

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний

(повне найменування інституту, факультету)

Технологія машинобудування

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

другий (магістерський)

(ступінь вищої освіти)

на тему «Вплив режимних параметрів FDM друку на геометричну точність
деталей з CoPET»

(назва теми)

Виконав: студент(ка) II курсу, групи М-112 м

Спеціальності 131 Прикладна механіка

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Технології машинобудування

КОЗЛОВ М.Д.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ТУМАРЧЕНКО Л.О.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент ШИРОКОБОКОВ В.В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Форма № 25

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Машинобудівний
 Кафедра «Технологія машинобудування»
 Ступінь вищої освіти другий (магістерський)
 Спеціальність 131 «Прикладна механіка»
(код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) Технології машинобудування
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Сергій ДЯДЯ

«_____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

КОЗЛОВА Максима Дмитровича

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Вплив режимних параметрів FDM друку на геометричну точність деталей з CoPET»

керівник проєкту (роботи) ст.викл. ТУМАРЧЕНКО Л.О.,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» листопада 2023 року №436

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 02.12.2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд літератури; 2. Методика проведення досліджень; 3. Аналіз отриманих даних; 4. Економічне обґрунтування прийнятих рішень; 5. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

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

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	ТУМАРЧЕНКО Л.О., ст. викл.		
4	ПУХАЛЬСЬКА Г.В., к.т.н., доц.		
5	ШМІРКО В.І., к.т.н., доц.		
Нормоконтроль	ДЯДЯ С І, к т н доц.		

7. Дата видачі завдання 18.02.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури	01.04.2023	
2	Розробка методики проведення досліджень	08.06.2023	
3	Проведення експериментів	01.08.2023	
4	Аналіз отриманих даних	01.09.2023	
5	Економічне обґрунтування	15.09.2023	
6	Виконання розділу з охорони праці	01.10.2023	

Студент(ка)

Максим КОЗЛОВ
 (підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

Лариса ТУМАРЧЕНКО
 (підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 93 с., 4 табл., 60 рис., 48 джерел.

ЗД-ДРУК, ТОЧНІСТЬ, ЯКІСТЬ, ФІЛАМЕНТ, АДИТИВНА ТЕХНОЛОГІЯ, СЛАЙСЕР

Об'єктом дослідження є технологічний процес виготовлення зразків методом FDM друку.

Предметом дослідження є вплив режимів FDM друку зразків з матеріалу CoPET на шорсткість поверхні та розмірну точність.

Метою даного дослідження є визначення впливу режимів FDM друку на геометричну точність деталей з матеріалу CoPET.

Методи дослідження - експериментальний, науково-дослідний.

У роботі представлено огляд сучасного стану досягнень в галузі адитивних технологій. Розглянуто технологічний процес виготовлення зразків, обладнання, яке застосовується, матеріалів та режимів друку. Отримані та проаналізовані параметри друку та їх поєднання щодо їх впливу на основні характеристики – якість та точність отриманих зразків.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Адитивні технології у машинобудуванні	9
1.1.1 Метод пошарового наплавлення FDM/FFF 3D-друку.....	13
1.1.2 SLA 3D-друк	15
1.1.3 Фотополімерний 3D-друк.....	17
1.1.4 Вибіркове лазерне спікання – SLS 3D-друк	18
1.1.5 SHS 3D-друк	19
1.1.6 CJP 3D-друк	19
1.1.7 LOM 3D-друк.....	20
1.2 Матеріали для 3D-друку	21
1.3 Режими 3D-друку	26
1.4 Устаткування для друку 3D	30
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	35
2.1 Методика виготовлення деталей методом 3D-друку	35
2.1.1 Технологія виготовлення філаменту	35
2.1.2 Створення цифрової моделі	37
2.1.3 Підготовка 3D принтера до роботи	39
2.2 Методика визначення параметрів якості поверхні 3D моделей.....	39
2.3 Методика контролю розмірної точності деталей, отриманих 3D друком	46
РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	49
3.1 Підготовка до проведення експериментальних досліджень.....	50
3.2 Обробка результатів експериментальних досліджень	56
3.2.1 Вплив параметрів 3D-друку на шорсткість поверхні зразків.....	56
3.2.2 Вплив параметрів 3D-друку на розмірну точність зразків	63
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	79

4.1 Характеристика науково-дослідного рішення. Розрахунок витрат	79
4.2 Оцінка наукового ефекту дослідницької роботи	81
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ	83
ВИСНОВКИ.....	88
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	89

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

AF	– Additive Fabrication (Адитивне виготовлення)
AM	– Additive Manufacturing (Адитивне виробництво)
ASTM	– American Society for Testing and Materials (Американське товариство випробувань і матеріалів)
FDM	– Fused Deposition Modeling (Моделювання плавленого осадження)
SLA	– stereolithography (стереолітографія)
STL	– Standard Triangulation Language (Стандартна мова тріангуляції)

ВСТУП

В даний час виникає все більше технологій, які дозволяють виготовляти найрізноманітніші вироби. Технологія отримання деталей методом 3D-друку, яка виникла нещодавно, відноситься саме до цих сучасних прогресивних методів.

З її появою майже відпадає необхідність використання безлічі дорогого обладнання, особливо для отримання деталей складної форми. Деталі отримують так званою наскрізною технологією, коли 3D-модель, побудовану в комп'ютерній програмі, передають на принтер і протягом відносно невеликого часу деталь готова, причому з усіма необхідними механічними і властивостями міцності.

Отже, переваги цієї технології численні. Це безвідходне виробництво: задіяний, але не використаний матеріал можна використовувати знову; наявна низька трудомісткість операцій. Кількість обладнання – мінімальна. При цьому, максимально скорочені терміни підготовки виробництва. Тобто факт швидкого виготовлення фізичних об'єктів деталей стає ключовим.

Тому, технологія 3D-друку, на сьогоднішній день, є найактуальнішою для швидкого виготовлення деталей машинобудування.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Адитивні технології у машинобудуванні

У 1983 році технолог Чарльз Халл, працюючи з фотополімером, винайшов перший у світі 3D-принтер. Був застосований процес, який включає виготовлення об'ємної фізичної моделі без використання верстата.

Першими клієнтами, які зацікавилися цим винаходом, були автомобільні компанії. Це сталося через зацікавленість технологіями, які б змогли прискорити, спростити, поліпшити процес виготовлення деталей. Спеціально для процесів у машинобудуванні був розроблений метод *Quik Cast*, за допомогою якого вдавалося швидко відливати деталі із заданими розмірами та параметрами з різних сплавів. На відміну від інших методів, це займало мінімум часу, практично лічені дні. Тому, цей напрям став пріоритетним і перспективним [1].

Сьогодні областю застосування адитивних технологій, як альтернативи традиційним методам обробки, можна вважати авіаційну промисловість та енергетичне машинобудування. У ряді випадків при проведенні розрахунків витрат адитивні технології виявляються менш дорогими, ніж традиційні [2, 5, 6].

Термін «адитивні технології» походить від слова «адитивний», тобто той, який отриманий шляхом «додавання» чи «наращування».

Існують наступна термінологія в сфері адитивних технологій [2, 5]:

- *Additive Fabrication (AF)*.
- *Additive Manufacturing (AM)*.

Вперше питання термінології в цій галузі досліджувала організація, яка займається розробкою стандартів для різноманітних матеріалів та виробів - *ASTM INTERNATIONAL (American Society for Testing and Materials)*. ASTM у стандарті ASTM F2792.15493231 дає наступне визначення адитивних

технологій: «*The process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies*», що означає: «Процес об'єднання матеріалу з метою створення об'єкта з даних 3D моделей пошарово, на відміну від технологій що «віднімають». Під технологіями, що «віднімають», мається на увазі механічна обробка (лезова, абразивна) – видалення «віднімання», «зняття» шару матеріалу з поверхні заготовки [2].

Крім наведених вище термінів зустрічаються й інші: *additive processes*, *additive techniques*, *additive layer manufacturing*, *layer manufacturing* та *freeform fabrication*. Українською мовою ці терміни можуть бути перекладені як «адитивні технології». У розмовній промові конструктори, технологи використовують терміни: «виросування», «3D-друк», «3D-принтер», «3D-принтінг» [3].

Застосування адитивних технологій у машинобудуванні дозволяє досягти низки переваг, а саме [2]:

- виключається конфлікт між конструктором та технологом;
- зміни в технологічний процес виготовлення деталі або виробу вносять на етапі передачі у виробництво, що виключає або зменшує ймовірність отримання бракованих деталей та виробів;
- метод дозволяє виготовити деталі складної геометричної форми;
- виготовляються вироби в рамках дослідного виробництва;
- знижується рівень втрат відходів виробництва, стружки;
- зменшуються витрати на виготовлення інструментального оснащення;
- зростає номенклатура виробів.

Процеси, що застосовуються в АМ-технологіях, визначаються станом матеріалів, що використовуються [2]:

- рідкий стан (полімери) – стереолітографія, пошарове наплавлення, струменевий друк;

- порошкоподібний стан (полімери, кераміка) – 3D-друк, селективне лазерне спікання, селективна лазерна плавка;
- порошкоподібний (метали) – пряме лазерне спікання металів, електронно-променева плавка, пряме нанесення металів, точне лазерне формування;
- тверде (полімери, метали, кераміка, композиційні матеріали);
- пошарове виготовлення об'єктів з листового металу (листи), довільне екструзійне формування (дріт).

За методом формування шару АМ-технології поділяються на два види:

- *Bed Deposition*.
- *Direct Deposition*.

Технології *Bed Deposition* відповідає термін «селективний синтез» або «селективне лазерне спікання» якщо інструментом, що «затверджує», є лазер, який тут, на відміну від лазерної стереолітографії (SLA-технології), є джерелом тепла, а не ультрафіолетового випромінювання (рис. 1.1) [4].

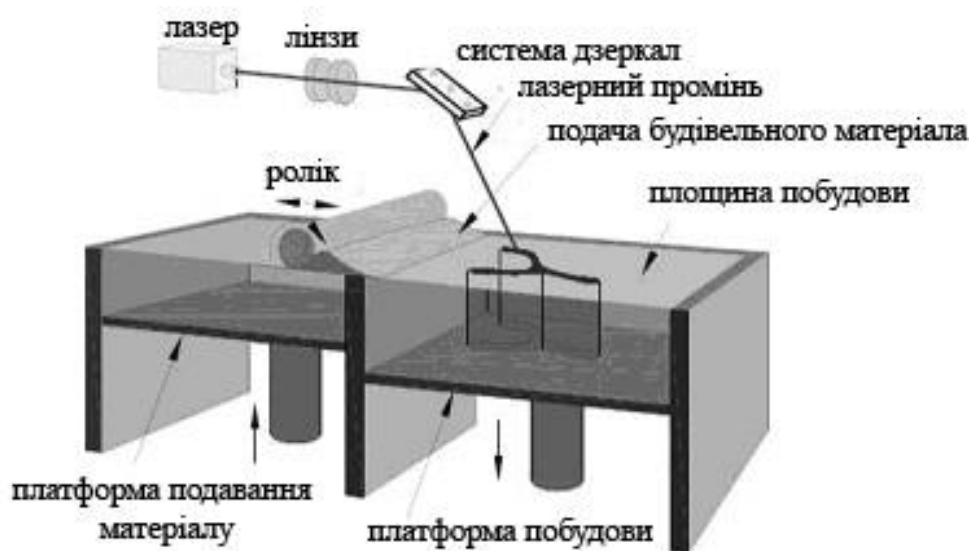


Рисунок 1.1 – Технологія селективного лазерного спікання (*Bed Deposition*) [4]

Технологія *Direct Deposition* перекладається як «пряме або безпосереднє осадження (матеріалу)» безпосередньо в точку, куди підводиться енергія і де відбувається в даний момент побудова фрагмента деталі (рис. 1.2) [3].

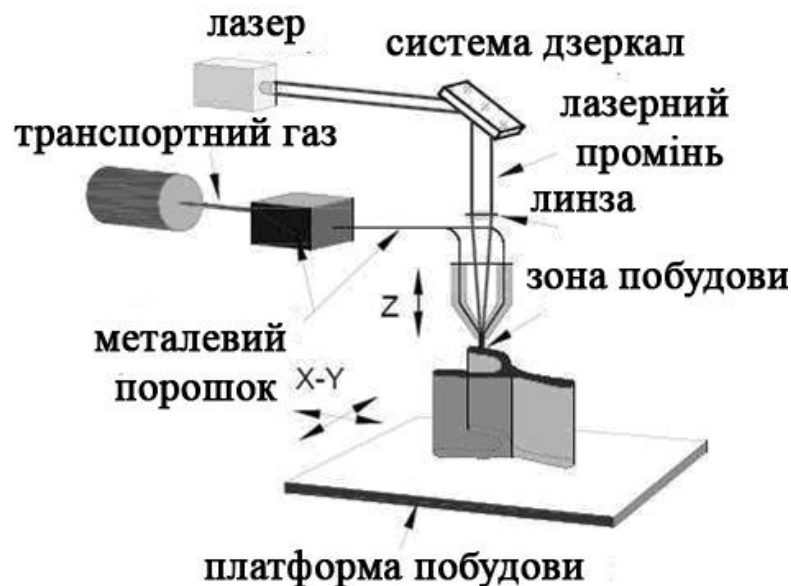


Рисунок 1.2 – Технологія прямого осадження матеріалу (*Direct Deposition*) [4]

Крім виготовлення деталей та виробів перспективними напрямками застосування АМ-технологій є виготовлення технологічного оснащення та різального інструменту. Прикладом можуть бути: виготовлення вставок для термопласт-автоматів матриць або прес-форм з легких сплавів, свердл із твердосплавними вставками з використанням гібридного (змішаного) підходу, при якому різальна пластина інструменту спікається традиційним способом, а його корпус виготовляється методом селективного лазерного плавлення. Ці технології показали себе як найефективніші.

3D-друк – це методика виготовлення об'ємних виробів на основі просторових моделей. Процес друку 3D складається з етапів. Насамперед виконується 3D модель необхідного об'єкта за певними правилами. Для цього використовуються сучасні комп'ютерні програми. CAD модель – створений

цифровий макет об'єкта, який має бути сформований за допомогою адитивних технологій на 3D принтері. Тривимірну CAD-модель можна як розробити за власним дизайном методом комп'ютерного проектування, так і створити за даними, зібраними за допомогою 3D сканера [7].

Далі файл з цифровою моделлю завантажується в програму-слайсер, в якій генерується керуючий код для 3D-принтера. Встановлюються необхідні параметри 3D-друку, записується код на носій пам'яті, що знімається, який підключається до 3D-принтера. Наступний етап – відтворення 3D-моделі.

Відтворення об'єктів відбувається поступово. Шар за шаром наноситься матеріал, формуючи готовий виріб. Слід зазначити, що можливості 3D-друку практично безмежні, що робить цей метод головним відкриттям XXI століття, відомим у світі.

Усі технології 3D-друку пластиком засновані на чотирьох основних методах переробки полімерних матеріалів:

- екструзія;
- фотополімеризація;
- гранулювання;
- ламінування.

Найбільш поширеними технологіями 3D-друку, які застосовуються в побуті та промисловості є [6]:

- формування виробів методом пошарового наплавлення (FDM);
- стереолітографія (SLA).

1.1.1 Метод пошарового наплавлення FDM/FFF 3D-друку

Для виготовлення деталей методом FDM 3D-друку використовують філамент з різних термопластичних матеріалів. Філамент поставляється у

вигляді катушок і може бути двох стандартних діаметрів: 1,75 і 3 мм в залежності від принтера [7].

Побудована цифрова 3D-модель у форматі STL передається в програмне забезпечення 3D-принтера, далі, автоматично розміщується у віртуальному просторі робочої камери. За необхідністю розраховуються додаткові елементи допоміжних конструкцій. Розраховується необхідна кількість витратного матеріалу, а також часу «виращування» прототипу. Перед процесом друку модель розділяється на горизонтальні шари і проводиться розрахунок траєкторії переміщення екструдера – пристрою, який оснащений механічним приводом для подачі філаменту, нагрівальним елементом для його плавлення і соплом, через яке здійснюється безпосередньо екструзія – виштовхування розплавленого полімерного матеріалу на поверхню виробу (рис. 1.3, а) [7-9].

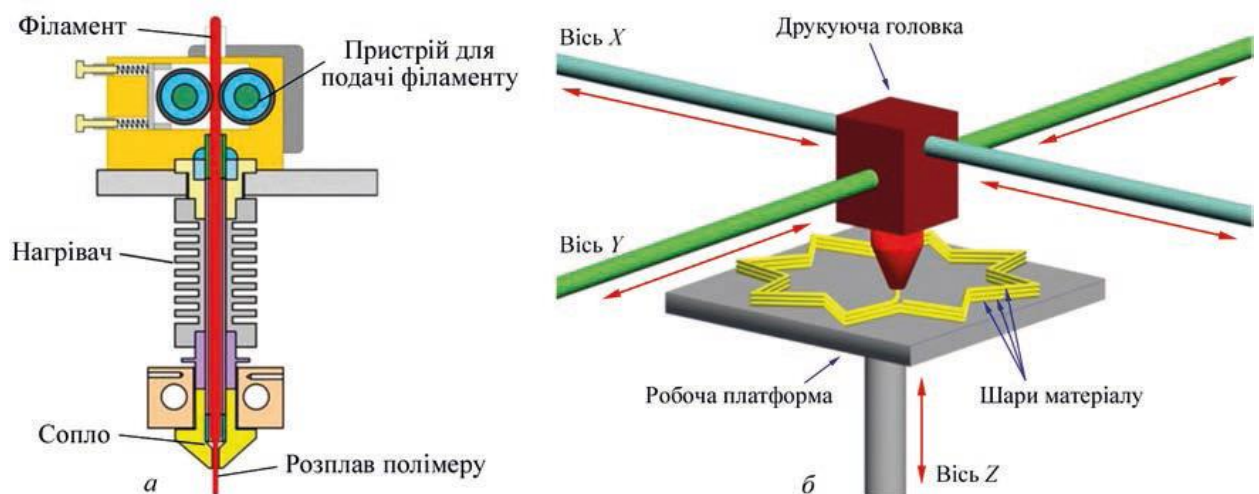


Рисунок 1.3 – Схема екструдера FDM 3D-принтера (а) і процесу створення ним тривимірної моделі (б) [9]

Згідно побудованого керуючого кода для 3D принтера, який формується завдяки параметрам моделі, запускається процес 3D-друку. Екструдер розплавляє філамент і подає матеріал тонкими шарами на робочу поверхню 3D принтера у відповідності до алгоритму друку та CAD 3D-

моделі. Після нанесення кожного шару полімерний матеріал охолоджується і затвердіває, а платформа, на якій формується об'єкт, опускається на величину, рівну товщині шару, що наноситься (рис. 1, б).

Цей метод має певні переваги, до яких відносяться [6]:

- простота використання і відсутність спеціальних вимог до приміщення, в якому встановлено обладнання, а саме придатність для застосування в офісі;
- низька вартість FDM-принтерів і витратних матеріалів;
- можливість використання широкого асортименту типів пластика різних властивостей і кольорів.

Але, незважаючи на переваги, цей метод має і недоліки, до яких відноситься:

- для складних форм деталей, де є так звані нависаючі елементи, необхідним є створення підтримуючих елементів, які після завершення друку необхідно видаляти;
- невелика роздільна здатність, що призводить до шаруватості поверхні виготовленої моделі;
- можлива наявність термічної усадки, яка призводить до зміни геометричних розмірів виробу після його охолодження.

1.1.2 SLA 3D-друк

Стереолітографія – це одна з найбільш прецензійних технологій [10–12]. У якості матеріалу в ній застосовується рідка фотополімерна смола. Під впливом лазерного випромінювання відбувається пошарове тверднення стінок деталі і формування готового виробу.

У звичному варіанті SLA 3D-принтера, лазер розташований зверху, а робоча платформа поступово опускається вниз (рис. 1.4). У робочий резервуар зі спеціальною рідиною – суміщу фотополімеру і реагента-твердника, занурюється сітчаста платформа на глибину не більше 0,05...0,13 мм. Далі, активується лазер, рідина твердне і прилипає до платформи.

Кожен шар по суті є 2D зображення, яке будується лазером, згідно з даними, закладеними в просторовій цифровій моделі.

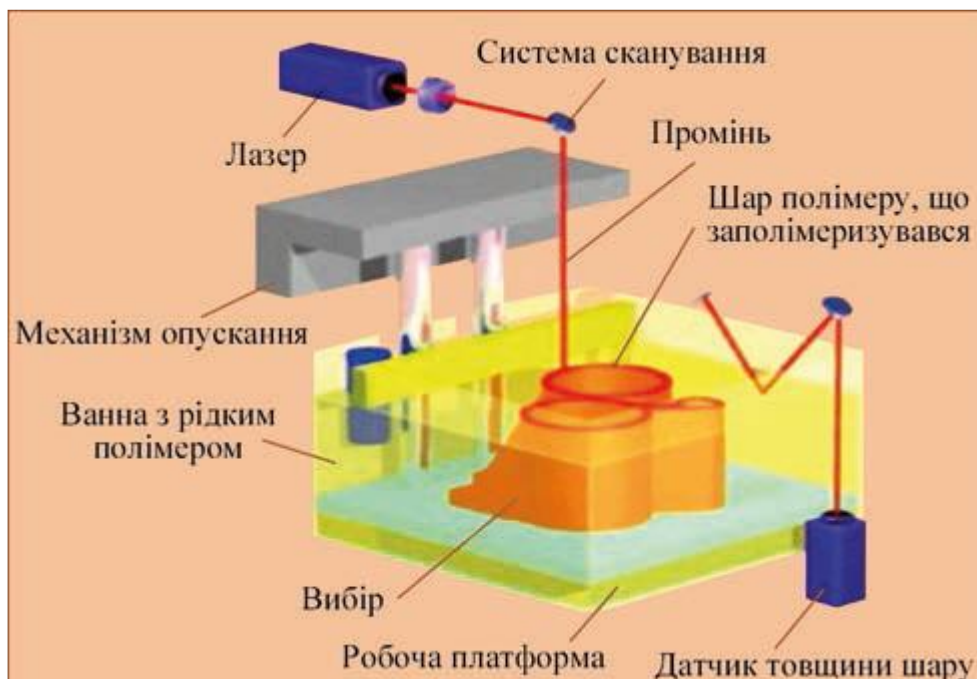


Рисунок 1.4 – Схема процесу SLA 3D-друку [13]

Основними перевагами SLA 3D-друку є: висока точність побудови готового виробу, висока міцність на стиск отриманої та можливість виготовлення моделей складних форм зі збереженням дрібних геометричних елементів.

