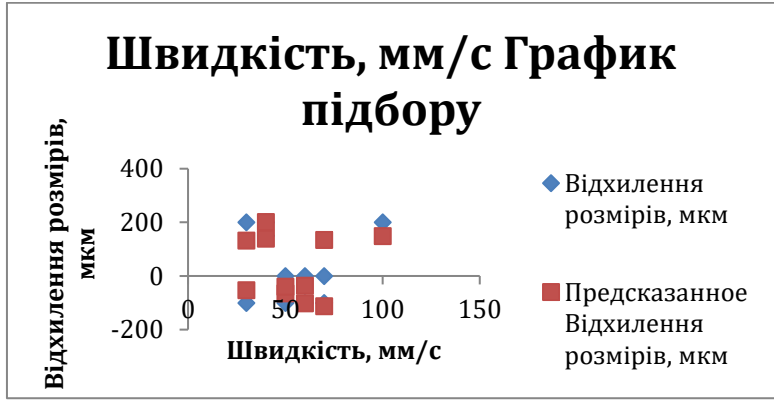


Рисунок 4.12 – Графік підбору для швидкості

Для потужності графіки підбору та залишків зображені на рисунку 4.13.

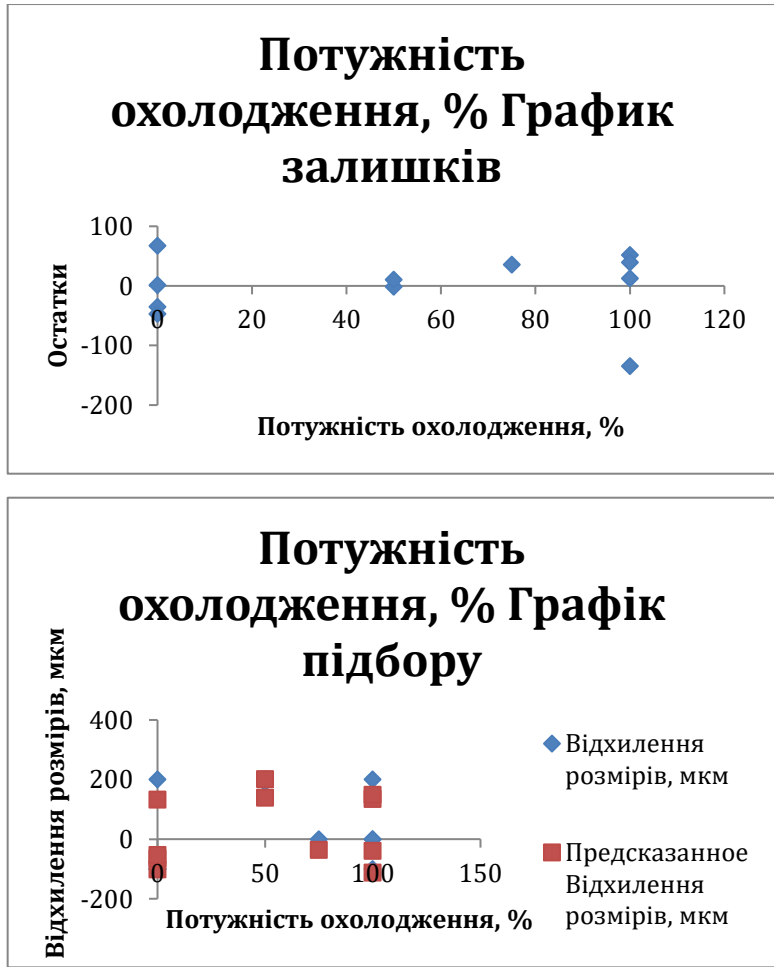


Рисунок 4.13 – Графіки підбору та залишків для потужності охолодження

Для другого дослідження з пластиком Neylon всі результати дослідження було зведено в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Зведені параметри друку для пластику Neylon, отримані в результаті проведення дослідження.

Neylon			
Температура екструдера, °C	Швидкість, мм/с	Потужність охолодження, %	Відхилення розмірів, мкм
235	40	0	-100
240	30	50	-100
245	50	0	0
250	30	25	0
240	60	50	-100
245	40	0	0
230	60	20	-200
235	20	100	-200
245	20	100	-100
250	50	0	0
255	40	50	100
260	50	75	0

Максимальна температура в дослідженні для пластику Neylon становить 260°C, мінімальна температура становить 235°C. Мінімальна швидкість, що встановлювалася для цього дослідження, становить 20 мм/с, а максимальна 60 мм/с. Мінімальна потужність охолодження становить 0%, а максимальна 100%. В даному дослідженні найбільш гарні результати отримали при встановленій температурі 245°C, 250°C, 260°C. Швидкості, при яких немає відхилення в розмірах є швидкості 30 мм/с, 40мм/с та 50 мм/с. Найкращі результати були з 0%, 25% та 100%.

Результати регресійного аналізу для пластику Neylon зведено в додатку А. Коефіцієнт детермінації, що був отриманий з регресійної статистики становить 0.89, що показує оцінку адекватності регресійної моделі.

Для другого дослідження, було отримано графіки підбору та залишків для температури, швидкості та охолодження.

Графіки температури екструдера зображені на рисунку 4.14.

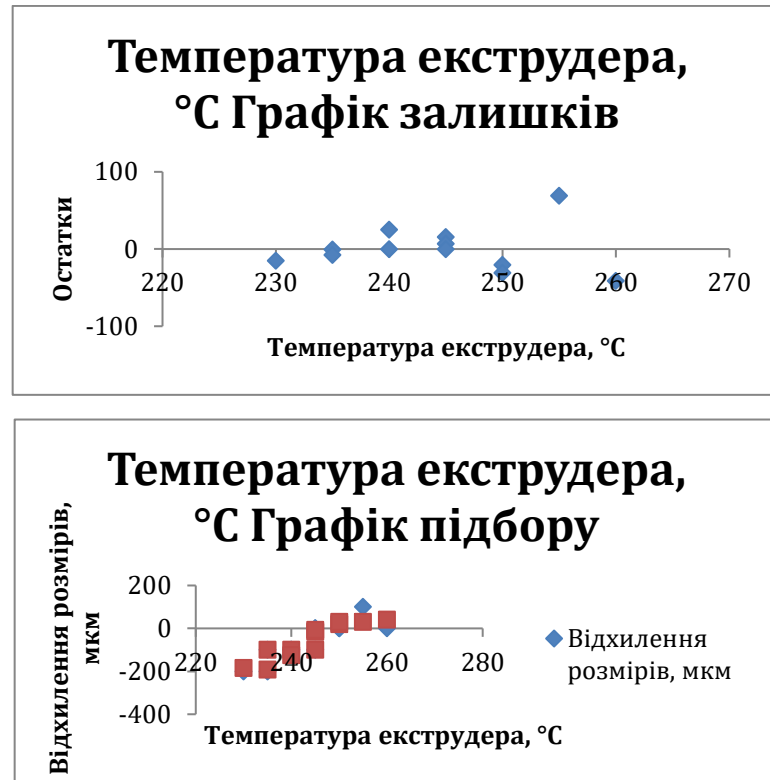


Рисунок 4.14 – Графіки підбору та залишків для температури екструдера

Графіки для швидкості зображені на рисунку 4.15.