До недоліків відносять: масивність обладнання, високу вартість обладнання та витратних матеріалів і відсутність можливості використання в одному циклі різних матеріалів. Усадка матеріалу, яка відбувається при твердінні знижує міцність на вигін і удар.

DLP 3D-друк метод, розроблений на основі методу SLA 3D-друку. На відміну від вище розглянутого метода, замість лазера використовується цифровий світлодіодний проектор, який засвічує цілий шар одночасно, а не поступово, як лазер в стереолітографії [14, 15]. Це дозволяє відтворити об'єкт швидше.

1.1.3 Фотополімерний 3D-друк

Технологія PolyJet та MJM 3D-друку полягає у використанні пошарового наповнення рідких світлочутливих полімерних матеріалів з подальшим опроміненням кожного нанесеного шару ультрафіолетовою лампою [15, 16].

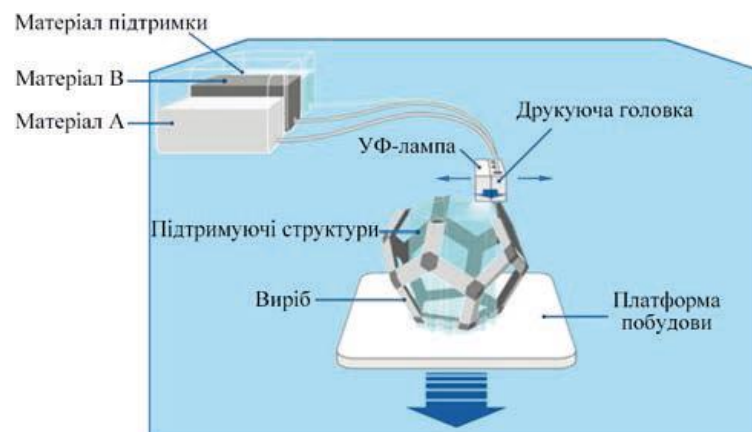


Рисунок 1.5 – Схема процесу PolyJet та MJM 3D-друку [17]

Тонкими шарами розпорошується рідкий витратний матеріал: матеріал моделі – матеріал А і матеріал підтримки – матеріал В (рис. 1.5) у відповідності до тривимірної CAD 3D-моделі.

Цей метод дозволяє досягти високу точність і швидкість побудови моделей зі складною геометрією, відмінні фізичні і механічні властивості виробів. Забезпечує можливість друку різними матеріалами при виготовленні

однієї 3D-моделі в процесі єдиного робочого циклу. До основних недоліків відносять високу собівартість процесу.

1.1.4 Вибіркове лазерне спікання – SLS 3D-друк

Вибіркове лазерне спікання – це одна з методик 3D-друку, яка широко застосовується на дорогих професійних 3D-принтерах і відрізняється високою якістю виробів [21]. З її допомогою можна досягти результату, наближеного до відтворення виробів методом лиття під тиском. Ця методика дозволяє створювати повністю готові вироби складної геометричної форми.

В конструкцію принтера входить лазерна установка і скануюче дзеркало промінь лазера, який направляється на необхідні ділянки порошку, спікаючи їх разом. В процесі друку платформа робочої камери постійно опускається вниз, що забезпечує знаходження матеріалу і променя лазера на одному рівні. SLS-процес не потребує побудови додаткових підтримуючих структур, тому, що для підтримки використовується невикористаний порошок, що дає можливість виготовлення виробів складної геометричної форми.

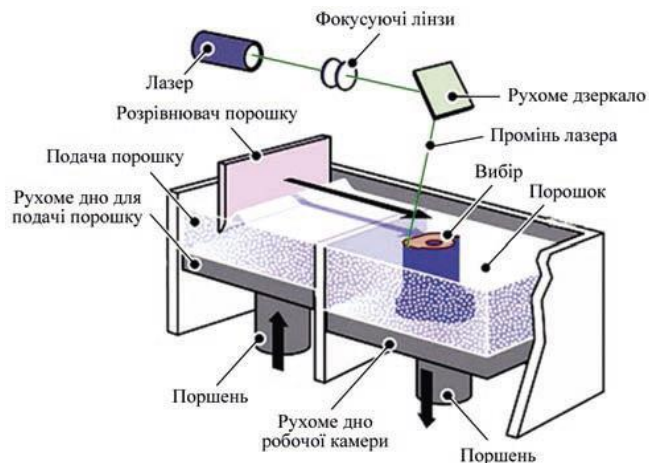


Рисунок 1.6 – Схема процесу SLS 3D-друку [18]

1.1.5 SHS 3D-друк

Ця технологія відрізняється використанням замість лазера для плавки шарів термопластичного порошку, як джерела інфрачервоного випромінювання [19, 23].

До основних переваг відносять високу швидкість друку та вартість SHS 3D-принтера.

Основні недоліки технології це – низька енергетична віддача, необхідність додаткового відпалу отриманих виробів для досягнення більшої міцності.

1.1.6 CJP 3D-друк

Дана технологія 3D-друку дозволяє швидко створювати як монохромні, так і кольорові об'єкти з композитного порошку. Як витратний матеріал використовуються два види матеріалу – основний і зв'язуючий. Основний матеріал – порошковий пластик, який необхіден для формування шарів виробу, в той час як зв'язуючий у вигляді клеєподібної субстанції одночасно склеює між собою частинки матеріалу в потрібних місцях у відповідності до комп'ютерної 3D-моделі [15] (рис. 1.7).

Основними недоліками є наявність гігроскопічної поверхні підвищеної шорсткості та вироби потребують обережної обробки після формування внаслідок їх крихкості.

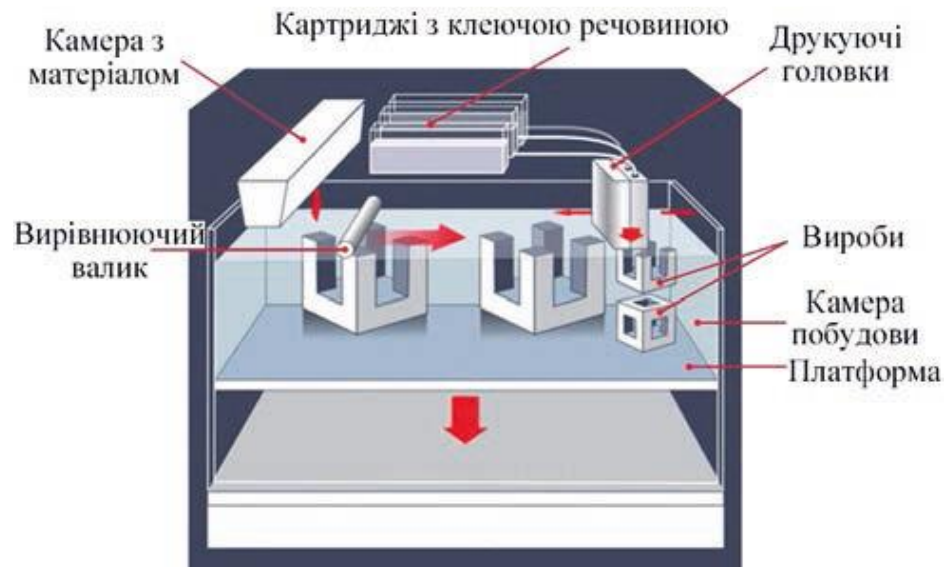


Рисунок 1.7 – Схема процесу CJP 3D-друку [19]

1.1.7 LOM 3D-друк

Виготовлення тривимірних об'єктів методом ламінування полягає в пошаровому склеюванні матеріалів в заданих координатах з подальшим обрізанням надлишків [15, 22]. Витратним матеріалом зазвичай слугує полівінілхлоридна (ПВХ) плівка товщиною 0,15 мм п'яти кольорів (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Схема процесу LOM 3D-друку [23]

Після відрізання першого контуру шару моделі за допомогою лазера, платформа опускається вниз і поверх першого шару накладається наступний шар матеріалу. За рахунок нагрівання і укладання під тиском відбувається склеювання (ламінування) шарів.

Основні переваги технології LOM 3D-друку: дешевизна витратних матеріалів та нависаючих елементів не потрібно формувати підтримуючі структури. Недоліки це – недостатня міцність виробів та ризик розшарування. Поверхня деталі формується грубою і потребує подальшої механічної обробки, що назавжди можлива.

Таким чином, всі перераховані вище технології отримали розвиток і мають величезний потенціал. Не існує на сьогодні якогось одного універсального методу, який би вирішував би всі завдання. в кожному окремому випадку необхідно враховувати всі початкові умови и ті результати, які необхідно досягти.

1.2 Матеріали для 3D–друку

Найбільш поширеними матеріалами для 3D–друку є PLA та ABS пластики. Вони використовуються для виконання різних проектів.

На відміну від інших матеріалів, PLA дуже тендітний, його не варто використовувати, якщо виріб буде згинатися, стискатися або часто падати. [25]. Також він не рекомендується до використання для моделей, які піддаватимуться впливу високих температур, тому, що моделі з PLA починають втрачати форму при 60 °C і більше (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – PLA матеріали

Основні характеристики PLA пластику [25]:

- міцність: висока / гнучкість: низька / довговічність: середня;
- складність використання: низька;
- температура друку: 180 °C – 230 °C;
- температура для друку: 20 °C – 60 °C;
- усадка/деформація при охолодженні: мінімальна;

ABS займає друге місце за популярністю. За своїми властивостями ABS є своєрідним покращенням PLA, хоча друкувати їм набагато складніше. При цьому завдяки своїм фізичним властивостям ABS пластики активно використовуються у виробництві. З цього матеріалу виготовляють, наприклад, цеглини LEGO та шоломи для мотоциклів (рис. 1.10).

Вироби з ABS пластику мають високий термін служби, витримують високі температури, але при цьому для 3D друку треба підтримувати високу температуру, пластик має властивість утискатися при охолодженні, випаровування при друку ABS пластиком шкідливі для організму. Друкувати ABS пластиком треба з використанням підігрітого столу, в приміщенні, що добре провітрюється.

Основні характеристики ABS пластику для 3D друку [25]:

- міцність: висока / гнучкість: середня / довговічність: висока;

- складність використання: середня;
- температура друку: 210 °C – 250 °C;
- температура для друку: 80 °C – 110 °C;
- усадка/деформації при охолодженні: середня;
- розчинник: ацетон та його аналоги;
- екологічно безпечний: ні.



Рисунок 1.10 – ABS пластик

Однак, іноді можливості цих матеріалів недостатні і є необхідність застосування інших матеріалів. Виділимо деякі з них.

Нейлон – міцний, зносостійкий матеріал. До переваг можна віднести високу термостійкість, стійкість до великої кількості розчинників і доступність. Нейлон добре піддається механічній обробці. До недоліків слід віднести високу гігроскопічність та необхідність використовувати підкладку або гарячий стіл для кращої фіксації. Набув широкого застосування у промисловості [25] (рис. 1.11).

Основні характеристики нейлону [25]:

- міцність: висока / гнучкість: висока / довговічність: висока;
- складність використання: середня;
- температура друку: 240 °C – 260 °C;
- температура для друку: 70 °C – 100 °C;

- усадка/деформація: середня;
- розчинний: ні;



Рисунок 1.11 – Вироби з нейлону

PET і CoPET – матеріали широко застосовуються в промисловості при виробництві методом лиття під тиском. Цей вид пластику застосовується в 3D-друку, як у промислових установках у вигляді порошку, так і в настільних принтерах 3D у вигляді пластикової нитки. Перевагами 3D пластику PET є висока жорсткість, зносостійкість, міцність, стійкість до кислот і лугів, вогнестійкість, удароміцність та здатність витримувати високі температури, а також до органічних розчинників. Після гартування CoPET здатний витримувати температуру в 220 °C [29]. PET досить універсальний матеріал з гарною жорсткістю та опором високим температурам. Завдяки цьому PET чудово проявить себе для виготовлення окремих деталей для механізмів, машин, того ж 3D принтера. Відмінно підходить для захисних виробів та корпусів.

До недоліків слід віднести схильність до мимовільної кристалізації, що може призводити до деформації виробів.

Полікарбонат – володіє високим ступенем прозорості, міцністю, стійкістю до високих та низьких температур, вогнестійкістю, удароміцністю,

відмінними діелектричними властивостями та термостійкістю. До недоліків відноситься гігроскопічність і погана стійкість до ультрафіолетового випромінювання [29].

В сфері матеріалів для 3D друку є ряд матеріалів, які відносяться до так званих екзотичних.

Сьогодні існує широкий асортимент матеріалів wood-PLA. Серед них:

- зі «стандартними» домішками на кшталт сосни, берези, кедра, чорного дерева та верби,
- не звичайні: з домішками бамбука, черешні, кокосового, коркового та оливкового дерев.

Основні причини використання цих матеріалів це – естетичні та тактильні причини. В роботі з таким матеріалом необхідно бути обережним з температурою друку, оскільки перегрів може призвести до вигорання добавок дерева. Якісна пост обробка теж важлива, тому що в подібних моделях ми орієнтуємось саме на естетичний зовнішній вигляд.

Дерево варто використовувати, коли не важливі функціональні властивості, а потрібен зовнішній вигляд. Наприклад, якщо надалі надрукований виріб просто стоятиме на столі або полиці і радуватиме око (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Вироби з wood-PLA [29]

Матеріали для 3D друку металом це суміш металевого порошку та PLA або ABS. Але при цьому надруковані вироби навіпамацки і на вигляд зовсім як металеві, навіть за вагою. Більшість матеріалів для друку 3D на основі металу містять близько 50% металевого порошку і 50% PLA або ABS. Але є матеріали, що містять до 85% металу.

Бронза, латунь, мідь, алюміній і нержавіюча сталь - це лише один з небагатьох видів доступних матеріалів. Але є й великий недолік. Гранули металу є своєрідним абразивом і в результаті сопло екструдера зношується набагато швидше.

Метал можна використовувати і для практичних, і для естетичних цілей. Статуетки, моделі та іграшки будуть виглядати чудово. Можна виготовляти інструменти, деталі, але не варто їх використовувати з високими навантаженнями (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 – Вироби з металу [29]

1.3 Режими 3D–друку

До основних режимів 3D друку можна віднести саме ті, які налаштовуються перед початком роботи. Це, перш за все:

- температура плавлення філаменту;
- температура робочої платформи;
- коефіцієнт подачі пластику;
- швидкість друку;
- товщина шару.

Якщо сопло недостатньо нагріте, то шари будуть погано з'єднуватись. Виріб виходить неякісним та тендітним. виправити таку ситуацію можна зниженням температури сопла. У разі коли друкарські кулі не прилипають до робочої платформи, йдеться вже про дуже низькі температури сопла.

Більш того, різним маркам та кольорам ниток пластику характерні різні температури, за яких вони добре друкуються. Загальний діапазон становить від 190 °C до 220 °C [24].

Важливе значення для 3D-друку має температура робочого столу. Найочевидніша ознака того, що температура надто низька, це якщо надрукований виріб не прилипає до столу. У разі перегріву платформи може з'явитися дефект під назвою «слонова нога» – наслідок перегрітої робочої поверхні, що призводить до розплавлення перших двох шарів відбитка. Найкращим діапазоном температури платформи при обробці філаменту PLA є значення від 55 °C до 70 °C [24].

Температура довкілля також впливає на температуру друку. На неї впливає і вітерець із вікна та вентилятор, спрямований у бік принтера. Ця проблема вирішується вибором корпусу для принтера, який вирішує два завдання: захищає виріб і зберігає тепло. Корпус принтера може складатися з різних матеріалів: металу, фанери тощо.

Вибір коефіцієнта подачі здійснюють експериментальним шляхом. За підсумками цих експериментів можна дійти невтішного висновку, що з кожної деталі необхідно підбирати свій коефіцієнт подачі. В цілому, якщо значення коефіцієнта подачі пластику мають мале значення, формуються тонкі шари або шари з небажаними западинами, а також деякі шари можуть

бути відсутніми. Великі значення цього параметра означають, що 3D-принтер подає дуже багато пластику і через це матеріал відшаровується по краях моделі.

Швидкість 3D-друку – це основне налаштування, яке впливає на якість друку. Вона визначає, наскільки швидко рухаються вузли принтера, які управляють вісями X та Y, а також двигун екструдера.

Низькі значення швидкості означають те, що сопло занадто довго знаходиться на пластику і це може спричинити деформацію. Високі значення можуть спричинити появу інших дефектів від перегріву, спричинені недостатнім охолодженням, а також екструзією та слабкою адгезією шарів.

На рис. 1.14 показано залежність якості 3D-друку від швидкості. По ній видно, що зі збільшенням швидкості якість знижується.

У своїх значеннях швидкість 3D друку складається зі швидкості друку, швидкості холостого ходу, швидкості ретракту.

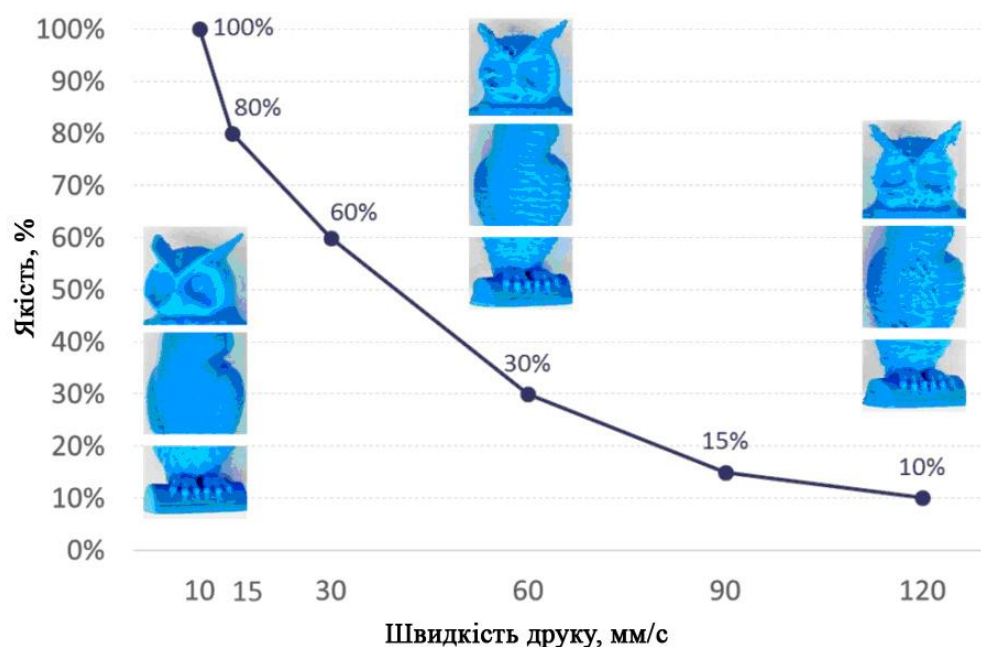


Рисунок 1.14 – Залежність якості 3D-друку від швидкості [25]

Швидкість друку поділяється на кілька додаткових різновидів [25]:

- швидкість 3D-друку зовнішньої стінки/оболонки. Цей параметр регулює швидкість друку зовнішнього периметра моделі. Зазвичай його трохи зменшують для покращення якості поверхні.

- швидкість 3D-друку внутрішньої стінки/оболонки. Цей параметр регулює швидкість друку внутрішнього периметра моделі. Зазвичай вона така сама, як і загальна швидкість друку, щоб скоротити час друку при збереженні міцності.

- швидкість 3D-друку заповнення. Цей параметр регулює швидкість заповнення моделі. Зазвичай це така сама, як і загальна швидкість друку, щоб скоротити час 3D-друку при збереженні міцності.

- верхня/нижня швидкість 3D-друку. Цей параметр регулює швидкість друку верху та низу моделі. Зазвичай його трохи зменшують, щоб покращити якість поверхні моделі.

Від швидкості холостого ходу залежить, як швидко рухається друкуюча головка принтера, коли вона не видавлює пластик. Збільшення цього параметра переміщення може значно заощадити час, разом з тим занадто велике значення призводить до виникнення багатьох дефектів, наприклад зміщення шарів.

Для визначення оптимальної швидкості переміщень на холостому ході для принтера необхідно попередньо роздрукувати так звану тестову модель, параметри поверхні та точність якої покаже необхідне значення. Швидкість ретракту регулює, наскільки швидко 3D принтер відводить матеріал перед переміщенням. Цей параметр має вирішальне значення для зменшення кількості залишків матеріалу та підвищення якості 3D друку. Малі значення призводять до утворення непривабливих ниток та плям на моделях. Великі значення викликають надмірне зношування матеріалу приводної шестерні екструдера, що призведе до утворення порожнин. Оптимальні значення також знаходять з використанням тестової моделі.

Також на якість виробів впливає і те, скільки пластику і якої товщини видавлюється на кожен шар 3D-моделі. Налаштування товщини пов'язані зі швидкістю та впливають по-різному.

Налаштування стінок показує, скільки периметрів пластику видавлено, щоб сформувати контур вашої деталі. Збільшення кількості шарів збільшує міцність деталі, але збільшує час 3D-друку.

Заповнення – це внутрішня структура, створена для економії матеріалу при 3D друкуванні внутрішньої частини 3D-моделей. Шаблон заповнення незначно вплине на швидкість 3D друку, в той час, як щільність заповнення значно змінить час друку. Вища щільність заповнення збільшує міцність деталі, але також збільшує час друку.

Висота шару суттєво впливає на швидкість друку. Чим більша висота шару, тим швидше все буде завершено. Цей параметр регулюється залежно від роздільної здатності друку.

Таким чином, для досягнення оптимальних значень вищезазначених параметрів 3D-друку необхідно використовувати експериментальний підхід.