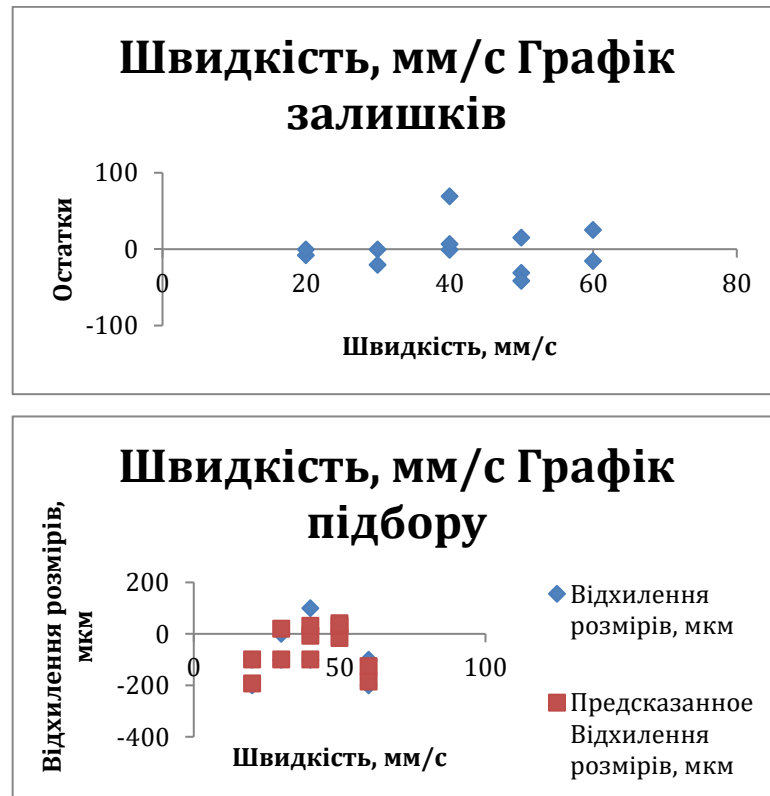


Рисунок 4.15 – Графіки підбору та залишків для швидкості

Для потужності охолодження отримані графіки зображені на рисунку 4.16.

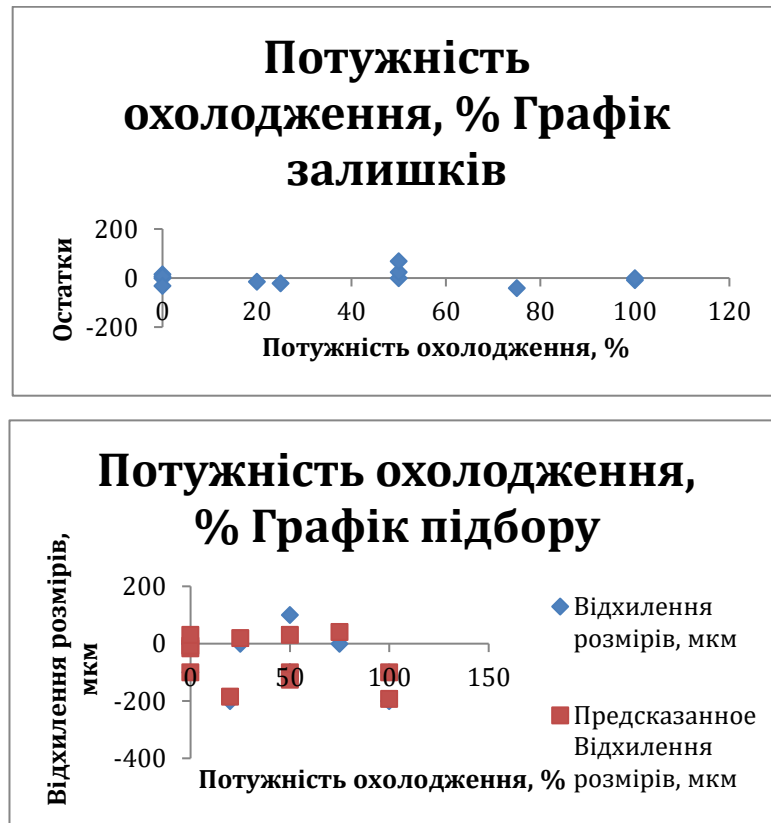


Рисунок 4.16 – Графіки підбору та залишків для потужності охолодження

Для третього дослідження з пластиком TPU всі результати дослідження було зведено в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Зведені параметри друку для пластику TPU, отримані в результаті проведення дослідження.

Температура екструдера, °С	Швидкість, мм/с	Потужність охолодження, %	Відхилення розмірів, мкм
220	20	100	-200
225	30	75	-100
235	30	0	0
240	20	100	0
235	40	100	100
245	40	50	100
220	40	0	0
230	50	100	200
240	30	50	0

Максимальна температура в дослідженні для пластика TPU становить 245°C, мінімальна температура становить 220°C. Мінімальна швидкість, що встановлювалася для цього дослідження, становить 20 мм/с, а максимальна 50 мм/с. Мінімальна потужність охолодження становить 0%, а максимальна 100%. В даному дослідженні найбільш гарні результати отримали при встановленій температурі 220°C, 235°C, 240°C. Швидкості, при яких немає відхилення в розмірах є швидкості 20 мм/с, 30мм/с та 40 мм/с. Найкращі результати були з 0%, 50% та 100%.

Результати регресійного аналізу для пластику TPU зведено в додатку А, табл.3.

Коефіцієнт детермінації, що був отриманий з регресійної статистики становить 0.95, що показує оцінку адекватності регресійної моделі.

Для другого дослідження, було отримано графіки підбору та залишків для температури, швидкості та охолодження.

Графіки залишків та підбору температури екструдера зображені на рисунку 4.17.

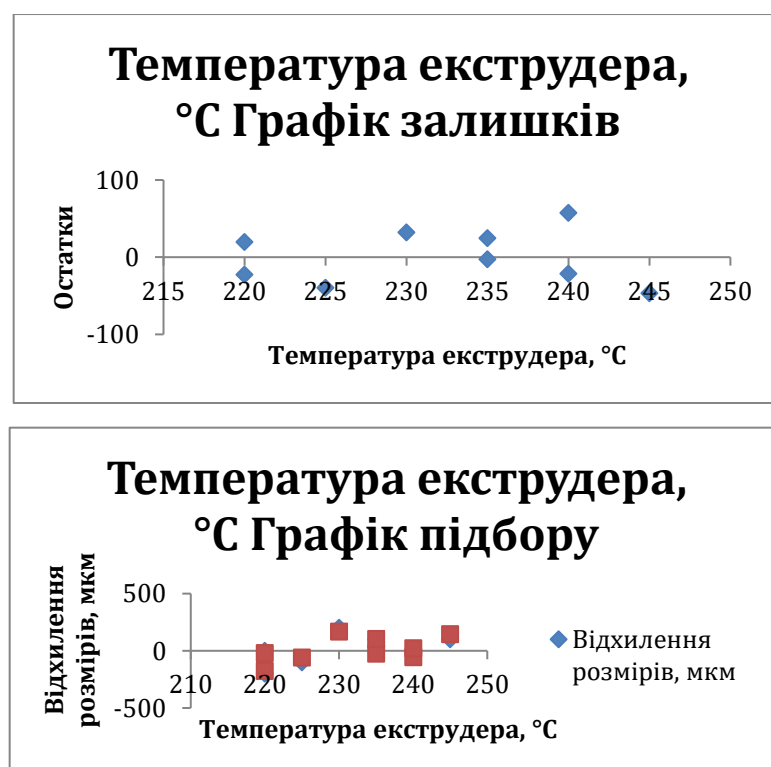


Рисунок 4.17 – Графіки залишків та підбору температури екструдера

Для швидкості графіки підбору та залишків зображені на рисунку 4.18.