1.4 Устаткування для друку 3D

У сучасному виробництві, пов'язаному з 3D-друком, важливим фактором є процес вибору пристрою – принтера. Всі вони мають свої характеристики і призначені для вирішення різних завдань. При виборі принтера необхідно знати, які завдання потрібно вирішувати на цьому етапі. Тому потрібно знати ці властивості.

Класифікувати всі принтери можна за різними типами:

- за технологією друку;
- за матеріалами;
- за умовами використання.

За технологією друку можна виділити найпоширеніших типу – FDM і SLA. Кожен із них має свої технічні особливості. Від цього залежить і вид матеріалів і рівень обслуговування. На рис. 1.15 показано моделі цих принтерів.



Рисунок 1.15 – Принтери типу FDM (а) и SLA (б)

Принтери типу FDM підходять для моделювання, виготовлення простих деталей, які не використовують у складних конструкціях. Апарати типу SLA використовують у більш складних та точних роботах. Там, де потрібна точність, а вартість витратних матеріалів не має великої ролі [26, 27].

Простір, де відбувається побудова моделі, називається камерою. У деяких принтерах камера друку відсутня, і в цьому випадку говорять про обсяг робочого простору. Існує два типи камер: відкритого та закритого типу. Виконання відкритого типу можна зустріти на FDM-пристроях, закритого на SLA-принтерах. Коли йдеться про екструдера, цей термін відноситься до FDM-друку. У сучасних FDM-пристроях прийнято розрізняти два типи екструдерів:

- тип *Direct*.

Пристрій знаходиться всередині вузла друку. Це знижує швидкість роботи, але дає менше дефектів друку.

- типу *Bowden*.

Пристрій знаходиться поза вузлом друку. Швидкість та точність вищі, але можуть з'являтися часті дефекти.

Також 3D-принтери класифікують за матеріалами – типом матеріалу, яким вони можуть друкувати.

Принтери по металу – це 3D-принтери, які друкують металом (рис. 1.16). В адитивному виробництві використовуються:

- нержавіюча сталь;
- інструментальна сталь;
- титанові метали;
- алюмінієві сплави;
- суперсплави на основі нікелю, такі як *Inconel* (аустенітний сплав Ni-Cr);
- кобальт-хромові метали;
- сплави на основі міді;
- дорогоцінні метали (золото, срібло, платина);
- екзотичні метали (паладій, тантал).



Рисунок 1.16 – 3D-друк металом [29]

Все частіше можна зустріти 3D-принтери для виробництва їжі з використанням адитивних методів виробництва (рис. 1.17).



Рисунок 1.17 – 3D принтер для харчової промисловості [28]

З'явилися харчові принтери, за допомогою яких можливий об'ємний 3D-друк різних страв. Кулінарні принтери працюють, виконуючи пошаровий друк фігур. У цьому випадку найпоширенішими компонентами для друку є:

- функціональні компоненти (пробіотики, мінерали, вітаміни, жирні кислоти, фіто-хімічні речовини та інші антиоксиданти);
- жири;
- різні види вуглеводів, такі як борошно та цукор;
- білки (тварини або рослинні) для утворення м'ясної текстури;
- гідрогелі, такі як желатин та альгінат;
- шоколад.

Принтери для друку біоматеріалів (біопринтинг) – це створення об'ємних моделей за допомогою біоматеріалу, якими можуть бути живі клітини. Він використовується для відтворення складних структур, таких як шкіряні тканини або кровоносні судини [30].

Перший серійний біопринтер був випущений американською компанією *Organovo* наприкінці 2009 року. Її промисловим партнером стала австралійська компанія *Invetech*. Завдяки спільним зусиллям і з'явився на світ агрегат, який у 2010 році надрукував першу повноцінну кровоносну судину (рис. 1.18).



Рисунок 1.18 – Біопринтер [30]

Промислові принтери 3D – це особливий тип принтерів. Вони мають великі габарити, необхідні для виробництва виробів у великій кількості у короткий термін. Активно використовуються в різних галузях, таких як аеронавтика, електроніка та напівпровідники, фармацевтика, транспортні засоби, будівництво, аерокосмічна промисловість, автоспорт тощо.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методика виготовлення деталей методом 3D-друку

2.1.1 Технологія виготовлення філаменту

Філамент – це необхідна частина процесу 3D друку, обов'язковий компонент 3D друку FDM. У сучасному 3D виробництві затребувані та застосовуються різноманітні матеріали. Усі вони доступні для використання.

Сам процес виготовлення філаменту можна розбити на п'ять етапів.

Першим етапом є одержання пластику. Сира нафта нагрівається в печі та поділяється на безліч компонентів. Один із них – лігроїн. Далі лігроїн, каталізатори та інші хімічні компоненти хімічно зв'язуються в реакторі полімеризації. Продукти полімеризованого лігроїну компонується та обробляються для утворення пластику. Пластик є найпопулярнішим витратним матеріалом для 3D друку. Виготовлений пластик гранулюється, при цьому одержують гранулянт – фракції діаметром 3–5 мм.

З другого етапі гранули готують до процесу надання їм форми – це ниткоподібна форма. Для цього їх поміщають у промисловий блендер і змішують з добавками для надання однорідності та особливих властивостей: міцності, структурної цілісності, удароміцності тощо. Отримані гранули гігроскопічні, тому, на цьому етапі обов'язковий процес їх просушування. Сушіння відбувається при температурі від 60 °C до 80 °C протягом декількох годин.

Наступний етап процесу виробництва філаменту для 3D принтера – це надання гранулам форми нитки. Гранули подають в екструдер для матеріалу, який містить камеру для нагрівання. У нагрітому стані гранули з'єднуються та утворюють суцільний матеріал. Через сопло круглої форми, зв'язаний матеріал переміщується в зону охолодження. Ця зона включає кілька водяних камер з теплою, а потім з прохолодною водою. Правильне налаштування

температури води дає можливість отримання нитки саме круглої форми, оскільки така форма забезпечує якісний друк.

На четвертому етапі, етапі намотування, двигуни протягують нитку з камери, що охолоджує, до намотувального механізму. Процес намотування починається з вимірювання діаметра нитки за допомогою лазерного пристрою, щоб переконатися, що він знаходиться в межах допуску необхідного кінцевого діаметра.

Останній етап – це процес пакування підготовлених катушок з філаментом. Після цього технологічний процес виробництва філаменту для тривимірного друку вважається завершеним.

Технічні вимоги до філаментів обумовлено ГОСТ 59100-2020. Згідно з ГОСТ 59100-2020 філамент виготовляють діаметрами 1,75 мм, 2,85 мм та 3,00 мм або іншими діаметрами за погодженням між виробником та споживачем. Граничне відхилення діаметра $\pm 0,03$ мм, Поверхня філаменту повинна бути гладкою, без сторонніх домішок, тріщин, зламів, механічних пошкоджень і пор.

У цій роботі будуть проведені дослідження зразків, отриманих із пластику типу Co-PET. Co-PET - поліетилентерефталат сополіме, одержуваний за допомогою введення до складу базового полімеру (PET) 1,4-біс гідроксиметил циклогексану (CHDM) [31]. Це аморфний матеріал з гладкою глянцевою поверхнею, що відрізняється високою прозорістю та рівномірним світлорозсіюванням, вогнестійкістю, відсутністю у складі шкідливих компонентів, підвищеною стійкістю до ударів, хімічною стійкістю. Технічні характеристики показані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Технічні характеристики матеріалу Co-PET [31]

Міцність на розтягування	не менше 50 МПа
Міцність на вигин	70 МПа
Модуль еластичності	2100 МПа
Діаметр нитки	1,75 мм
Овальність	±0,02 мм
Точка плавлення	200
Лінійна маса (довжина 1 кг мононитки)	330 м/кг
Технологія друку	FDM
Густина	1270 кг/м ³
Стійкість до вигину, раз	10
Температура друку	230-240 °C
Температура платформи	40-70 °C
Обдування	без обдування (обдування при тонкостінних і дрібних виробках)
Швидкість друку	40-60 мм/с
Усадження при охолодженні	0,2 %

2.1.2 Створення цифрової моделі

Процес 3D друку починається з етапу розробки віртуального образу майбутнього об'єкта – моделі у програмі CAD. Сьогодні відомі і доступні безліч таких програм, серед них: «Unigraphics NX», «3D Studio Max», «AutoCAD», «SolidWorks» та ін. Отриманий файл зберігають у *STL*-форматі. Цей формат розпізнає більшість сучасних 3D принтерів. Великого значення на майбутні параметри деталі надають налаштування експорту файлів. У тому числі: ступінь деталізації моделі чи ступінь її розбиття на трикутники. При виборі параметра «Точно», розбиття виходить щільним, файл у результаті, займає багато пам'яті на комп'ютері і буде довго оброблятися спеціальним програмним забезпеченням, зате на виході користувач отримає об'єкт з високоякісною поверхнею. Якщо вибрати параметр «Грубо», то

розбиття вийде менш щільним, файл швидше оброблятиметься в спеціальній програмі і якість зовнішніх поверхонь буде значно нижчою, ніж при точному розбитті.

Необхідно відзначити, що 3D принтер передає до друку цифрову модель саме в тому вигляді, в якому вона відображається на екрані, яку якість ми бачимо, таку і отримаємо при вирощуванні. Тому, необхідно звертати увагу на вибір програми та налаштувань при експортуванні файлів побудованої моделі. Для подальшого розпізнавання моделі 3D принтером файл обробляється програмою-слайсером. Існує безліч програм, необхідних для цього. Програма-слайсер обробляє *STL*-файл і переводить його в керуючий *G*-код для 3D принтера. Якщо модель не піддати слайсингу, то 3D принтер не розпізнає її. У таблиці 2.2. показані назви деяких програм-слайсерів із зазначенням їх основних характеристик. Всі ці програми мають приблизно однакові опції і відрізняються лише числом розширених налаштувань. Є спрощені та професійні версії програм. Тому, є можливість вибору програми згідно можливостей комп'ютера та рівня його знання.

Таблиця 2.2 Характеристики програм-слайсерів для 3D принтерів [30]

Назва	Операційна система	Кваліфікація користувача
UP Studio	Windows, macOS, iOS	Початківці та професіонали
FlashPrint	Windows, macOS, Linux	Професіонали
IdeaMaker	Windows, macOS, Linux	Початківці та професіонали
Simplify3D	Windows, Linux, macOS	Початківці та професіонали
Cura	Windows, macOS, Linux	Початківці та професіонали
3DPrinterOS	Робота в браузері	Новачки
Slic3r (PrusaSlicer)	Windows, macOS, Linux	Професіонали
SliceCrafter	Робота в браузері	Новачки
KISSlicer	Windows, Mac, Linux, Raspberry Pie	Новачки та професіонали
MakerBot Print	Windows, Linux, macOS	Новачки та професіонали
Tinkering Suite	Windows, XP, macOS	Початківці середнього рівня
Z-Suite	Windows, macOS	Новачки та професіонали

2.1.3 Підготовка 3D принтера до роботи

На сьогоднішній день існує безліч моделей 3D принтерів. Це принтери, які використовують для створення моделей із різного типу матеріалів та з використанням різних технологій.

Процес друку, сам собою, досить простий. Полягає в одному принципі: процесі видавлювання чергового шару розплавленого пластику в робочу зону. Однак, вигляд готової моделі, її поверхневі та розмірні характеристики безпосередньо залежать не від типу принтера та його моделі, а від тих налаштувань чи режимів, які будуть задані. Тому цьому процесу необхідно приділяти особливу увагу. тому, в процесі роботи слід проконтролювати такі налаштування:

- температуру столу та екструдера. Ці значення залежать від типу використовуваного пластику. Кожен вид матеріалу несе певний температурний діапазон, в якому необхідно з ним працювати.

- швидкість друку. Вище було розглянуто вплив швидкості друку на якість моделей, тому регулювати її слід у залежності від виду філаменту.

- у разі складної геометричної форми виробу, необхідно забезпечити так звані підтримки.

2.2 Методика визначення параметрів якості поверхні 3D моделей

Поняття якості поверхні деталі складається з показників шорсткості та точності. Тому, деталі, отримані методами 3D друку повинні відповідати заданим значенням цих характеристик. Збільшення шорсткості поверхні суттєво знижує її експлуатаційні характеристики, що призводить до

виникнення мікротріщин у поверхневому шарі, що у свою чергу може призвести до руйнування. У той же час, шорсткість кожного виробу має бути економічно доцільною, тому що її зменшення може істотно підвищити вартість, оскільки виникне необхідність виконання додаткових операцій щодо покращення параметрів поверхні.

Наведені нижче терміни взяті зі стандарту ДСТУ ISO 3274-2002 (ISO 3274:1996). Цей стандарт визначає профілі і загальну структуру контактних (щупових) приладів для вимірювання шорсткості і хвилястості поверхні, дає право наявним стандартам бути допустимими до практичного оцінювання профілю. Він встановлює характеристики приладу, які впливають на оцінювання профілю і передбачає основи технічних вимог до контактних (щупових) приладів (профілометр і профілограф).

Щуповий прилад (stylus instrument) – засіб вимірювань для дослідження поверхонь за допомогою щупу та отримання відхилень у вигляді профілю поверхні, обчислення параметрів та можливого запису профілю.

Вимірювальний контур (measurement loop) – замкнутий ланцюг, який включає всі механічні компоненти, що зв'язують деталь і щуп, наприклад, основа приладу, тримач деталі, вимірювальну стійку, привід, датчик.

Жорсткість вимірювального контуру – обов'язкова умова для забезпечення вимірювання шорсткості поверхні. Будь-яка деформація всередині вимірювального контуру - похибка вимірювання шорсткості поверхні.

Привод (drive unit) – елемент приладу, який переміщує датчик вздовж вимірювальної поверхні та передає горизонтальне положення щупа у формі горизонтальної координати профілю. Приводи характеризуються найбільшою довжиною трасування.

Датчик (probe, pick-up) - елемент, який містить щуп з голкою, перетворювач (та опору для опорних датчиків).

Голка (stylus) – елемент, що складається з номінально правильного конуса з певним кутом та номінально сферичною вершиною певного радіусу. Голка є дуже важливим елементом для визначення профілю щуповими приладами.

Перетворювач (transducer) – пристрій, який перетворює вертикальні координати обмацаного профілю, визначені щодо базового профілю, сигнал, що використовується в приладі. Перетворювач не здійснює навмисної модифікації профілю.

Підсилювач (amplifier) – пристрій, який перетворює сигнал у приладі без навмисного перетворення профілю.

Аналого-цифровий перетворювач АЦП (A to D converter) – пристрій, який перетворює форму сигналу у цифрове значення.

Введення даних (data input) – інтерфейс приладу, який дозволяє ввести один або кілька типів профілю із зовнішнього комп'ютера.

Виведення даних (data output) - інтерфейс приладу, який дозволяє вивести один або кілька типів профілю у зовнішній комп'ютер.

Для оцінки структури поверхні вирощеної деталі можна використовувати різні прилади для вимірювання шорсткості. Їх можна поділити на дві групи:

1) безконтактні, що оцінюють мікрогеометрію поверхні без контакту з нею. Це насамперед оптичні прилади (мікроскопи);

2) контактні, що оцінюють мікрогеометрію при зіткненні чутливого елемента приладу з досліджуваною поверхнею (профілометри, профілометри-профілографи).

До першої групи відносять мікроскопи. Використовуючи мікроскопи при дослідженні поверхні деталі можна оцінити структуру її поверхні і такі параметри поверхневого шару, як, наприклад, профіль, середній крок нерівностей. На сьогоднішній день, такий вид приборів представлений широким спектром моделей та типів. Це, перш за все, цифрові мікроскопи, які забезпечують високу точність вимірювань.

На рис. 2.1 показаний лазерний аналізатор шорсткості (конфокальний мікроскоп) – SRT, що дозволяє провести аналіз відповідно до загальноприйнятих стандартів. Ця модель оснащена високоякісною оптикою та диском мікролінз, завдяки чому надійно вимірює та аналізує величезну кількість одержуваних результатів шорсткості.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд лазерного аналізатора шорсткості – SRT [34]:

Отримані дані шорсткості поверхні використовуються для контролю якості та проведення досліджень. Принцип роботи конфокальних лазерних мікроскопів міститься у наступному [34]:

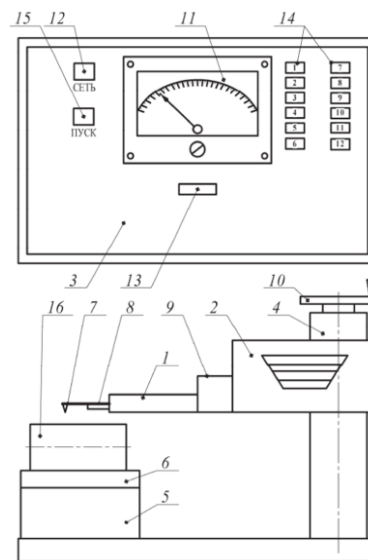
- мікроскоп спрямовує вузький пучок лазерного випромінювання на досліджувану поверхню та фокусується у певній точці по вісях X та Y;
- відбиваючись від поверхні, світло потрапляє на детектор (фотоприймач або відеокамеру);
- зображення освітленої області об'єкта формується з дуже малою глибиною різкості, тому відображається лише досліджувана площа.

Так, послідовне точкове сканування дозволяє отримати серію оптичних зрізків та шляхом їх накладання один на одного отримати об'ємне зображення об'єкта. Параметри вимірювання, такі як яскравість та діапазон вимірювання, налаштовуються автоматично.

Профілометри – це вже контактна група приборів, які дають можливість отримати числове значення шорсткості поверхні без проведення розрахунків. Тобто, вони є, так званими, вимірювачами параметрів шорсткості. Це, перш за все, показник Ra – середнє арифметичне відхилення профілю та Rz – висота нерівностей профілю.

Методика аналізу якості поверхонь деталей, отриманих на 3D принтері, полягає у порівнянні вимірних значень шорсткості поверхонь. Голка приладу (щуп), яка рухається по нормалі до досліджуваної поверхні, у місцях мікронерівностей (впадин і виступів) коливається. Ці коливання передаються датчик, який пов'язаний з перетворювачем. Далі, дані передаються на електронне табло приладу і дозволяють точно характеризувати нерівності поверхні виробу.

Структурна схема контактного щупового профілометра моделі 253 показана на рис. 2.2 [35].



1 – корпус, 2 – привод, 3 – електронний блок, 4 – стойка, 5 – призма, 6 – опора, 7 – датчик, 8 – твердосплавна опора, 9 – гвинт, 10 – маховик 11 – прибор, що показує, 12 – кнопка вмикання живлення, 13 – сигнальне вічко, 14 – перемикач діапазонів вимірювань, 15 – кнопка пуску

Рисунок 2.2 – Профілометр моделі 253 [35]

Також відомі моделі мобільних приладів для виміру шорсткості. На рис. 2.3 показаний прилад Perthometer M1, призначений для визначення параметрів шорсткості поверхні контактним – щуповим методом. Прилад застосовується для вимірювання шорсткості зовнішніх і внутрішніх поверхонь обертання, а також поверхонь складної геометричної форми.



Рисунок 2.3 – Прибор Perthometer M1 [36]

Такий вид приладів побудований на застосуванні мікропроцесорної техніки. Результати вимірювань виводяться на рідкокристалічний дисплей і можуть бути збережені на комп'ютері для подальшої роботи. Прилад має різні типи датчиків, що розширює область його використання, а саме виникає можливість вимірювання параметрів шорсткості на площинах, орієнтованих під різними кутами в просторі. Протокол вимірювань містить усі чисельні значення параметрів.

Сучасні профілометри-профілографи, завдяки своїй конструкції, окрім значення шорсткості, дозволяють отримати і профілограму обробленої поверхні. Тобто, відбувається одночасне вимірювання характеристик шорсткості та записування самого профілю, що дає можливість дослідити його більш детально, а саме побачити реальний вигляд відхилення профілю

поверхні від середній лінії. Вимірювання записуються, як у горизонтальному, так і вертикальному масштабах. На рис. 2.5 показаний прибор Perthometer S2.



Рисунок 2.5 – Прибор Perthometer S2 [37]

Протокол вимірювань цього приладу містить не тільки чисельні значення параметрів, що вимірюються, але і умови їх отримання, а також профілограму поверхні, яка значно розширює уявлення про вимірювану поверхню і дозволяє визначити параметри профілю деталі.

Міждержавним стандартом ГОСТ 2789-73 визначено 6-ть параметрів оцінки шорсткості поверхні, які можна отримати з профілограми.

На рис. 2.6 показано фрагмент профілограми, за яким можна визначити ці параметри.

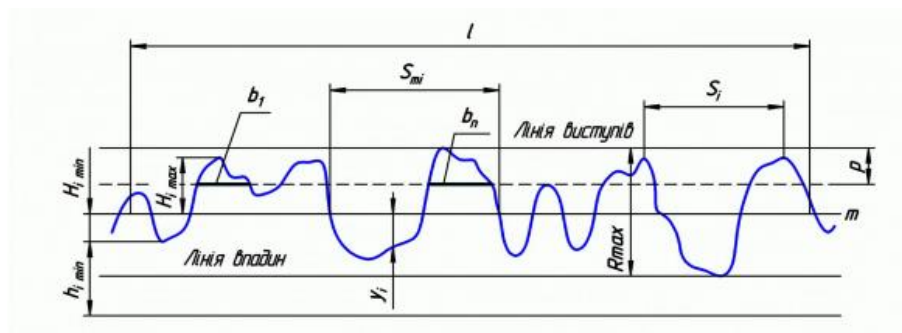


Рисунок 2.6 – Фрагмент профілограми

Це висотні параметри:

Ra – середнє арифметичне відхилення профілю;

Rz – висота нерівностей профілю по 10 точках (середнє значення п'яти найбільших висот та впадин);

R_{max} – найбільша висота профілю.

Та крокові:

S – середній крок виступів профілю;

S_m – середній крок нерівностей профілю по середній лінії.

Дослідження нерівностей, найчастіше, відбувається у кілька етапів. Спочатку профіль «обшупується» кілька разів, і лише на основі серії вимірювань визначається остаточне, усереднене значення параметра шорсткості. Це кількісна характеристика нерівності щодо довжини ділянки. Критерієм порівняння виступає параметр Ra , оскільки він є найкращим при завданні шорсткості.

Враховуючи принцип 3D друку, шорсткість отриманих деталей може бути вимірювана в різних напрямках, ці значення відрізняються один від одного і по-різному впливають на якість.

2.3 Методика контролю розмірної точності деталей, отриманих 3D друком

Основною вихідною інформацією, про будь-який вид проектування, є креслення деталі. Розміри деталі встановлені конструктором і необхідно, щоб розмір, який ми отримали після виготовлення або обробки, лежав у межах допуску. Тому обов'язковим є контроль цього розміру, для чого існує ціла низка контрольних інструментів та пристроїв. Рівень складності цих пристроїв залежить від типу виробництва і є спеціальні калібри, пробки, а

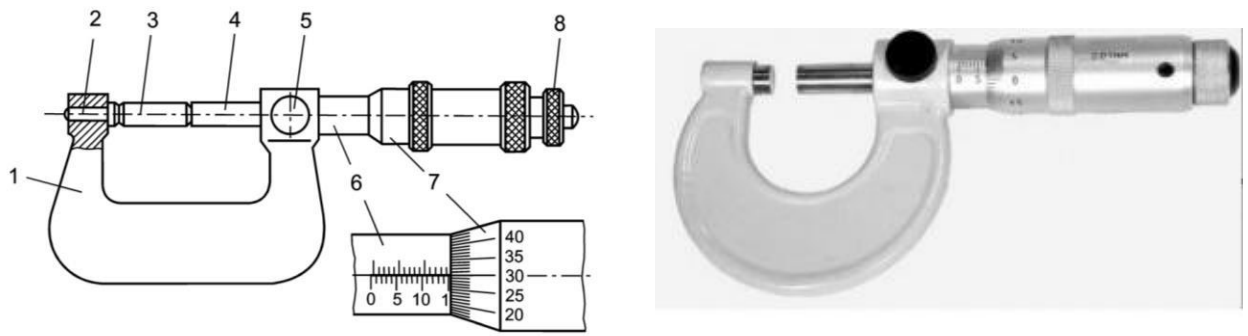
також стандартні контрольні інструменти: мікрометри, штангенциркулі, скоби, різного типу лінійки.

Метод калібрів полягає у виготовленні двох додаткових деталей, розміри однієї виконані по верхньому відхиленню, другий – по нижньому. За допомогою цих деталей здійснюється контроль. Для отворів використовують пробки – відповідно прохідні та непрохідні, виготовлені за таким же принципом. Ці методи контролю дозволяють швидко проконтролювати деталь, проте вимагають додаткового виготовлення, що збільшує собівартість виробництва.

Використання стандартних контрольних інструментів є більш рентабельним, проте залежить від рівня точності вимірювань. Так штангенциркулі годинного та електронного типу доцільно використовувати для точності вимірювання від 0,05 до 0,1 мм, мікрометри дають можливість досягти точності вимірювання від 2 до 50 мкм. Для швидких вимірювань активно використовуються штангенциркулі. Для дослідження впливу налаштувань друку на точність отриманих розмірів найчастіше використовують мікрометри, які виготовляються згідно з ГОСТ 6507-78. Це мікрометри типу МК, які підходять для вимірювання невеликих деталей.

Сам процес вимірювання відбувається наступним чином: за допомогою основного барабану мікрогвинта підводять губки мікрометра до деталі, після чого за допомогою приводу тріскачки доводять до доторку з поверхнею вимірюваної деталі. Отриманий розмір зчитується із шкали мікрометра.

На рис. 2.7 показано типову конструкцію гладкого мікрометра. До його основних деталей і вузлів відносяться: скоба – 1, п'ята – 2, мікрогвинт – 4, стопор гвинта – 5, стебло – 6, барабан – 7 і тріскачка – 8 мікрометричної головки, що перетворює обертальний рух барабана в поступальний рух мікрогвинта.



1 – скоба, 2 – п'ята, 3 – перехідник, 4 – мікрогвинт, 5 – стопор гвинта,
6 – стебло, 7 – барабан, 8 – тріскачка мікрометричної головки

Рисунок 2.7 – Мікромметр гладкий МК

Відхилення лінійних розмірів, отриманих під час 3D друку, щодо номінальних значень, вказаних на кресленні, визначає рівень розмірної точності 3D друку.

РОЗДІЛ 3. ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Деталі, отримані методами адитивних технологій - це деталі, які мають певну функцію у складі механізму. Їх поверхні стикаються з поверхнями інших деталей, встановлюється в різні сполучення. Тому розміри деталей повинні відповідати заданій розмірній точності, а шорсткість поверхонь повинні відповідати експлуатаційним вимогам.

Ці параметри: точність та шорсткість і є основними показниками якості.

Технологічний процес отримання деталей традиційними способами передбачає етапи отримання заготовки, процес різання, додаткової фінішної поверхневої обробки. Якість виконання цих операцій залежить від багатьох чинників, від точності самої заготовки до режимів різання на всіх операціях, які є основними вихідними параметрами для досягнення необхідного результату.

На відміну від цього, процес отримання деталей за допомогою 3D-друку дозволяє отримати деталі із заданою якістю вже на етапі отримання заготовки. Вихідними параметрами в цьому випадку є режими 3D-друку.

Це - тип матеріалу, налаштування програми-слайсера, тип і вид підтримки, кількість суцільних поверхневих шарів, режими друку деталі: температура, швидкість друку тощо.

Тому, для визначення оптимальних режимів необхідне проведення експериментів з подальшим аналізом.

Для визначення ступеню якості отриманої 3D-друком деталі аналізують:

- показники міцності: твердість, міцність, зусилля на розрив, пружність;
- шорсткість робочих поверхонь;
- відхилення форми: співплощинність, співвісність;

- відхилення розмірних характеристик поверхонь деталі: отворів, виступів, відповідність отриманих кутів,
- естетичність зовнішнього вигляду.

Остаточно зазвичай обирають декілька тих, які необхідні деталі для виконання поставлених функцій. Частіш за все, найбільш важливими, є характеристики точності отриманих розмірів та шорсткості поверхонь деталі.

3.1 Підготовка до проведення експериментальних досліджень

Для проведення досліджень обрано деталь, ескіз якої та 3D-модель, показано на рис. 3.1. По даним роботи [38] якість поверхні зразків, одержуваних методом пошарового вирощування, безпосередньо залежить від програмного забезпечення, від його функціональних можливостей. Це, зрештою, впливає на шорсткість та геометричну точність розмірів вирощуваних моделей. Встановлено, що найкращі результати показують поверхні зразків, які спроектованого у програмному продукті Siemens NX.

Тому, проектування 3D-моделі виконано в пакеті програмного забезпечення Siemens NX та збережено в форматі STL для подальшої обробки слайсером.

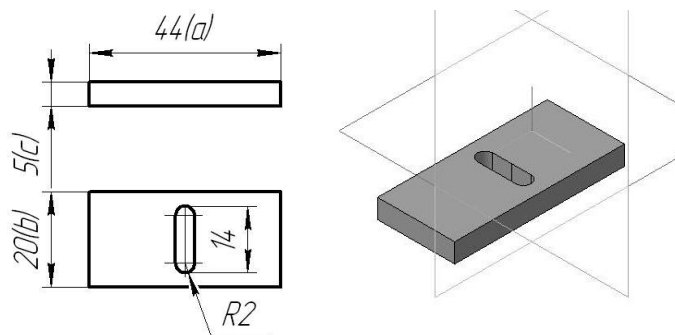


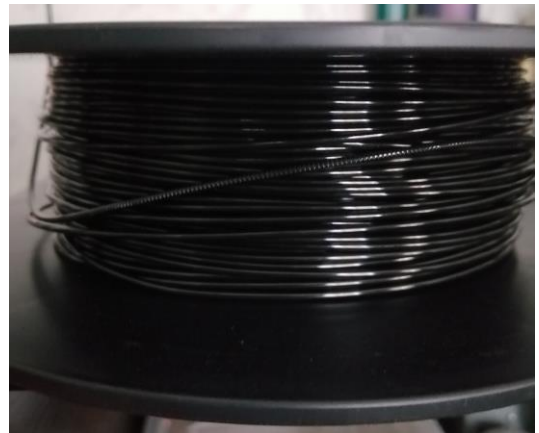
Рисунок 3.1 – Розміри та 3D-модель зразків, що використовуються в експерименті

Формат *Standard Triangulation Language* (STL) - розглядає будь-який об'єкт як набір поверхонь та описує кожен поверхню об'єкта як набір трикутників. Квадрат може бути описаний як два трикутники; куб - як 12 трикутників. Викривлені поверхні потребують більшої кількості трикутників. Чим вище відхилення, тим більше трикутників необхідне. Кожен трикутник означає одиничний нормальний вектор, спрямований від поверхні моделі, потім йде його X-Y-Z координати. Координати всіх трикутників повинні бути позитивними та повинні бути в обсязі моделі. Далі, модель обробляють у слайсері. Слайсери – це спеціальні програмні пакети, які дозволяють імпортувати збережену 3D-модель і підготувати її до 3D-друку. Робота програми-слайсера полягає в тому, щоб перетворити модель в серію шарів для 3D-принтера. Слайсер згенерує необхідний G-код, необхідний для здійснення процесу друку. Таким чином, програма-слайсер є посередником між процесом створення моделі та її друком і є важливим елементом.

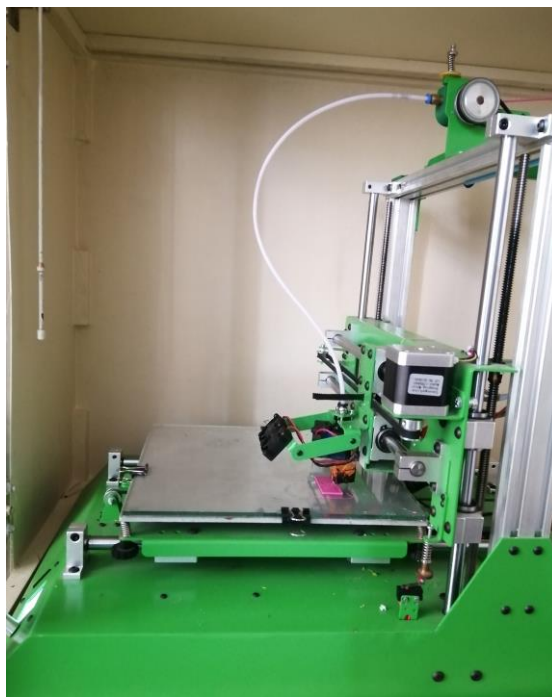
В даній роботі використовували програму-слайсер *PrusaSlicer*, яка має певні переваги. Інтерфейс *PrusaSlicer* є простим, але ефективним та заснований на інтуїтивному розумінні та налаштуванні параметрів та профілів. Програма автоматично розміщує 3D-моделі на робочому столі в оптимальному положенні, що дуже корисно, коли друкується кілька деталей одночасно, має просте налаштування шару та можливість встановлення змінної висоти шару. Моделі нарізаються та підготовлюються для FDM 3D-принтерів, є функція додавання користувальницьких опор, а також можна отримати докладний аналіз часу 3D-друку. В програмі обираються режими друку. Такі, як температура сопла, стола, швидкість друку тощо. Ці параметри обираються згідно матеріалу і мають велике значення, бо це суттєво впливає на якість виробів.

Зразки друкували з матеріалу Co-PET – Ø1,75 мм (рис. 3.2, а).

Далі, необхідно підготувати принтер до друку. Для виготовлення зразків використовували FDM 3D-принтер моделі PROFI+ (рис. 3.2, б).



а



б

Рисунок 3.2 – Матеріал та обладнання для 3-D друку

Було надруковано 32 зразка. При друкуванні кожного з них було задано режими, які відрізнялися один від одного і були рандомні, табл. 3.1. Використовували наступні параметри налагодження:

- висота шару: 0,15 мм, 0,3 мм;
- швидкість друку: 40 мм/с, 80 мм/с;
- густина заповнення : 25 %, 100 %;
- температура платформи: 70 °C, 80 °C;

- ширина укладення нитки: 0,49 мм, 0,52 мм;
- схема заповнення: концентрична, прямолінійна;
- кількість стінок: 2, 4;
- кількість суцільних верхніх та нижніх: 2, 4;
- температура екструзії: 245 °C, 255 °C;
- екструзійний множник: 0,9, 1,1.

Температура зберігання зразків становила 15...25 °C. Зовнішнє вимірювання лінійних розмірів зразків *a*, *b* та *c* проводили за допомогою гладкого мікрометра МК з діапазоном вимірювання 0-25, що має ціну поділення 0,01 мм і допустиму похибку $\pm 0,004$ мм.

Прийнято таку методику визначення шорсткості: на поверхні кожного зразка вимірювали шорсткість за допомогою профілометра Калібр 171621 при швидкості трасування 6 мм/хв. і базовій довжині, згідно рекомендаціям стандарту – 2,5 мм

Отримані значення розмірних параметрів зразків та шорсткості поверхні по кожному режиму отримання, показано в табл. 3.1

Таблиця 3.1 Вихідні параметри друку та результати вимірювань

№ зр	Висота шару, мм 1	Швидкість друку, мм/с 2	Схема заповнення 3	Густина заповнення, % 4	Екструзійний множник 5	Температура екструзії, °C 6	Температура платформи, °C 7	Ширин а уклад. нитки, мм 8	Кількість стінок 9	Кількість суц. нижніх і верхніх 10	Розмірні параметри, мм			Шорсткість поверхні, Ra, мкм
											a	b	c	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0,15	40	прямолинійна	25	0,9	255	80	0,52	4	4	43,8	19,8	4,9	8,6
2	0,3	40	прямолинійна	25	0,9	245	70	0,49	2	4	43,9	20	5	9,1
3	0,15	80	прямолинійна	25	0,9	245	70	0,49	4	2	43,4	19,8	4,8	9,8
4	0,3	80	прямолинійна	25	0,9	255	80	0,52	2	2	43,7	20	5	9,79
5	0,15	40	концентрич.	25	0,9	245	70	0,52	2	2	43,8	19,6	4,8	9,9
6	0,3	40	концентрич.	25	0,9	255	80	0,49	4	2	43,8	20	5	8,2
7	0,15	80	концентрич.	25	0,9	255	80	0,49	2	4	43,8	19,8	4,8	7,4
8	0,3	80	концентрич.	25	0,9	245	70	0,52	4	4	43,9	19,8	5	7,5
9	0,15	40	прямолинійна	100	0,9	245	80	0,49	2	2	43,7	20	4,9	6,5
10	0,3	40	прямолинійна	100	0,9	255	70	0,52	4	2	44	20	5	9,6
11	0,15	80	прямолинійна	100	0,9	255	70	0,52	2	4	43,5	20	5	6,7
12	0,3	80	прямолинійна	100	0,9	245	80	0,49	4	4	44	20	5	6,73
13	0,15	40	концентрич.	100	0,9	255	70	0,49	4	4	44	20	4,8	9,5
14	0,3	40	концентрич..	100	0,9	245	80	0,52	2	4	44	20	5	7,67
15	0,15	80	концентрич..	100	0,9	245	80	0,52	4	2	44,7	19,5	5	9,04
16	0,3	80	концентрич.	100	0,9	255	70	0,49	2	2	44,9	19,9	5	6,1
17	0,15	40	прямолинійна	25	1,1	255	70	0,49	2	2	44	20	4,8	8,8
18	0,3	40	прямолинійна	25	1,1	245	80	0,52	4	2	44	20	5	4,8
19	0,15	80	прямолинійна	25	1,1	245	80	0,52	2	4	44	20	5	8,57
20	0,3	80	прямолинійна	25	1,1	255	70	0,49	4	4	44	21,5	5,1	9,8
21	0,15	40	концентрич.	25	1,1	245	80	0,49	4	4	44	20	5	6,8
22	0,3	40	концентрич.	25	1,1	255	70	0,52	2	4	44,1	20	5	9

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
23	0,15	80	концентрич.	25	1,1	255	70	0,52	4	2	44	20	4,9	9,57
24	0,3	80	концентрич.	25	1,1	245	80	0,49	2	2	44	19,8	5	7,65
25	0,15	40	прямолінійна	100	1,1	245	70	0,52	4	4	44	20,5	5	9,9
26	0,3	40	прямолінійна	100	1,1	255	80	0,49	2	4	44,3	20	5,5	8,8
27	0,15	80	прямолінійна	100	1,1	255	80	0,49	4	2	44,3	20,5	5	9,3
28	0,3	80	прямолінійна	100	1,1	245	70	0,52	2	2	44,4	20,2	5,4	9,45
29	0,15	40	концентрич.	100	1,1	255	80	0,52	2	2	44	20	5,5	9,04
30	0,3	40	концентрич.	100	1,1	245	70	0,49	4	2	44,5	20,5	5	7,37
31	0,15	80	концентрич.	100	1,1	245	70	0,49	2	4	44	20	5	4,83
32	0,3	80	концентрич.	100	1,1	255	80	0,52	4	4	44,5	20,5	5,1	9,48

3.2 Обробка результатів експериментальних досліджень

Для обробки одержаних результатів в роботі використовували метод дисперсійного аналізу мета якого – дослідження наявності чи відсутності суттєвого впливу будь-якого якісного чи кількісного чинника на зміни досліджуваної результативної ознаки [40].

Дисперсійний аналіз може виконуватися вручну та з використанням комп'ютерних програм, що прискорює та автоматизує процес розрахунків та дозволяє швидко отримати необхідні залежності. У роботі аналіз даних виконували з використанням програми StatSoft.

Згідно з планом проведення експериментів у програму завантажено перелік критеріїв для порівняння, отримано діаграми Pareto, а також залежності впливу різних режимів 3D-друку та їх поєднання на шорсткість поверхні зразків та на їх розмірні параметри, а саме точність.

Діаграма Pareto є гістограмою, яка представлена стовпцями, черговість яких йде по низхідній лінії, за частотою, найважливіші і значущі показані зверху вниз [42].

3.2.1 Вплив параметрів 3D-друку на шорсткість поверхні зразків

На рис. 3.3 показано діаграму Pareto для параметра шорсткості поверхні Ra . Так, найбільш значущим для шорсткості поверхні є поєднання факторів швидкості друку та температури платформи. Найменше значення на шорсткість надає температура платформи.

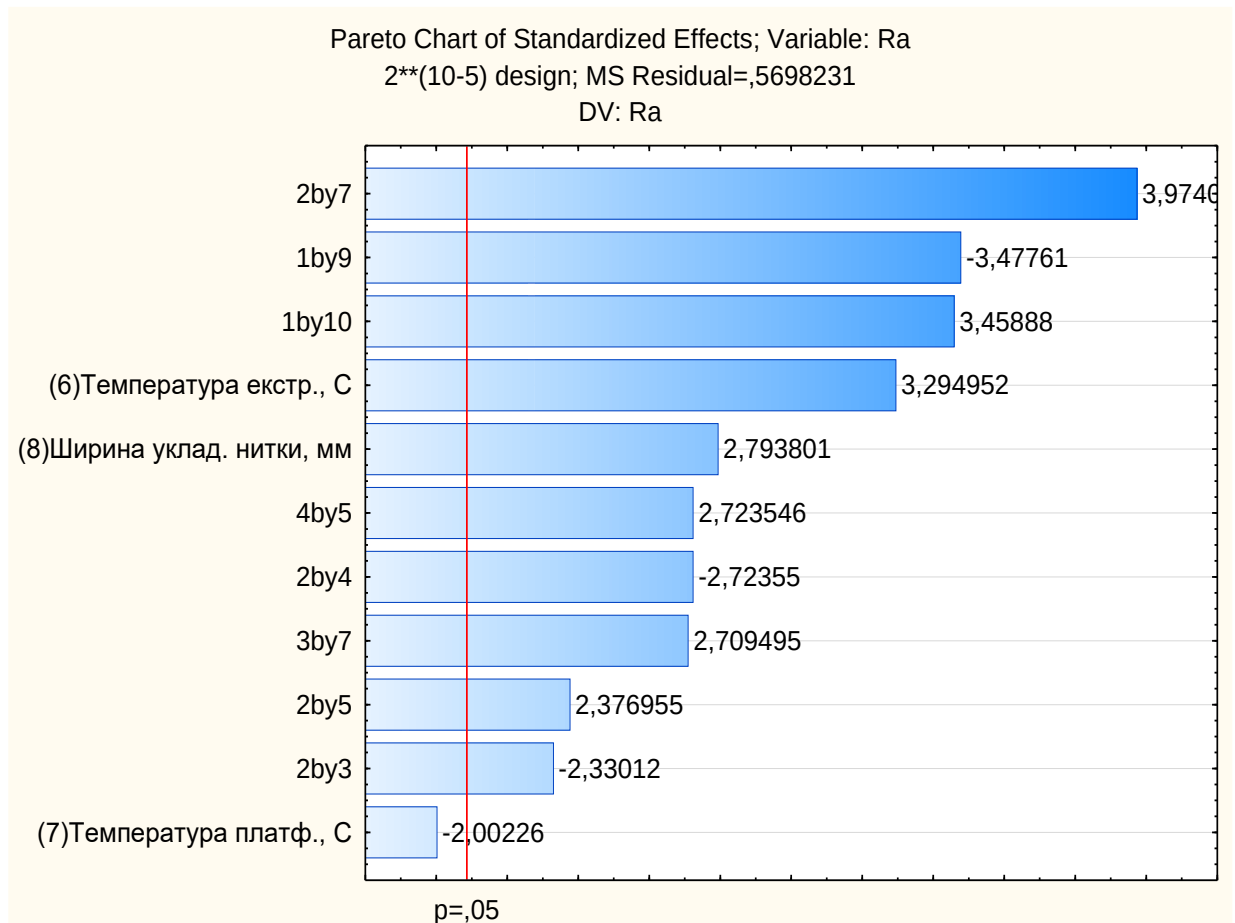


Рисунок 3.3 – Діаграма Pareto для параметра шорсткості Ra

Далі були побудовані залежності шорсткості поверхні зразків від одиночних параметрів та їх поєднань.

На рис. 3.4, 3.5 показано вплив температури екструзії та ширини укладання нитки на шорсткість поверхні. Збільшення значень температури та ширини укладання нитки призводить до погіршення параметра шорсткості.