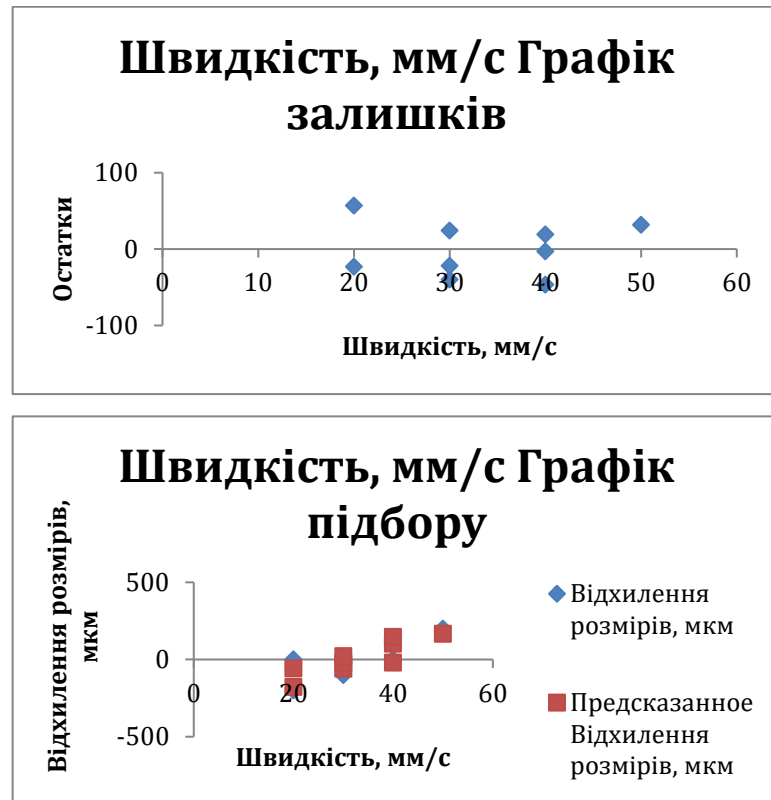


Рисунок 4.18 – Графіки залишків та підбору для швидкості

Для потужності охолодження графік залишків зображений на рисунку 4.19.



Рисунок 4.19 – Графік залишків для потужності охолодження

Графіки підбору для потужності охолодження зображено на рисунку 4.20.

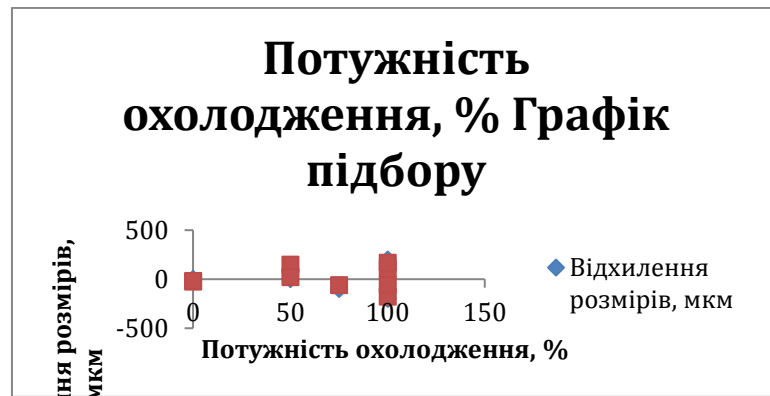


Рисунок 4.20 – Графік підбору для потужності охолодження

Графіки регресії показують різницю між значеннями, що отримані в результаті дослідження та значеннями, що були передбачені досліджуваною регресійною моделлю. Чим краще модель відповідає цим значенням, що вказані в досліджах, тим менше значення залишків.