Оптимальними для даного матеріалу є значення температури екструзії, яка дорівнює 245 °C та ширини укладення нитки – 0,49 мм. Ці значення дозволяють отримати найнижчий показник шорсткості поверхні зразків.

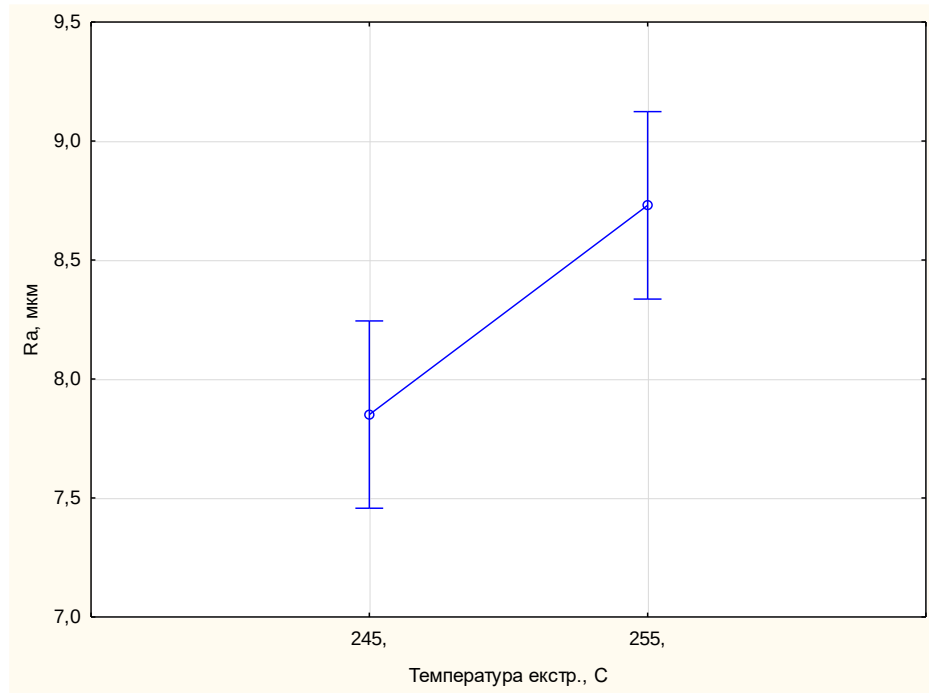


Рисунок 3.4 – Залежність шорсткості поверхні від температури екструзії

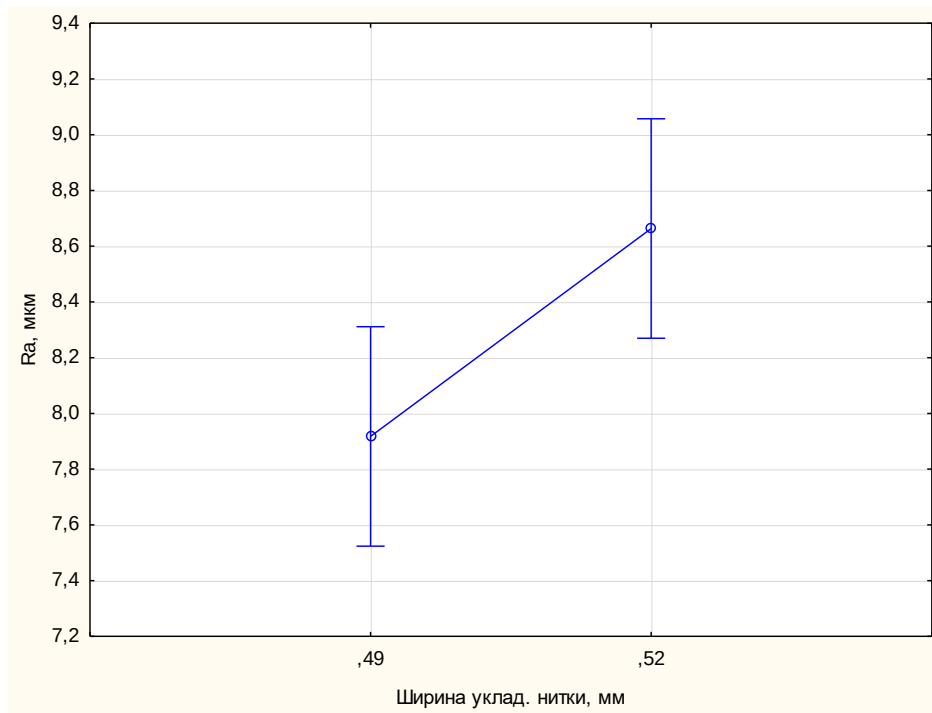


Рисунок 3.5 – Залежність шорсткості поверхні від ширини укладання нитки

На рис. 3.6 та 3.7 показані залежності шорсткості поверхні від поєднання параметра швидкості друку та температури платформи, густини заповнення та екструзійного множника.

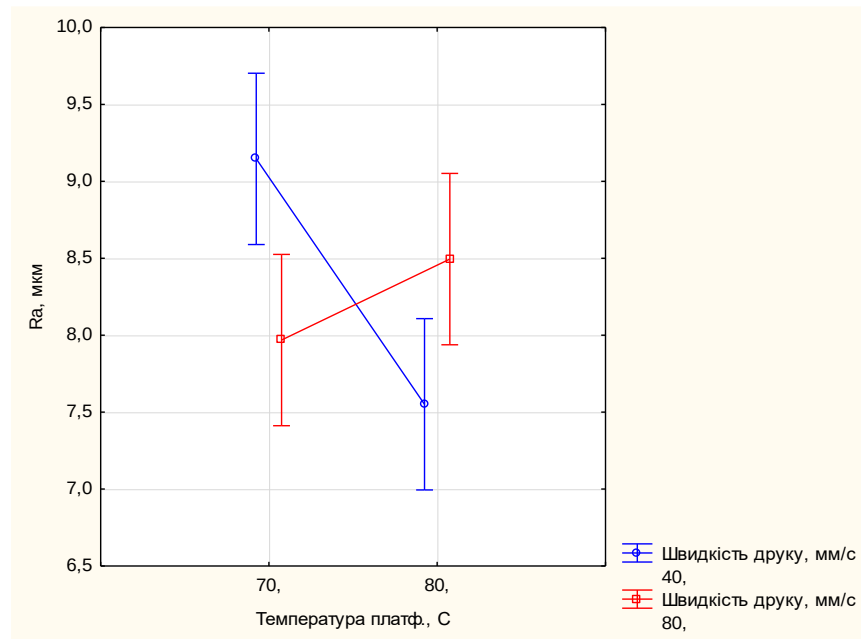


Рисунок 3.6 – Залежність шорсткості поверхні від швидкості друку та температури платформи

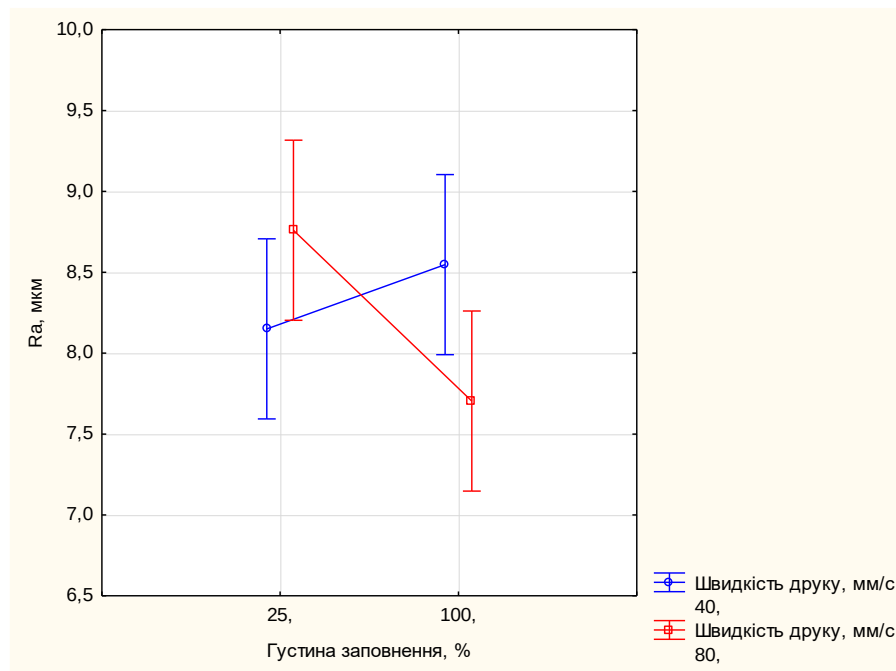


Рисунок 3.7 – Залежність шорсткості поверхні від швидкості друку та густини заповнення

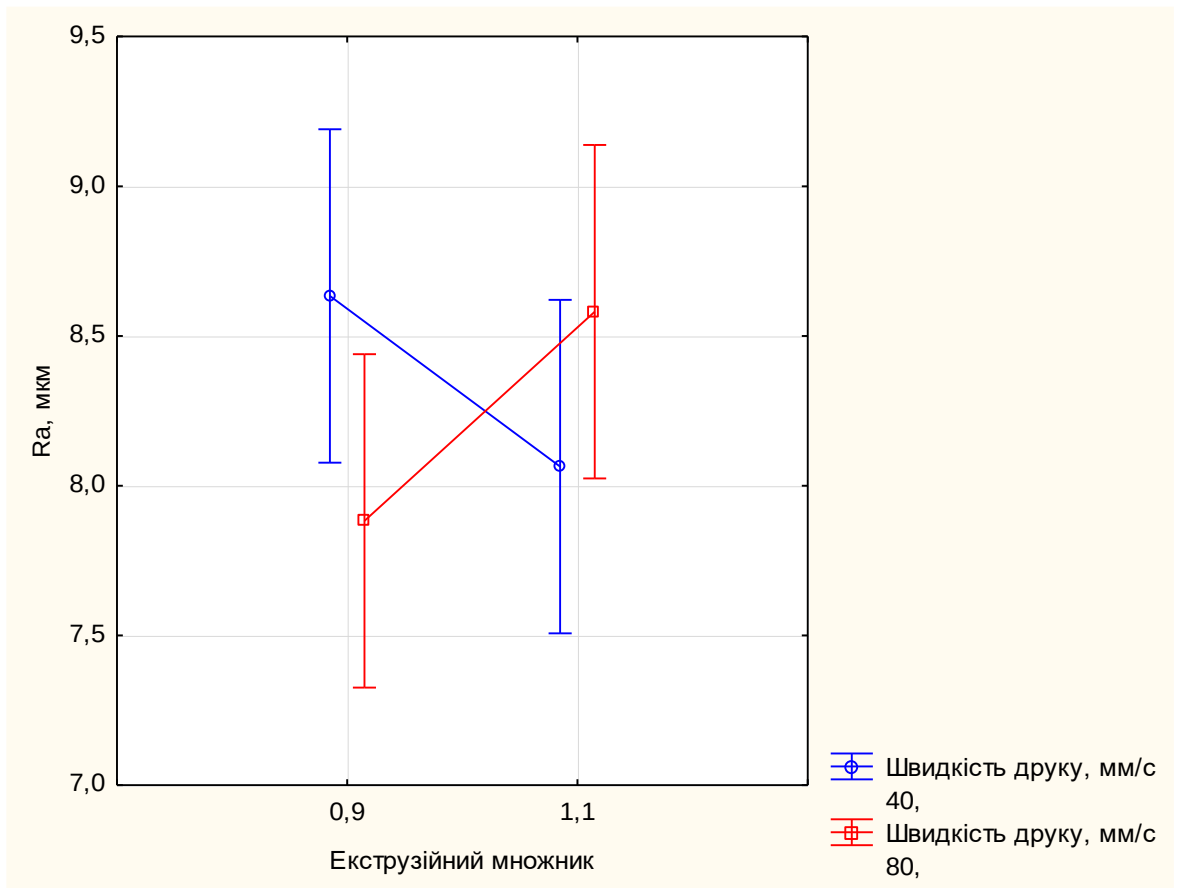


Рисунок 3.8 – Залежність шорсткості поверхні від екструзійного множника

З графіків видно, що зі збільшенням температури платформи для різних значень швидкості друку зміна шорсткості відбувається по-різному. Так, для значення швидкості 40 мм/с оптимальною є температура близько 80 °С, густина заповнення – 100%, екструзійний множник – 1,0. Однак з підвищення швидкості до 80 мм/с ця тенденція змінюється на протилежну. Тому зі збільшенням швидкості для зниження рівня шорсткості потрібно зниження температури платформи до 70 °С, густини заповнення менше 25%. екструзійного множника – 0,8.

Далі, показана залежність шорсткості поверхні від поєднання параметра кількості стінок і висоти шару (рис. 3.5).

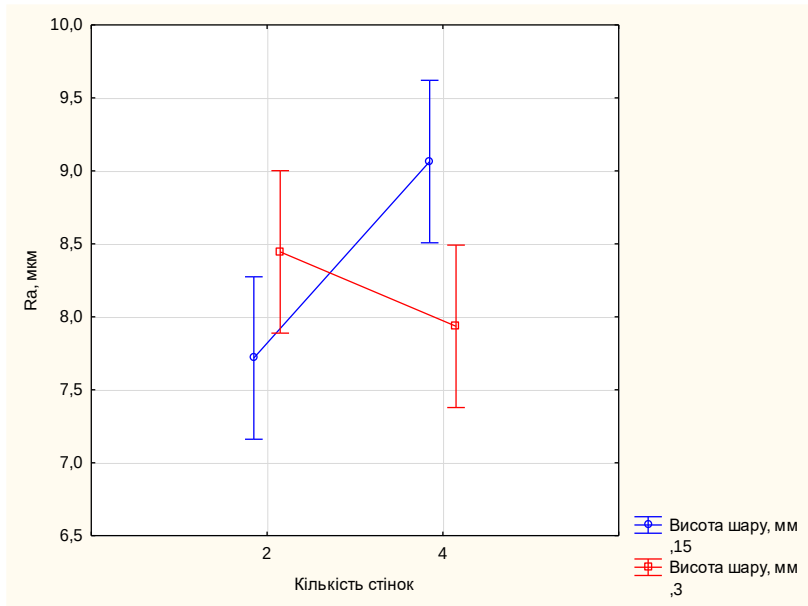


Рисунок 3.5 – Залежність шорсткості поверхні від кількості стінок и висоти шару

За графіком видно, що при висоті шару 3 мм найбільш оптимальною величиною кількості стінок є значення більше 4. Тоді як для висоти 15 мм – менше 2. Для таких же значень висоти шару найкращі значення кількості суцільних верхніх і нижніх шарів знаходиться в тих же межах (рис. 3.6).

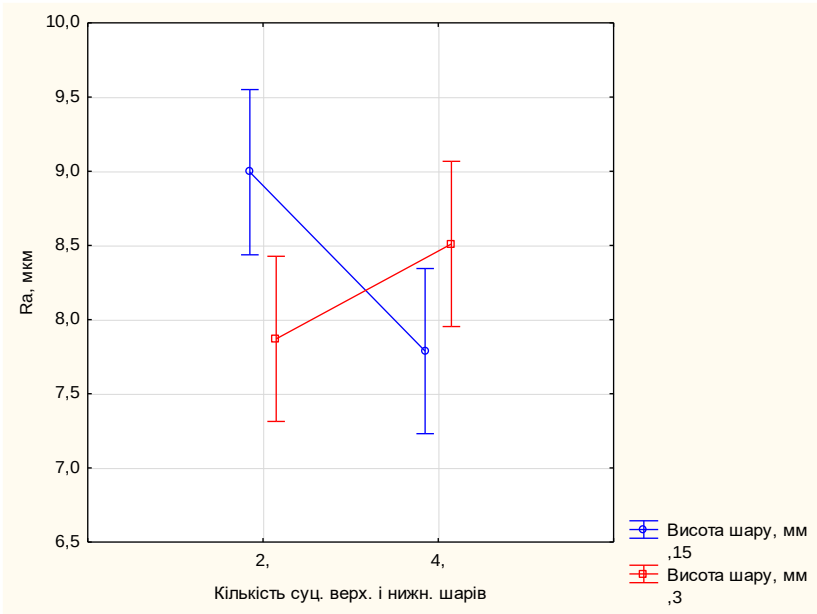


Рисунок 3.6 – Залежність шорсткості поверхні від кількості суцільних верхніх і нижніх шарів

Аналізуючи рис. 3.7 можна зазначити, що для досягнення найменших значень шорсткості поверхні зразків, густині заповнення, яка дорівнює 25%, відповідає значення екструзійного множника – менше 1,1. Але зі збільшенням густини заповнення до значення 100 % оптимальне значення становить 1.0.

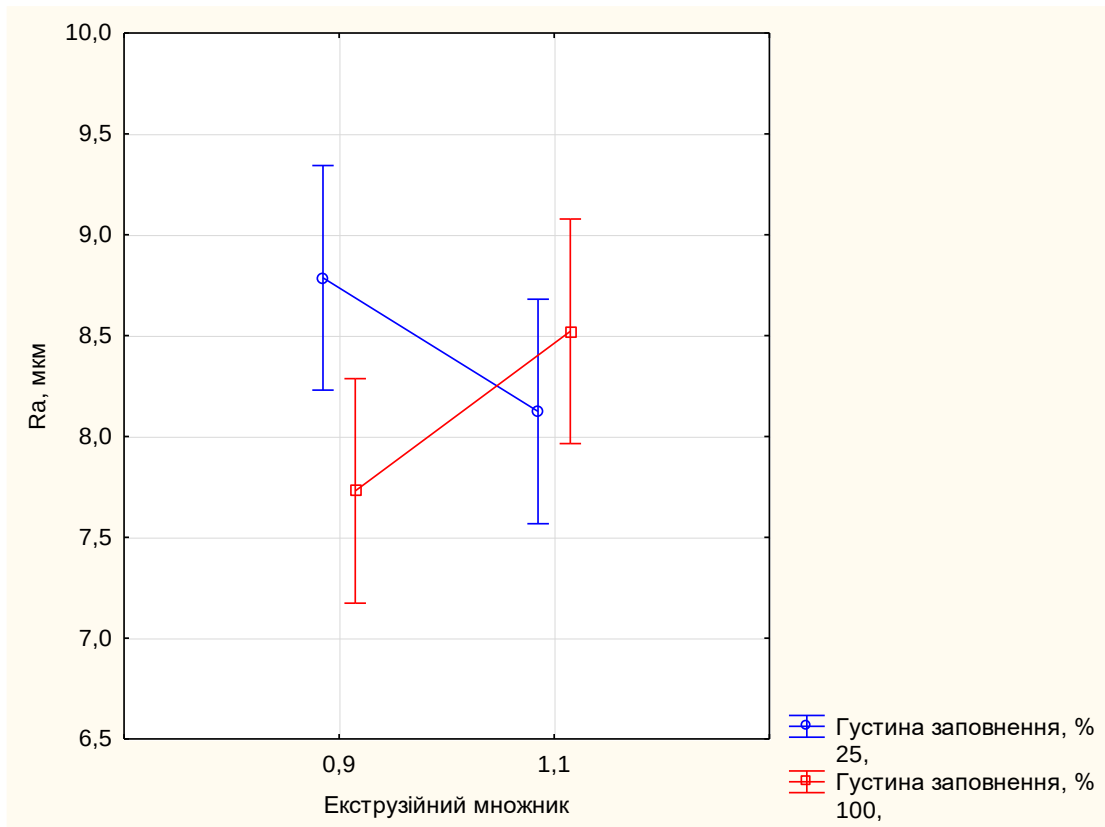


Рисунок 3.7 – Залежність шорсткості поверхні від екструзійного множника та густини заповнення

Також, не мале значення має схема заповнення зразка. У наших експериментах застосовувалося дві схеми: прямолінійна і концентрична.

При швидкості друку 40 мм/с результати дає прямолінійна схема. Зі збільшенням швидкості – концентрична (рис. 3.8).

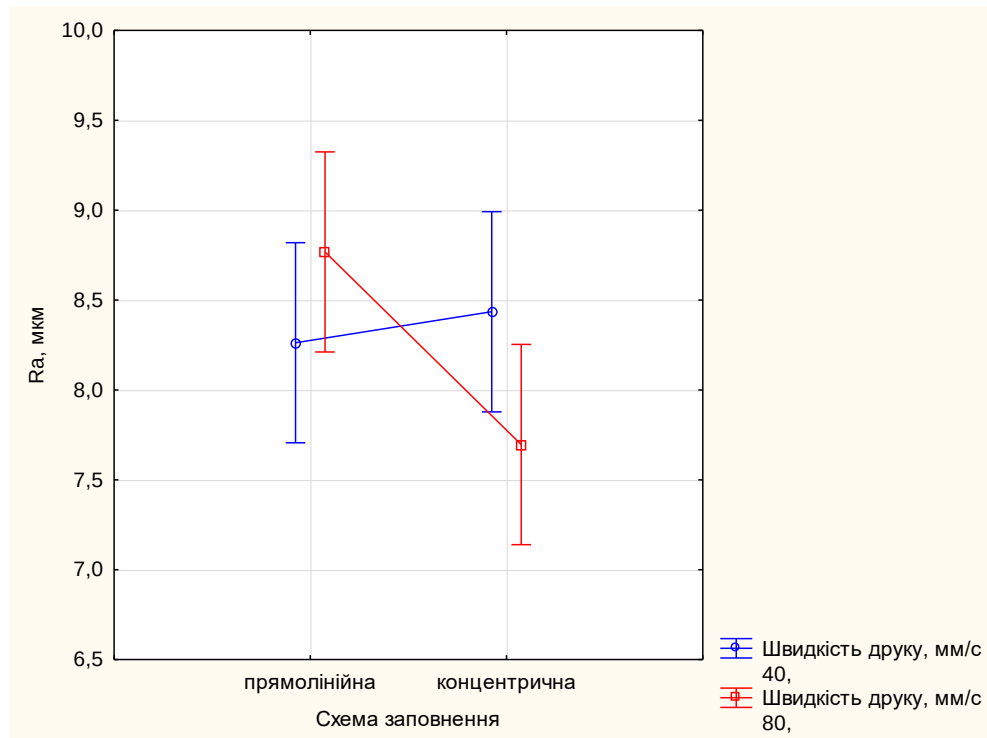


Рисунок 3.8 – Залежність шорсткості поверхні від схеми заповнення та швидкості друку

3.2.2 Вплив параметрів 3D-друку на розмірну точність зразків

Обов'язковою умовою досягнення якісних результатів 3D-друку – це точність розмірів, які ми отримали.

На відміну від механічної обробки, де поверхні отриманої деталі покращують поступово, виконуючи технологічні операції та переходи до відповідності їх допускам, встановленим у конструкторській документації, у 3D-друку передбачено лише один технологічний етап. Допуски, що виходять за рамки стандартної механічної обробки, можуть бути досягнуті із застосуванням додаткових фінішних методів обробки: ручної чи машинної. Ці способи застосовні як для моделей, надрукованих на 3D-принтері, так і для моделей, виготовлених на металорізальних верстатах.

Для оцінки розмірної точності, а саме відповідності розмірів зразків заданим за кресленням, оцінювали вплив параметрів друку та їх поєднання на кожен розмір. Відповідно: довжину – a , ширину – b та висоту – c . Враховуючи, що точність виготовлених даним методом зразків відповідає 12 квалітету точності, призначимо допуски кожного розміру. Це поле допуску, далі, буде відзначено на отриманих залежностях для того, щоб визначити, які параметри 3D-друку та їх поєднання дозволяють отримати зразки із заданою точністю. Відповідно до 12 квалітету точності встановимо допуски на розміри: $a = 44 \pm 0,125$ мм, $b = 20 \pm 0,105$ мм, $c = 5 \pm 0,06$ мм.

Далі показані діаграми Pareto для розмірів зразків: a , b і c (рис. 3.9 – 3.11).

Оцінюючи отримані діаграми можна відзначити, що на точність розмірів b і c найбільший вплив має екструзійний множник. Тоді як на розмір a – густина заповнення.

На рис. 3.12 показано залежність величини розміру зразків – a від густини заповнення. За графіком видно, що лише частина зразків, надрукованих як із густиною 25% так і 100% потрапляють у поле допуску заданого розміру. Зменшення чи збільшення значень цієї величини призведе до невідповідності зразків заданій точності. Наступна залежність (рис. 3.13) показує таку ж саму тенденцію.

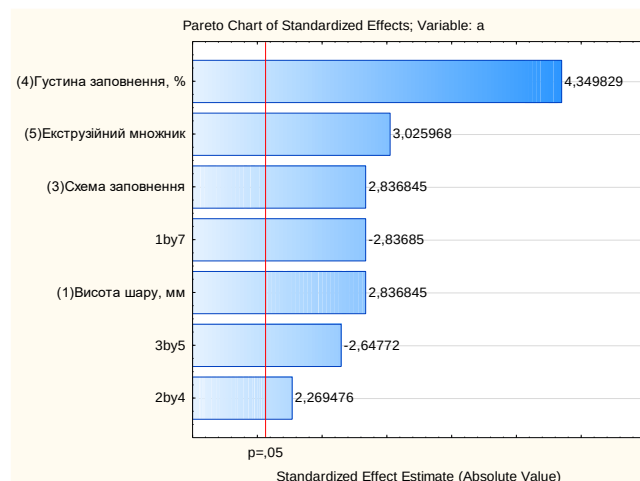


Рисунок 3.9 – Діаграма Pareto для розміру зразка a

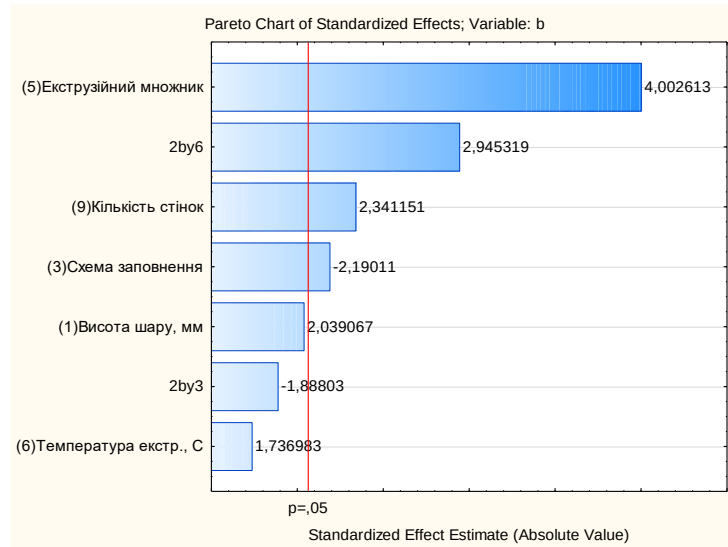


Рисунок 3.10 – Діаграма Pareto для розміру зразка *b*

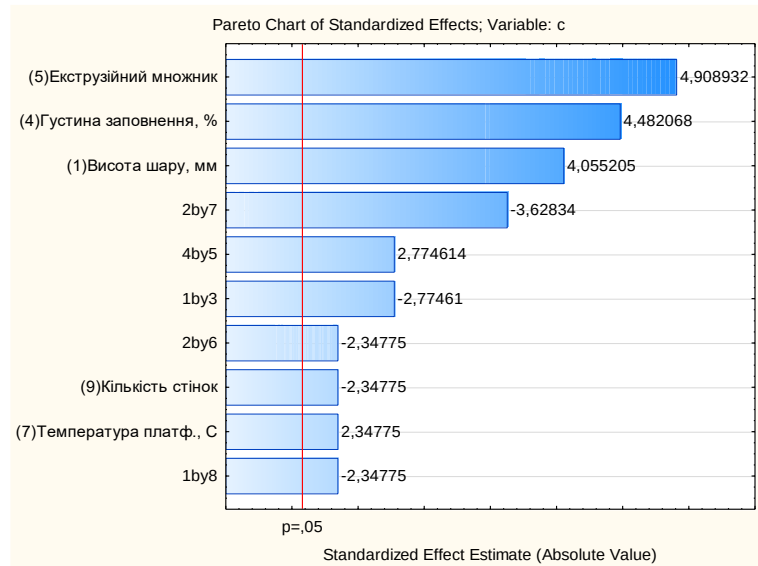


Рисунок 3.11 – Діаграма Pareto для розміру зразка *c*

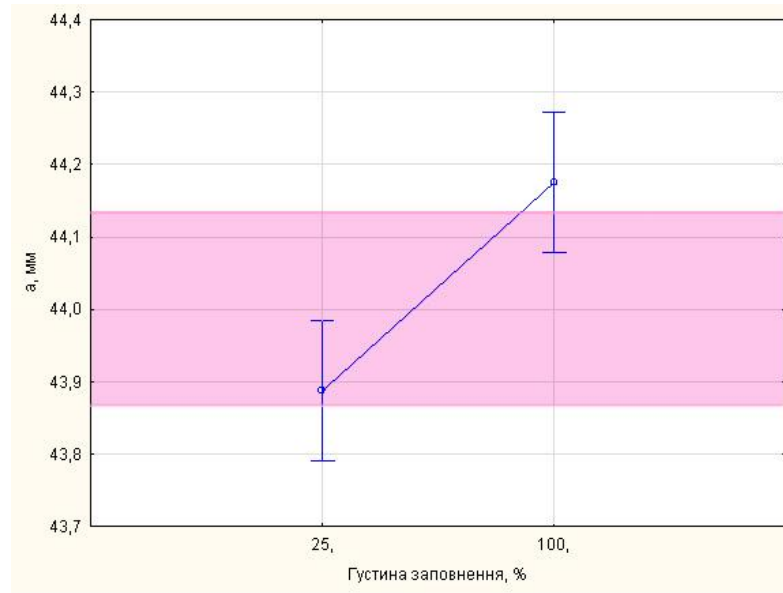


Рисунок 3.12 – Залежність величини розміру зразків – a від густини заповнення

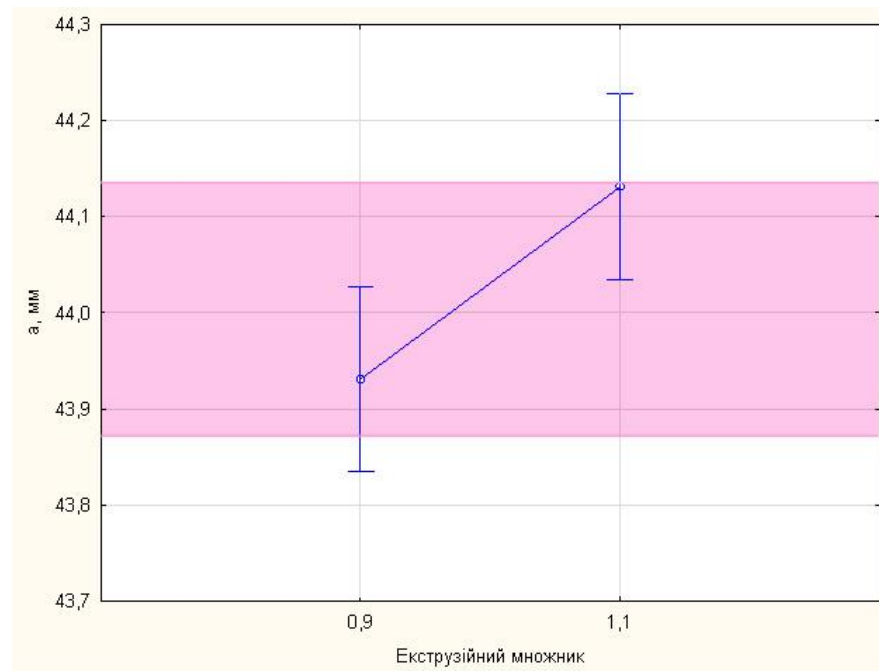


Рисунок 3.13 – Залежність величини розміру зразків – a від екструзійного множника

З рис. 3.14 видно, що і прямолінійна і концентрична схема заповнення дозволяє досягти заданого результату, однак, є частина деталей, які не входять в полу допуску на заданий розмір.

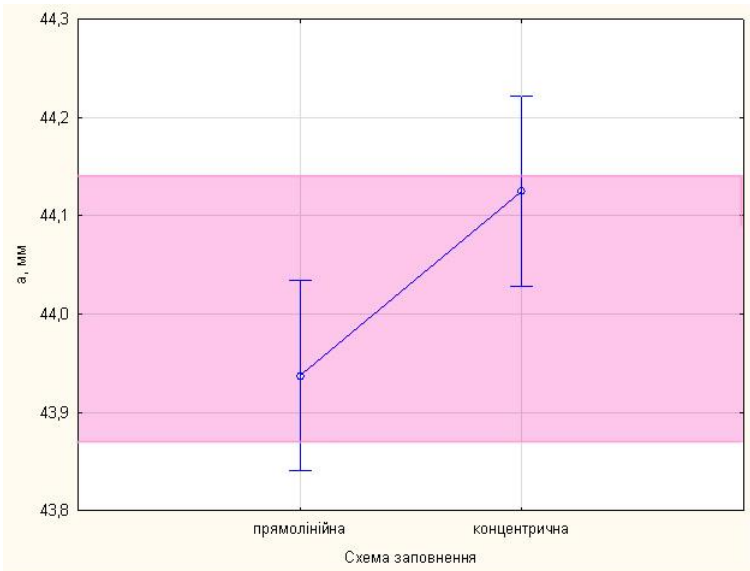


Рисунок 3.14 – Залежність величини розміру зразків – a від схеми заповнення

За графіком рис. 3.15 можна відзначити, що для висоти шару 15 мм і 3 мм оптимальною є температура платформи, яка дорівнює 80 °С. Значення 70 °С є неприйнятним з погляду точності розміру.

Наступна залежність рис. 3.16 дозволяє, для досягнення заданої точності, рекомендувати висоту шару, яка дорівнює 1,15 мм, збільшення цього параметру призведе до збільшення кількості бракованих зразків.

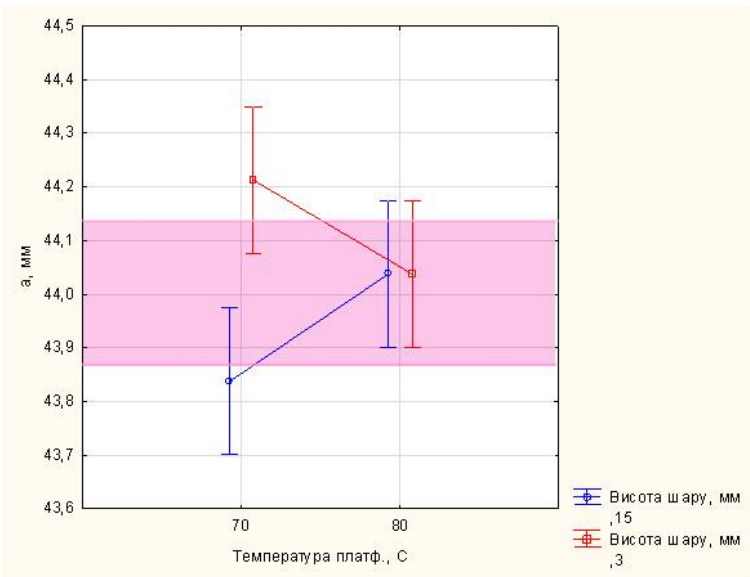


Рисунок 3.15 – Залежність величини розміру зразків – a від температури платформи

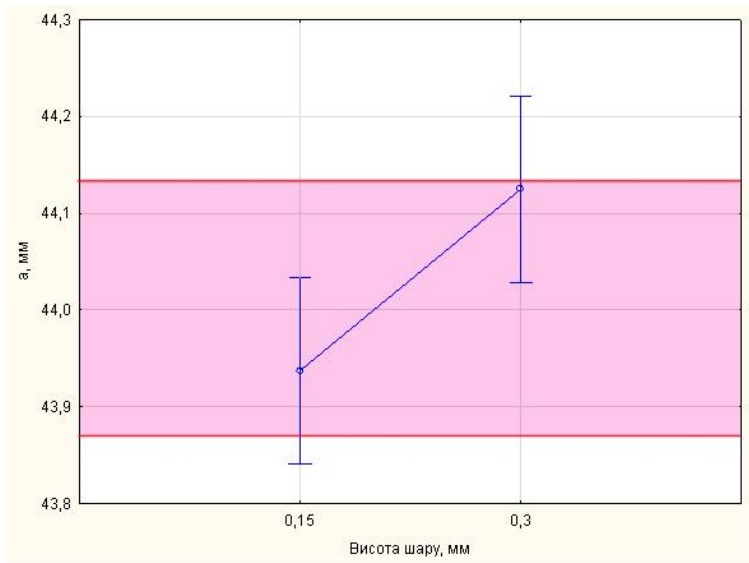


Рисунок 3.16 – Залежність величини розміру зразків – a від висоти шару

Отримана залежність, яка показана на рис. 3.17, дозволяє з точністю стверджувати, що екструзійний множник, який дорівнює 0,9 є неприйнятним для прямолінійної схеми заповнення. Найбільш доцільним є режим концентричного наповнення. Однак, тільки частина зразків відповідатиме заданій точності.

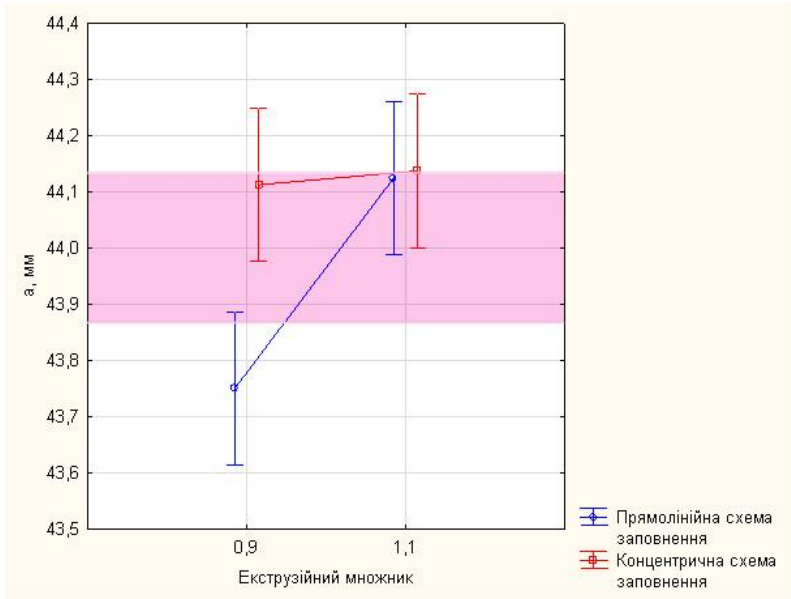


Рисунок 3.17 – Залежність величини розміру зразків – a від екструзійного множника

Далі на рис. 3.18 показано, що оптимальним поєднанням параметрів 3D-друку є режим: швидкість руху – 40 мм/с, густина заповнення – 25% та 100%. Встановлення інших режимів друку призведе до браку.

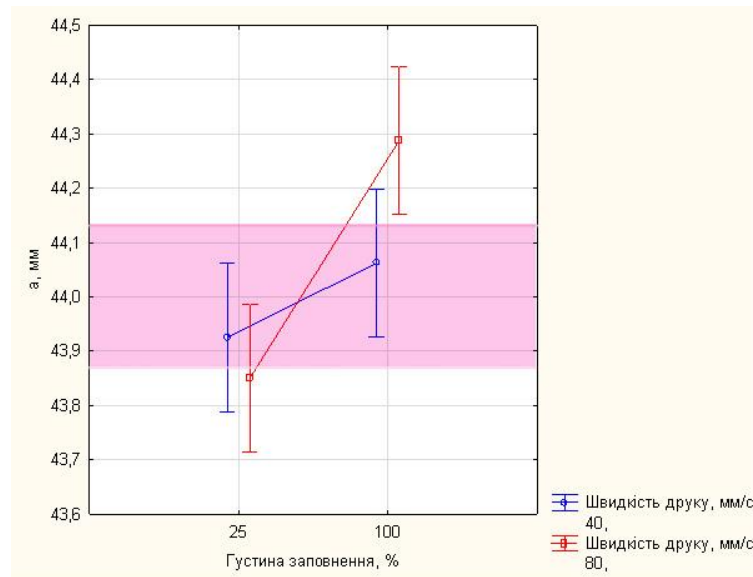


Рисунок 3.18 – Залежність величини розміру зразків – a від швидкості руху та густини заповнення

Далі розглянемо вплив параметрів друку та їх поєднання на точність розміру b . Першим, найвразливішим параметром, згідно з діаграмою є екструзійний множник (рис. 3.19). За графіком видно, що тільки значення екструзійного множника 0,9 дозволяє отримати заданий розмір і тільки у частині деталей. Збільшення цього параметра призведе до зниження точності.

Наступними поєднанням параметрів за частотою, є швидкість та температура екструзії. Воно дає позитивні результати тільки у випадку з наступного з'єднання: при швидкості друку 40 мм/с оптимальними є величини температури – 245 °C та 255 °C. А ось при швидкості 80 мм/с лише температура 245 °C. Збільшення температури при цьому значенні швидкості призведе до зниження якості (рис. 3.20).

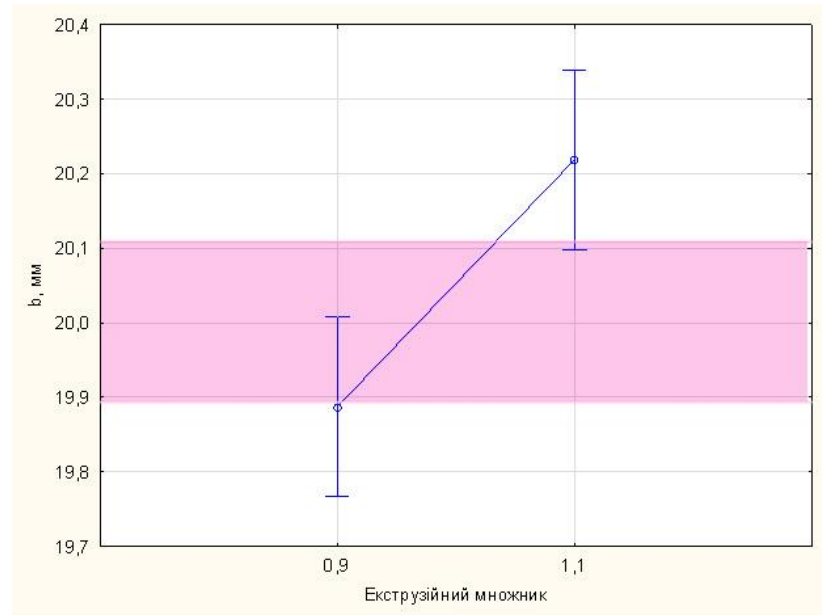


Рисунок 3.19 – Залежність величини розміру зразків – b від екструзійного множника

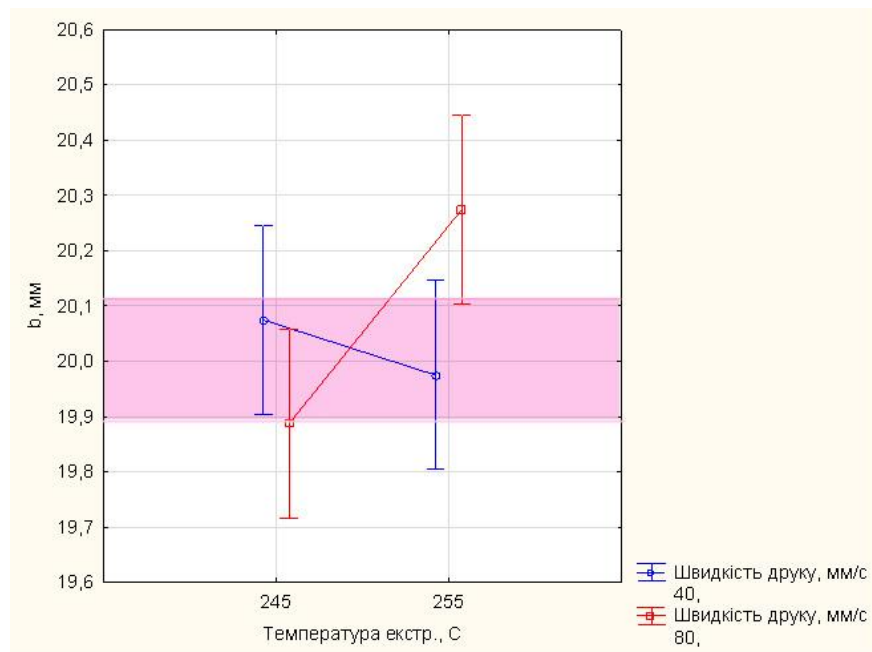


Рисунок 3.20 – Залежність величини розміру зразків – b від швидкості друку та температури екструзії

Наступний графік показує, що тільки кількість стінок, яка дорівнює показнику 2 дає можливість отримання точного розміру зразка (рис. 3.21).