Основне рівняння багатofакторної регресії можливо записати таким виразом:

$$\hat{y}_i = a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} + \dots + a_m x_{mi} + b, \quad (4.2)$$

Для першого дослідження були отримано рівняння регресії, що має вигляд:

$$y = -2850,92 + 12,3x_2 + 2,51x_3 - 1,602x_4 \quad (4.3)$$

Для другого дослідження було отримане рівняння регресії, що має вид:

$$y = -2243,062 + 9,27x_2 - 0,851x_3 - 1,098x_4 \quad (4.4)$$

Для третього дослідження було отримане рівняння регресії, що має вид:

$$y = -1718,28 + 5,99x_2 + 9,50x_3 + 0,323x_4 \quad (4.5)$$

4.3 Висновки четвертого розділу

В результаті проведення моделювання статичного навантаження пластиків було отримано результати зміщення для кожного типу пластиків, що відповідає фізичним характеристикам інженерних пластиків. Найбільш еластичними пластиками є TPU та Elastan. Найбільш жорстким став пластик Neylon.

Для регресійного аналізу було визначено 3 основних фактора:

- температура екструдера;
- швидкість друку;
- потужність охолодження.

В результаті проведення дослідження, найкращі результати без відхилення розмірів для пластику CoPET, були отримані при температурах 225°C, 230°C та 240°C. При цьому швидкість становила від 50 мм/с до 70 мм/с з охолодженням від 75% до 100%.

В результаті проведення другого дослідження, найкращі результати без відхилення розмірів для пластику Neylon, були отримані при температурах 245°C, 250°C та 260°C. При цьому швидкість становила від 30 мм/с до 50 мм/с з охолодженням від 0% до 75%.

Максимальна температура в дослідженні для пластика TPU становить 245°C, мінімальна температура становить 220°C. Мінімальна швидкість, що встановлювалася для цього дослідження, становить 20 мм/с, а максимальна 50 мм/с. Мінімальна потужність охолодження становить 0%, а максимальна 100%. В даному дослідженні найбільш гарні результати отримали при встановленій температурі 220°C, 235°C, 240°C. Швидкості, при яких немає відхилення в розмірах є швидкості 20 мм/с, 30мм/с та 40 мм/с. Найкращі результати були з 0%, 50% та 100%.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Розміри приміщення, в якому буде розроблюватися система, складає. Робоче місце складається зі столу, стільця та персонального комп'ютера. В приміщенні працюють 6 чоловік. Площа приміщення складає $42,7 \text{ м}^2$, об'єм – $128,1 \text{ м}^3$. Відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98, площа на одне робоче місце повинна складати не менше 6 м^2 , об'єм – 20 м^3 . Для даного приміщення робоча площа та об'єм на одну людину відповідає нормам, так як площа на одне робоче місце складає $7,11 \text{ м}^2$, а об'єм – $21,35 \text{ м}^3$.

Схема приміщення вказана на рисунок 5.1.

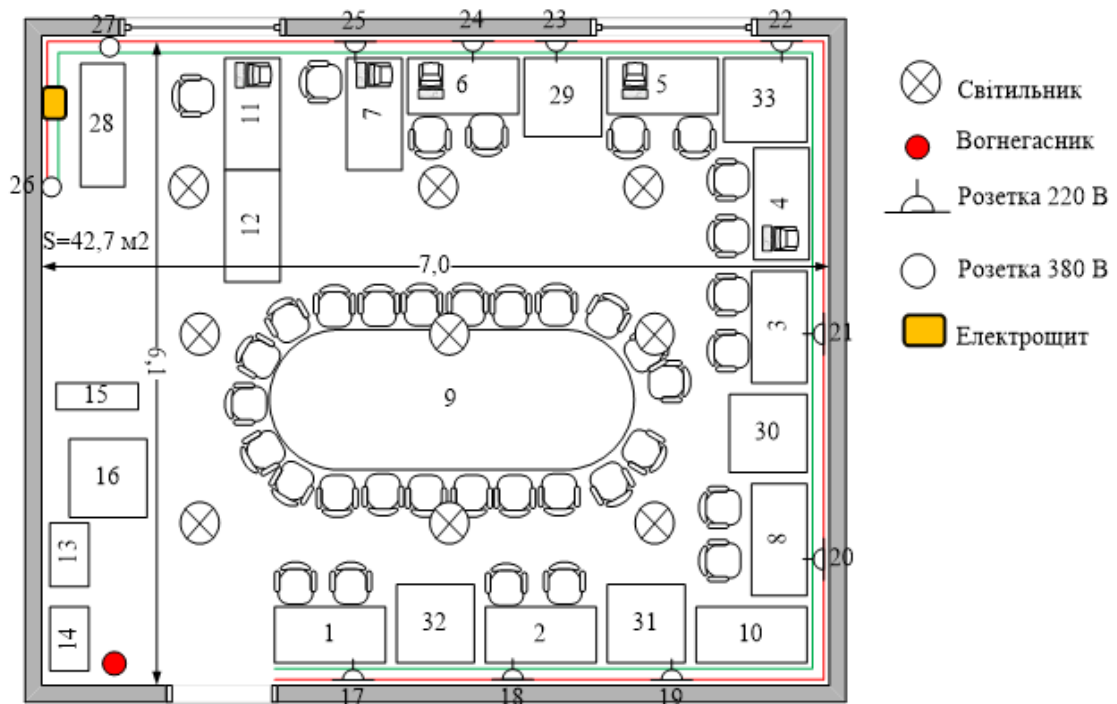


Рисунок 5.1 – Схема приміщення

Для розрахунку природного освітлення необхідно визначити площу вікон, що буде забезпечувати нормоване значення КЕО. Далі необхідно зрівняти розраховану площину з реальною. Приміщення має два вікна, які мають розміри $2 \text{ м} \times 1,5 \text{ м}$. Умови праці вважаються нормальними, якщо:

$$S_{\text{вік}} \leq S_{\text{реал}}, \quad (5.1)$$

де $S_{\text{вік}}$ – площа вікон, що розраховується по формулі 6.2;

$S_{\text{реал}}$ – реальне значення площини вікон в приміщенні що становить 6.4 м^2 ;

$$S_0 = \frac{e_n \eta_0 K_{з0} K_3 S_n}{100 \tau_0 r_1}, \quad (5.2)$$

де S_0 – площа світлових отворів, що забезпечує нормовані значення КЕО в приміщенні[15];

S_n – площа підлоги приміщення;

$e_{\text{норм}}$ – нормоване значення КЕО для 3-го поясу світового клімату, $e = 0.9$;

η_0 – світлова характеристика вікна;

$K_{\text{буд}}$ – коефіцієнт, що враховує затінення вікон протилежними будівлями, $K=1$;

K_3 – коефіцієнт запасу (залежить від концентрації пилу в приміщенні та від періодичності очищення скла), $K_3 = 1,4$;

τ_0 – загальний коефіцієнт світлопропускання, що визначається в залежності від коефіцієнта пропускання скла, втрат світла в оправках вікна, шару забруднення, наявність сонцезахисних конструкцій , $\tau_0 = 0,94$;

r_1 – коефіцієнт, що враховує підвищення КЕО за рахунок відображення.

$$S_0 = \frac{0.9 \times 15 \times 1 \times 1.4 \times 42.7}{100 \times 0.94 \times 1.1} = 7.8 \text{ м}^2. \quad (5.3)$$

Так як $S_{\text{вік}} > S_{\text{реал}}$, то для покращення цього фактора необхідно використовувати штучне освітлення в денний час.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи на рівень магістра було отримано такі результати:

- проаналізовано технологію 3D-друку FFF та конструкції принтерів;
- проаналізовано параметри якості, що висуваються до друківаних моделей та факторів, що впливають на ці фактори;
- проаналізовано вимоги до надрукованих моделей інженерними пластиками;
- проаналізовані типи інженерних пластиків, їх хімічні та фізичні характеристики;
- проаналізовано технологічних параметрів, що впливають на кінцеву якість друкованої моделі;
- Проаналізовано вплив температури стола та температури екструдера на друк інженерними пластиками;
- Проаналізовано вплив швидкості на друк інженерними пластиками;
Проаналізовано вплив охолодження моделі на друк інженерними пластиками;
- побудована модель статичного навантаження на інженерні пластики;
- було проведено експериментальні дослідження, з використання багатфакторної регресії, в результаті якої було визначено вплив кожного з значущих факторів, які безпосередньо впливають на відхилення розмірів від вихідної 3D-моделі.