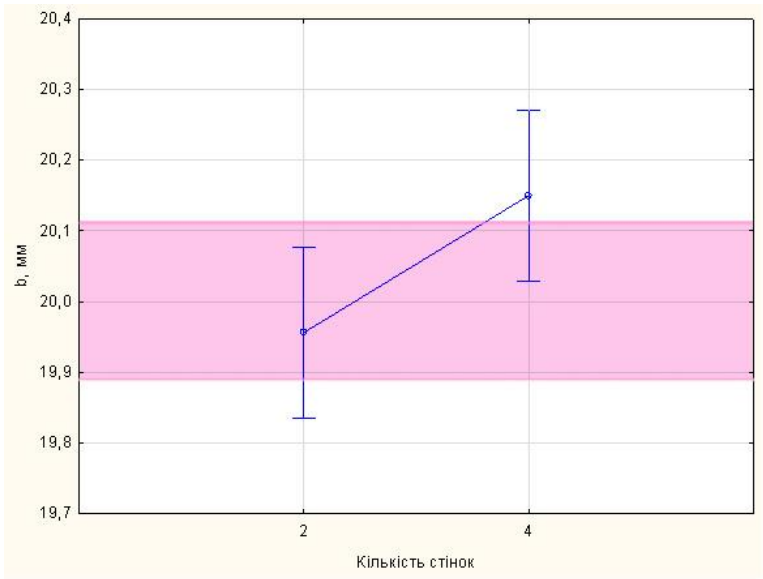


Рисунок 3.21 – Залежність величини розміру зразків – b від кількості стінок

Рис. 3.22 показує, що тільки концентрична форма заповнення дозволяє отримати точні розміри зразка. Тому, її можна рекомендувати до виконання для цього матеріалу зразка.

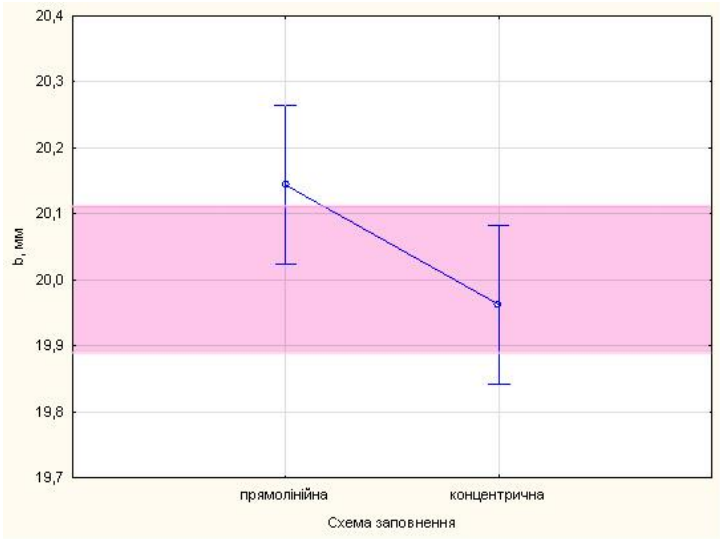


Рисунок 3.22 – Залежність величини розміру зразків – b від схеми заповнення

Говорячи про розмір – c , треба зазначити, що такі параметри як екструзійний множник, густина заповнення та висота шару мають однакову тенденцію впливу на його точність. Діапазон значень між показаннями на

діаграмі дає можливість забезпечити точність одержуваного розміру – c (рис. 3.23 – 3.25).

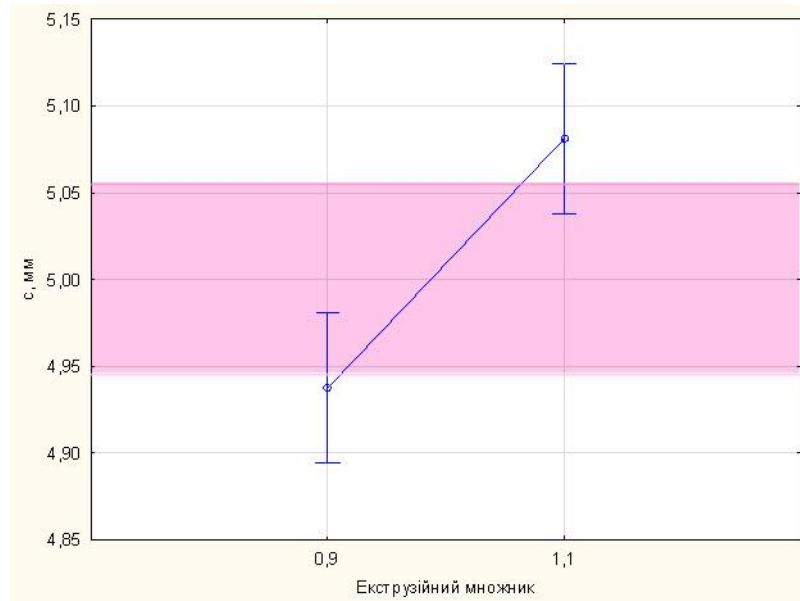


Рисунок 3.23 – Залежність величини розміру зразків – c від екструзійного множника

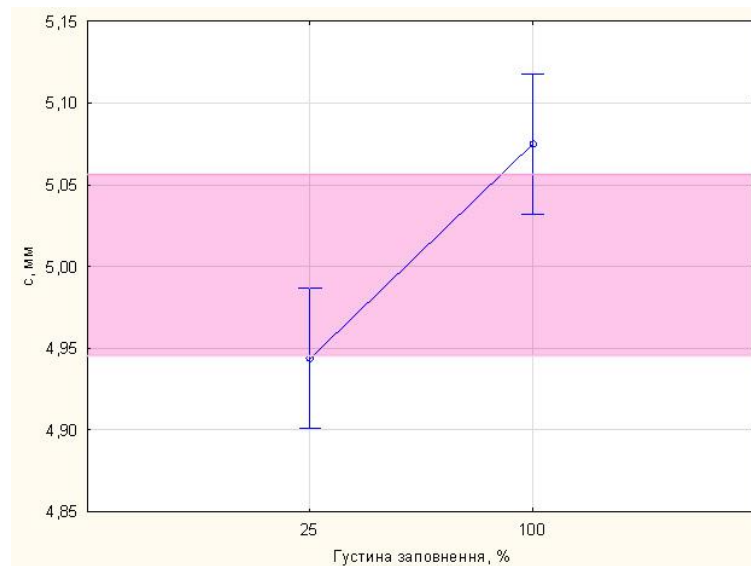


Рисунок 3.24 – Залежність величини розміру зразків – c від густини заповнення

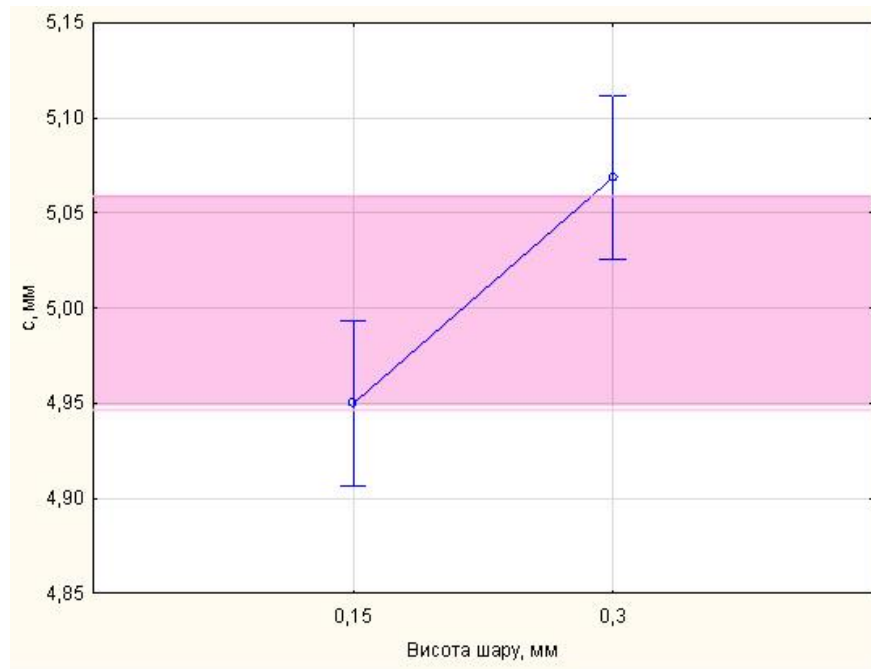


Рисунок 3.25 – Залежність величини розміру зразків – c від висоти шару

Поєднання параметра швидкості друку та температури платформи дає позитивний результат лише за швидкості 80 мм/с (рис. 3.26).

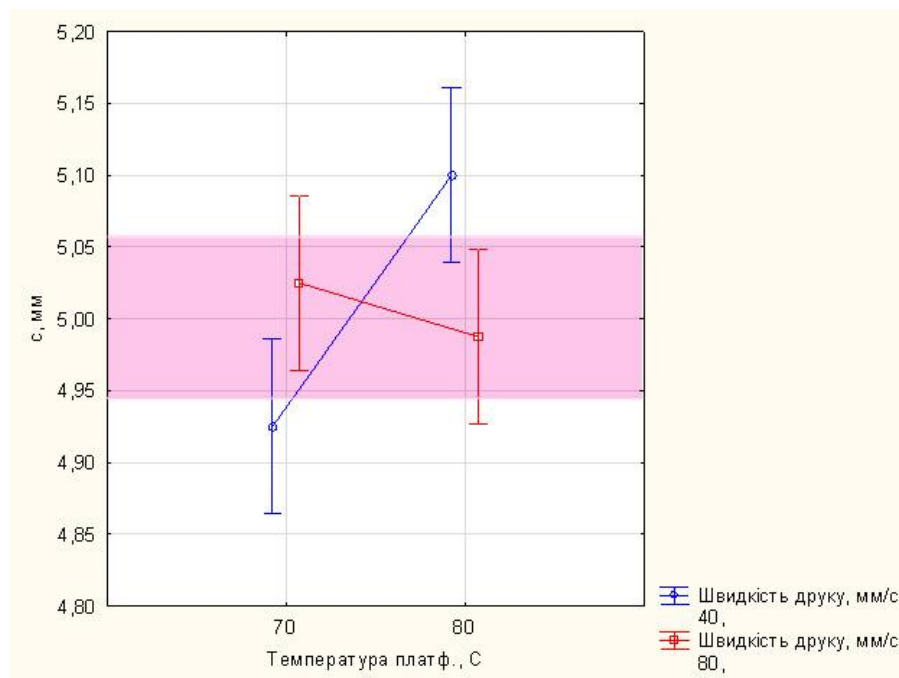


Рисунок 3.26 – Залежність величини розміру зразків – c від швидкості та температури платформи

За залежностями рис. 3.27 видно, що тільки зразки, отримані при значеннях екструзійного множника – 1,1 і густині заповнення – 25% дозволяє отримати задану точність розміру.

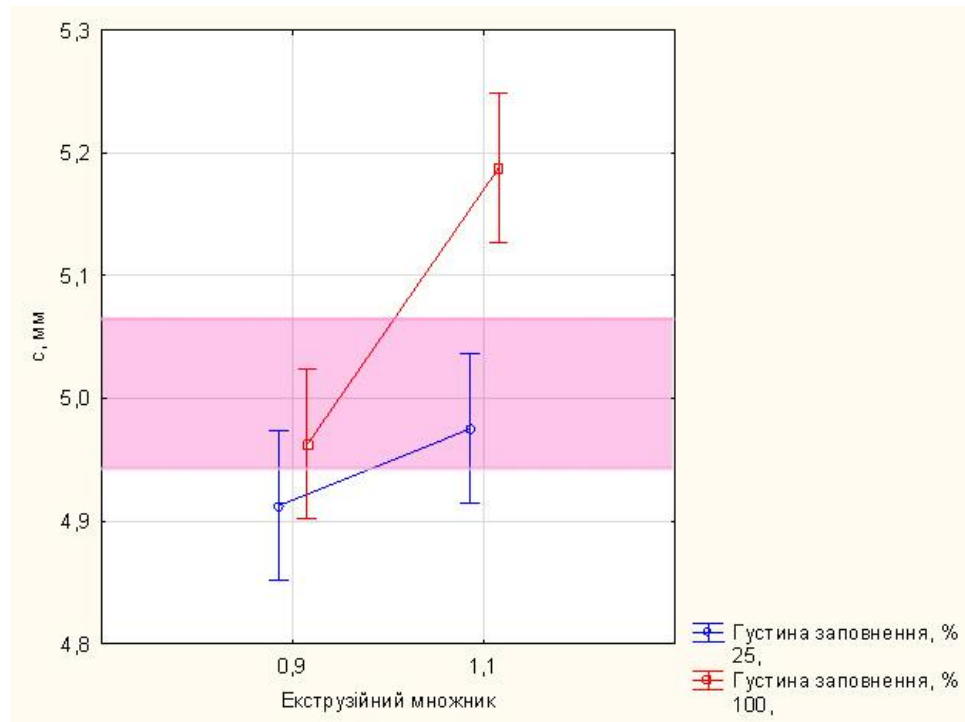


Рисунок 3.27 – Залежність величини розміру зразків – s від густини заповнення та екструзійного множника

Показані на рис. 3.28 залежності свідчать про те, що досягти заданої точності можна лише при поєднанні наступних параметрів: при висоті шару 0,15 мм та 0,3 мм оптимальним є лише концентрична схема заповнення зразка. Прямолінійна схема при цих же значеннях висоти шару не дозволяє досягти точності.

З рис. 3.29 видно, що найкращі результати, з точки зору точності розміру, дає поєднання: швидкості друку – 80 мм/с при температурі екструзії як 245 °С так і 255 °С.

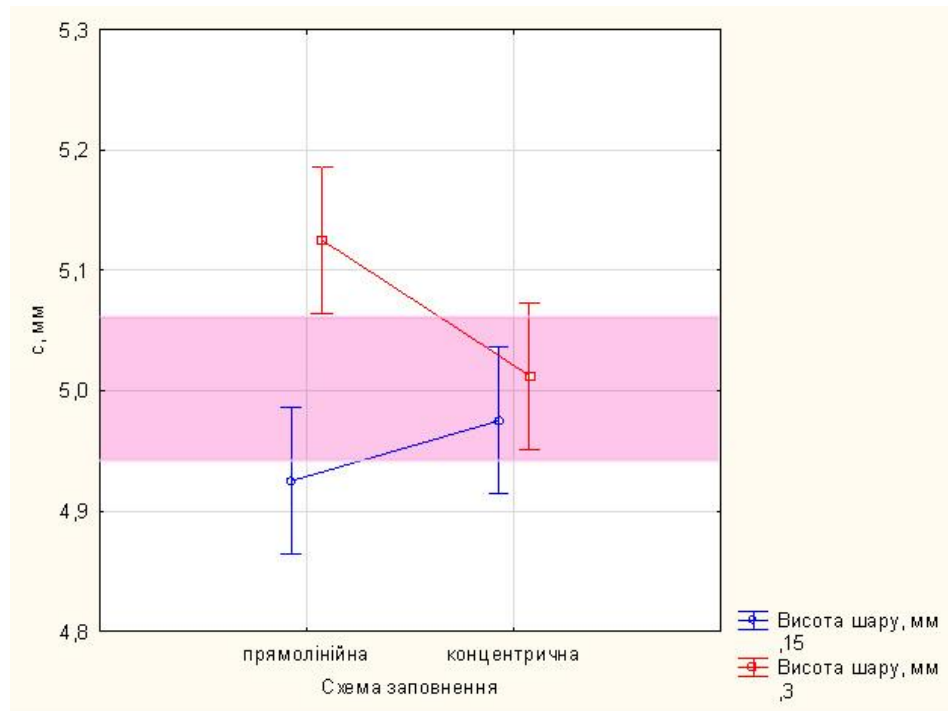


Рисунок 3.28 – Залежність величини розміру зразків – c від схеми заповнення та висоти шару

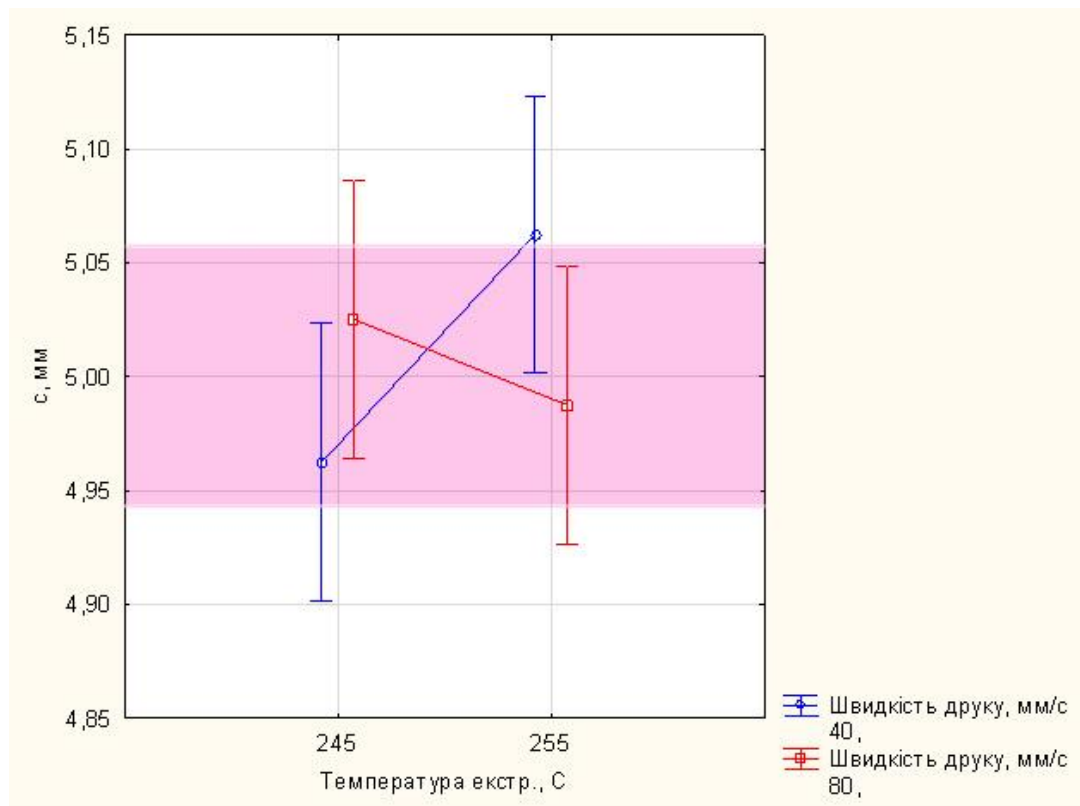


Рисунок 3.29 – Залежність величини розміру зразків – c від швидкості руху та температури екструзії

Для даних умов 3D-друку, кількість стінок, що дорівнює значенням 2 і 4 дозволяють досягти заданого рівня точності, як і температура платформи, що дорівнює 70 і 80 °C (рис. 3.30, 3.31).

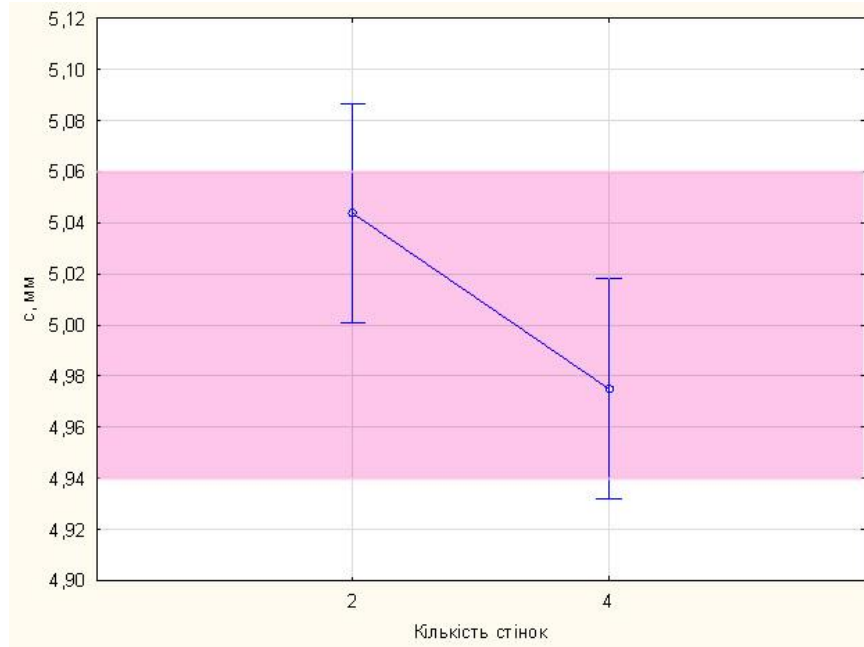


Рисунок 3.30 – Залежність величини розміру зразків – c від кількості стінок

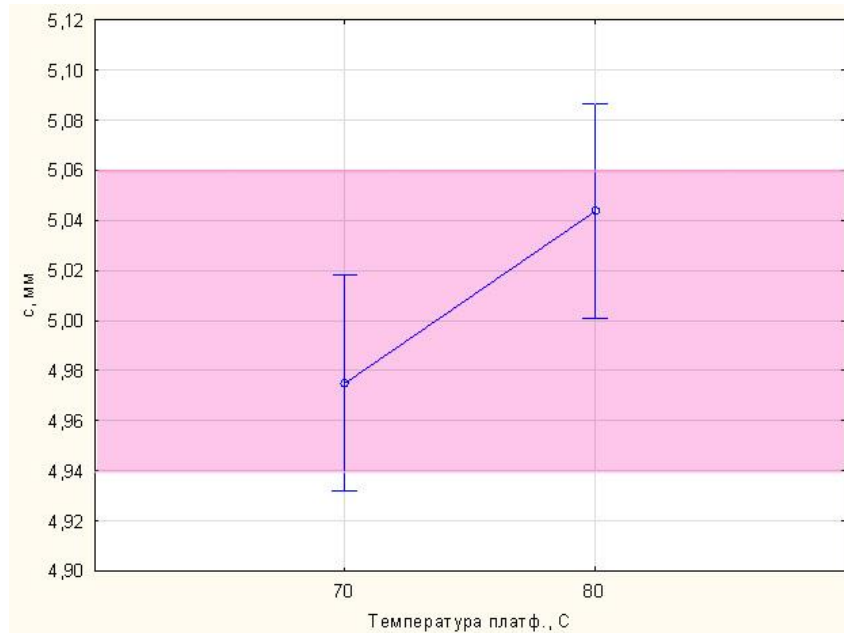


Рисунок 3.31 – Залежність величини розміру зразків – c від температури платформи

Говорячи про ширину укладання нитки, можна відзначити, що при висоті шару 0,15 мм і 0,3 мм параметр точності забезпечується лише при ширині укладання 0,52 мм (рис. 3.32).