В результаті проведення експериментальних досліджень було підтверджено залежність відповідності розмірів від температури екструдера, швидкості та потужності охолодження на інженерні пластики.

Було опубліковано 1 публікацією, що була надрукована в збірнику конференції: X Міжнародна науково-практична конференція Eurasian scientific discussions [електронне видання] [4].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008 – 15. документація. звіти у сфері науки і техніки. структура і правила оформлення [Текст] – Введ. 2015 – 06 – 22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29с.
2. Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 55 с.
3. Невлюдов, І.Ш. дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст] / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова – Київ – 58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016 – 320с.
4. Тарапатов А.О. Аналіз параметрів якості, що висуваються до друкованих 3D-моделей/ А.О. Тарапатов, Р.Є. Стрілець// «Eurasian scientific discussions» X Міжнародна наук.-практ. конф.,Барселона, 23-25.10.2022.
5. 3D ДРУК методом наплавлення; режим доступу ([https://pro3d.com.ua/a366711-druk-metodom-naplavlennya.html#:~:text=Як%20i%20в%20будь-якій,%2C85%20\(3\)%20мм.](https://pro3d.com.ua/a366711-druk-metodom-naplavlennya.html#:~:text=Як%20i%20в%20будь-якій,%2C85%20(3)%20мм.)) дата використання [15.11.22];
6. Основи G-Code для 3D-друку: список та керівництво [електронний ресурс]; режим доступу (<https://3dprintstory.org/osnovi-g-koda-dlya-3d-pechat-i-spisok-i-rukovodstvo>) дата використання [15.11.22];
7. Інженерні пластмаси [електронний ресурс]; режим доступу (<https://plastmass.kiev.ua/Inzhenernyye-plastiki/>) дата використання [15.11.22];
8. ABS пластик[електронний ресурс]; режим доступу (<https://monofilament.com.ua/>) дата використання [15.11.22];
9. PLA пластик [електронний ресурс]; режим доступу (<https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/pla/pla-naturalniy>) дата використання [15.11.22];

10. CoPET пластик [електронний ресурс]; режим доступу (<https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/copet/copet-krasnyj>) дата використання [15.11.22];
11. TPU [електронний ресурс]; режим доступу (<https://mysku.club/blog/aliexpress/89359.html>) дата використання [28.11.22];
12. КРЕАТИВНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ 3D ДРУКУ. САМІ НЕЙМОВІРНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ 3D-ПРИНТЕРА [електронний ресурс]; режим доступу (<https://koloro.ua/ua/blog/3d-tekhnologii/kreativnye-materialy-dlya-3d-pechati-samye-neveroyatnye-materialy-dlya-3d-printera.html>) дата використання [28.11.22];
13. HIPS НАТУРАЛЬНИЙ [електронний ресурс]; режим доступу (<https://monofilament.com.ua/ua/products/standartnye-materialy/hips/hips-naturalnyj-o1-75mm-ves0-125kg>) дата використання [28.11.22];
14. Кореляційно-регресійний аналіз [електронний ресурс]; режим доступу (<https://buklib.net/books/30354/>) дата використання [28.11.22];
15. Довідкова книга для проектування електричного освітлення [електронний ресурс]; режим доступу (<http://profsector.com/media/catalogs/58d695d66f756.pdf>) дата використання [21.12.22];