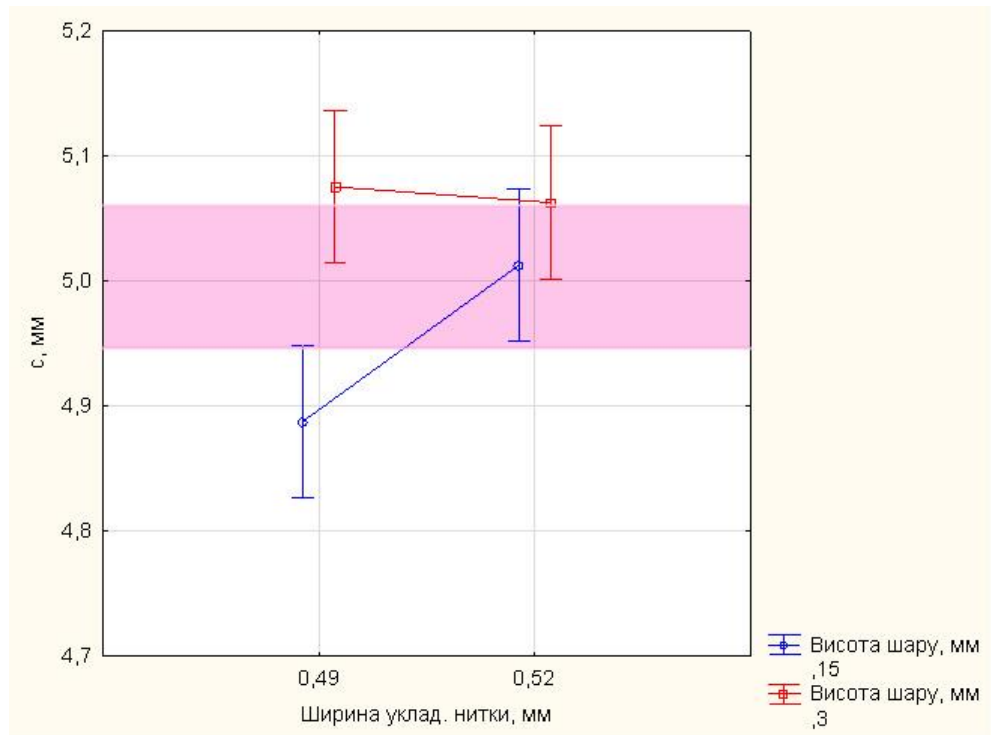


Рисунок 3.32 – Залежність величини розміру зразків – s від ширини укладання нитки

Таким чином, вся розглянуті параметри друку та їх поєднання забезпечують етап прогнозування впливу цих параметрів на якість та точність зразків.

Це ствердження підтверджується даними табл. 3.2, де показані оптимальні режими виготовлення зразків, які дають можливість отримати найкращі показники точності та якості поверхні. В таблиці показані два режими, які можна розділити по часу руку. Для першого час друку складає – 13 хв, для другого – 21 хв. Але, для другого режиму густина заповнення складає 100%, що дає можливість, отримати найбільш міцний зразок. Це ще раз підтверджує правильність наших розрахунків і дає можливість прогнозувати параметри зразків виготовлених з матеріалу CoPET.

Таблиця 3.2 Режими друку

Параметр друку	Режим 1	Режим 2
Висота шару, мм	0,3	0,15
Швидкість друку, мм	40	80
Схема заповнення	прямолінійна	концентрична
Густина заповнення, %	25	100
Екструзійний множник	1,1	1,1
Температура екструзії, °C	245	245
Температура платформи, °C	80	70
Ширина уклад. нитки, мм	0,52	0,49
Кількість стінок	4	2
Кількість суцільних нижніх і верхніх шарів	2	4

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Метою даного розділу є економічне обґрунтування витрат на проведення дослідної роботи [32] в галузі оцінювання ефективності пристроїв адитивного друку та відповідних технологій.

Техніко-економічне обґрунтування роботи повинно містити:

- розрахунок витрат;
- оцінку соціально - економічних результатів функціонування, а саме наукового ефекту дослідницької роботи.

4.1 Характеристика науково-дослідного рішення. Розрахунок витрат

Умовно магістерську роботу можна розділити на три основні етапи.

На початковому етапі були виконано аналіз літературних джерел для розуміння та виконання задач, а також порівняльний аналіз пристроїв для 3D-друку. Розглянуто та сформовано підходи до методик досліджень. Основна частина складалася з проведення експериментів та їх аналізу, отримання рекомендацій.

На заключному етапі зроблені висновки. Але, важливою частиною цього етапу є саме розрахунки, щодо техніко-економічне обґрунтування роботи.

До складу розрахунків входять такі статті витрат:

- матеріальні витрати;
- амортизація основних засобів (вартість машинного часу);
- витрати на спожиту електроенергію;
- інші витрати (водопостачання, водовідведення, опалення, освітлення)

та вартість послуг зв'язку.

Матеріальні витрати визначаються витратами на матеріали, для виконання робіт.

Матеріальні витрати розраховуються за такою формулою (4.1) [32]:

$$M = \sum_{j=1}^n Q_j \cdot C_{j, \text{грн}} \quad (4.1)$$

де Q_j – кількість використаних одиниць j -го виду матеріалів;

C_j – ціна одиниці j -го виду матеріалів.

У даному випадку загальні витрати на матеріали становлять 64 грн.

Амортизація основних засобів розраховується за формулою (5.2):

$$AB = \sum_{k=1}^L \frac{BO_k}{TE_k} T, \text{ грн} \quad (4.2)$$

де BO_k – вартість основних засобів k -го виду;

TE_k – термін експлуатації основних засобів k -го виду, днів;

T – термін дослідницької роботи, днів;

L – кількість видів обладнання.

$$AB = (2(10500+15000)/14)150=546428,6 \text{ грн.}$$

Витрати на використану обладнанням електроенергію розраховуються за формулою (4.3):

$$Z_e = MtT, \text{ грн} \quad (4.3)$$

де M – потужність устаткування, тобто кількість енергії, споживаної за одиницю часу (кВт/година);

t – кількість годин використання устаткування за період проведення дослідницької роботи;

T – вартість (тариф) використання 1 кВт електроенергії.

$$Z_e = 10 \cdot 56 \cdot 2,64 = 1478,4 \text{ грн.}$$

До інших статей витрат відносяться такі:

- водопостачання, водовідведення, освітлення, опалення, які прийнято у розмірі 20% від витрат на оплату праці;

- вартість оплати послуг зв'язку.

Отримані розраховані данні занесемо у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахунок витрат на розробку наукової роботи

№	Стаття витрат	Сума, грн
1	Матеріальні витрати	64
2	Амортизація основних засобів	546428,6
3	Витрати на спожиту електроенергію	1478,4
4	Інші витрати, в тому числі:	
4.1	адміністративні витрати	789,5
4.2	вартість послуг зв'язку	300
5	Ціна без ПДВ	549060,5
6	ПДВ (20% від. п. 5)	109812,1
7	Ціна з урахуванням ПДВ	658872,6

4.2 Оцінка наукового ефекту дослідницької роботи

Основними ознаками наукового ефекту дослідницької роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень поширення результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Показник, що характеризує науковий ефект, визначається за формулою:

$$E_n = 0,6k_{\text{нов}} + 0,4k_{\text{теор}} \quad (4.4)$$

де $k_{нов}$, $k_{теор}$ – показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання дослідницької роботи;

0,6; 0,4 - вагові коефіцієнти значущості показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання дослідницької роботи.

Значення показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання у балах наведено у табл. 17 та 18 [39]. Згідно таблиці 17 [39] визначено показник ступеня новизни – «Новий». а саме: «Отримано нову інформацію, яка істотно зменшила невизначеність значень (по-новому або вперше пояснено відомі факти, закономірності, впроваджено нові поняття, розкрито структуру змісту). Проведено суттєве удосконалення, доповнення та уточнення раніше досягнутих результатів». Показник дорівнює – 6.

За таблицею 18 [39] обрана характеристика рівня теоретичного опрацювання: «Елементарний аналіз зв'язків між фактами з наявністю гіпотези, класифікації, яка пояснює версії чи практичних рекомендацій приватного характеру». Показник дорівнює – 2.

$$E_n = 0,6 \cdot 6 + 0,4 \cdot 2 = 4,4.$$

Таким чином, можна зробити наступні висновки. Магістерська робота має перш за все, науково-технічний ефект, який характеризується приростом наукової та технічної інформації, отриманої внаслідок проведення цього дослідження. Науковий ефект виявляється у отриманні наукових результатів, збільшують обсяг знань, теоретичну базу у тому чи іншому науковому напрямі, що дозволяє виявити нові закономірності, які можна використовувати практично. Також, Магістерська робота спрямована на вдосконалення навчального процесу, і тому, має навчально-дослідницький ефект, який проявляється у тому, що виконується у вузі та впливає на якість навчального процесу, рівень підготовки фахівців і, зрештою, якість їх у майбутньому. Результатом її може стати нова лабораторна робота, навчальний посібник, програма розрахунку, тощо.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

В сучасному житті, безпека життєдіяльності є багатограним об'єктом розуміння й сприйняття дійсності, що потребує інтеграції різних стратегій, сфер, аспектів, форм і рівнів пізнання. Складовими цього поняття є різноманітні науки про безпеку. Основні положення з охорони праці встановлені і регламентуються Законом України «Про охорону праці», Кодексом законів про працю України, Цивільним кодексом, Кодексом цивільного захисту, Законом України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» та прийнятими відповідно до них нормативно-правовими актами [42-48].

Під час будь-якої роботи все регламентується нормативними документами та актами. Але, стосовно заходів безпеки під час роботи на 3D принтері належної уваги нема. По-перше, 3D-принтер є складним електроприладом, тому, працюючи з ним, належить виконувати стандартні вимоги пожежо- та електробезпеки. Також існує загроза термоопіків, оскільки під час роботи окремі елементи можуть нагріватися до високої температури.

Серед причин виникнення пожеж основними є [42]:

- порушення техніки безпеки (пристрій і обслуговування систем опалення, вентиляції; правила збереження і використання пожежонебезпечних речовин і матеріалів; невиконання протипожежних норм і заходів; паління);
- неправильне поводження з вогнем (смолоскипи, паяльні лампи, свічки, паління);
- несправність електромережі (коротке замикання; перевантаження електромережі; порушення правил використання електроустаткування і приладів);

– підпали.

На кожному галузевому об'єкті з урахуванням його пожежної небезпеки наказом (інструкцією) встановлюється відповідний протипожежний режим.

До основних вимог відносяться:

– споживачі електроенергії повинні бути справними, ізоляція не ушкоджена;

– переносні споживачі електроенергії обладнують гнучким кабелем з мідними жилами з урахуванням їх захисту від можливих пошкоджень;

Існують способи, що дозволяють навіть без приладів визначати випадки початку горіння речовин.

До цих простих способів відносяться [42]:

– виявлення запаху, не властивого для даної ситуації (фосген – запах прілого сіна, ціанистий водень – запах гіркої мигдалю, сірководень – запах тухлих яєць тощо);

– виявлення диму, завіси, хмари, відмінних за кольором від повітря.

Основне завдання електробезпеки – мінімізувати можливість негативного впливу електричного струму на людину. Досягти цієї мети можна за допомогою таких заходів і засобів:

– безпечною і надійною конструкцією електроустановок;

– організаційними та технічними заходами щодо безпечної експлуатації електроустановок та використання електричної енергії;

– технічними засобами захисту.

Також, працюючі 3D-принтери впливають на якість повітря в приміщенні – підвищується вміст озону, оксидів азоту і вуглецю. Також можливе виділення таких шкідливих речовин, як трихлоретан, ізооктан, толуол, бензол, ксилол, газоподібні з'єднання кадмію та селену. Отже, слід подбати про вентиляцію чи регулярно провітрювати та робити вологе прибирання приміщення.

Тому, тим, хто планують задіяти 3D-принтери у практичній діяльності, слід знати основи безпечної праці на цих приладах. Перш за все, до обслуговування периферійного пристрою допускаються лише повнолітні оператори. До самостійної роботи вони можуть розпочати після детального ознайомлення з пристосуванням, посадовими інструкціями. Інструктаж спеціаліста на робочому місці проводить майстер чи інженер з охорони праці.

Під час роботи, катушка з 3D-пластиком встановлюється так, щоб її перекося та затримки при подаванні нитки були виключені. Іноді, для більш рівномірного розмотування нитки, її перекидають через спинку стільця, тощо – у цьому випадку пластикова нитка може замотатися або зачепитися за сторонні предмети. Результати цього непередбачувані – принтер може впасти зі столу, або, навпаки, повиснути в повітрі, що, у свою чергу, може призвести до його поломки або пожежі. Тому, встановлювати принтер треба на надійній основі – спеціальному столі чи тумбі, де передбачено достатньо місця для розташування робочих органів принтера.

При нагріванні пластику ABS утворюється невелика кількість парів акрилонітрилу. 3D принтер в середньому викидає до 200 млн ультрадрібних частинок цієї речовини за хвилину. При використанні пластику PLA викидається до 20 млн частинок на хвилину, він більш безпечний, але все ж таки завдає шкоди здоров'ю. Осідаючи в легенях, частки пластику можуть призвести до найважчих наслідків – раку легень, астмі, звичайно, зараз немає даних щодо клінічних випробувань. Тому, місце проведення робіт на 3D принтері має добре вентилюватися. У літній час необхідно відкривати вікна, з зимовий – треба забезпечити вентиляцію, яка працює незалежно від температури за вікном. Також, на ринку зустрічаються закриті принтери із системою фільтрації, але коштують досить дорого. Вони більш безпечні, але властивості використовуваних матеріалів повністю не вивчені, тому не варто нехтувати додатковими заходами безпеки та роботи з ними.

Існує багато різних способів та заходів, призначених для підтримання чистоти повітря виробничих приміщень у відповідності до вимог санітарних норм. Основними засобами захисту людини від впливу шкідливих речовин є [42]:

- 1) гігієнічне нормування їх вмісту у виробничій зоні і на робочому місці, а також різні методи очищення;
- 2) приміщення, в яких постійно перебувають люди, повинні провітрюватися через витяжні системи, вікна, фрамуги, кватирки максимальний об'єм вентиляованого повітря у приміщенні має бути таким, щоб кратність його заміни була не більшою 5 разів за годину, а швидкість руху – 0,2-0,5 м/с. найбільш ефективним і дешевим способом зменшення кількості пилу є вологе прибирання у приміщенні та вентиляція приміщень;
- 3) запобігання проникненню шкідливих речовин у повітря робочої зони за рахунок герметизації обладнання, ущільнення з'єднань, люків та отворів, удосконалення технологічного процесу;
- 4) застосування іонізаторів;
- 5) застосування засобів захисту людини .

Якщо це можливо, під час роботи пристрою, краще вийти із кімнати. Якщо це з якоїсь причини неможливо, бажано скористатися респіратором із вугільним фільтром. В той же час, перш ніж вийти з кімнати з працюючим принтером, потрібно переконатися, що перший шар рівно ліг і ніде не відстає від поверхні тому, що від його якості залежить 50% якості готового виробу.

Для безпечного спостереження за 3D-принтером бажано встановити камеру, це дозволить залишатися в курсі поточного стану друку та оперативно відреагувати на нештатну ситуацію.

В цілому, перш ніж почати друк, переконайтеся, що на 3D принтері справні кінцеві датчики. Тоді при можливому збою принтер сам зупинити друк. Після друку, перед зніманням надрукованої деталі необхідно

дочекатися охолодження термостола, зайві 10-15 хвилин нададуть можливість уникнути опіку.

Таким чином, основна мета безпеки життєдіяльності, яка полягає у тому, щоб сформувати в людини свідоме та відповідальне ставлення до питань особистої безпеки й безпеки тих, хто її оточує, складається з виконання вищенаведених рекомендацій. Основна мета: навчити людину розпізнавати й оцінювати потенційні небезпеки, визначати шлях надійного захисту від них, уміти надавати допомогу в разі потреби собі та іншим, а також оперативно ліквідовувати наслідки прояву небезпек у різноманітних сферах людської діяльності [42].

ВИСНОВКИ

В результаті виконаної магістерської роботи можна зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що адитивні технології в сучасному виробництві займають важливе місце. Пов'язано це з зацікавленістю технологіями, які прискорюють та спрощують процес виготовлення деталей в багатьох галузях техніки. Розглянуті технології та матеріали, які використовують. Режими виготовлення та їх оптимальні значення залежать від кожного окремого випадку і для їх оптимізації необхідно використовувати експериментальний підхід.

2. По надрукованим зразкам отримано значення розмірних параметрів та шорсткості поверхні по кожному режиму. Побудовано діаграми Pareto. За допомогою дисперсійного аналізу проаналізовано вплив найважливіших і значущих показників та їх поєднань на шорсткість та точність розмірів зразків. Отримано комплекс режимів виготовлення, які дозволяють отримати зразки, які відповідають заданій точності та якості поверхні.

3. Економічно обґрунтовано доцільність прийнятих рішень. Отримано основні економічні показники. Науковий ефект роботи, згідно розрахунків, збільшує обсяг знань, теоретичну базу і що дозволяє виявити нові закономірності, які можна використовувати практично.

4. В розділі з охорони праці розглянуті основні засоби безпеки щодо роботи на 3D-принтері та захисту людини від впливу шкідливих речовин.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing / S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl et al. // Chem. Rev., 2017. 117, 15 С. 10212–10290. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>.
2. Кузнецов, В. Е. CAD/CAM/CAE / В. Е. Кузнецов. Observer, 2003. №4 (13). С. 2–7.
3. Петришина, А. А. Тенденції розвитку тривимірного друку, обладнання та матеріалів для нього / А. А. Петришина // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2015 р., м. Тернопіль. – Тернопіль, 2015. - С. 26-27.
4. Адитивна технологія: опис, визначення, особливості застосування та відгуки. Адитивні технології в промисловості - Режим доступа: <http://poradu.pp.ua/tehnka-tehnologyi/35539-aditivna-tehnologiya-opis-viznachennya-osoblivost-zastosuvannya-ta-vguki-aditivn-tehnologyi-v-promislovost.html>.
5. Redwood, B. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications / B. Redwood, S. Filemon et al. 3D Hubs. 2017. 304 p.
6. Масючок, О. П. Адитивні технології полімерних матеріалів (Огляд) / О. П. Масючок, М. В. Юрженко, Р. В. Колісник, М. Г. Кораб // «Автоматичне зварювання», № 5, 2020, С. 53-60 . DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.05.08>.
7. Williams, L. Additive Manufacturing or 3D Scanning and Printing, Manufacturing Engineering Handbook, 2nd ed. / L. Williams. McGraw-Hill Education. 2016. 459 p.
8. Turner, B. N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes / B. N. Turner, R. Strong, A. Scott // Gold Rapid Prototyping Journal, 0(3), 2014. p. 192–204.
9. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead / L. David, Joseph

Bourella, Jr.a, Beaman, C. Leub, Ming, W., David. RosencRapidTech US-Turkey Workshop on Rapid Technologies, 2009. Istanbul.

10. Kazemi, M. Supports effect on tensile strength of the stereolithography parts / M. Kazemi, A. Rahimi // *Rapid Prototyping*, 21, 2015, p. 79–88.

11. Jacobs, P.F. *Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography* / P.F. Jacobs. Society of Manufacturing Engineers, New York, U.S. 1993. 434 p.

12. Zhang, X. Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures / X. Zhang, X. Jiang, C. Sun // *Sensor Actuat A–Phys.*, 2009. p. 77–149.

13. 3D printing of shape memory polymers for fl exible electronic devices / M. Zarek, M. Layani, I. Cooperstein et al. // *Adv. Mater.*, 28, 2016. 4449–4454.

14. Gibson, I. *Additive manufacturing technologies* / I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker. NY: Springer, New York, U.S, 2014. 498 p.

15. Impact of additive manufacturing on engineering education – evidence from Italy / P. Minetola, L. Iuliano, E. Bassoli, A. Gatto // *Rapid Prototyping Journal* 21(5):535 – 555. DOI:[10.1108/RPJ-09-2014-0123](https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0123)

16. Kazmer, D. Three-dimensional printing of plastics. In: *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)* / D. Kazmer. William Andrew Publishing, Amsterdam, The Netherlands, 2017. p. 617–634.

17. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 105 с.

18. Аддитивные технологии: что это? - Режим доступа: <https://3dprinter.ua/additivnye-tehnologii-chto-jeto/>.

19. Аддитивные технологии и 3D-сканирование в машиностроении: 7 историй успеха - Режим доступа: https://habr.com/ru/companies/iqb_technologies/articles/440896/.

20. Androshhuk, G. O. Additive technologies: perspectives and problems of 3D printing / G. O. Androshhuk // *Nauka, tehnologii, innovacii*, 1, 2017. p. 68–77.

21. Experimental and numerical analysis of the selective lasersintering (SLS) of PA12 and PEKK semi-crystalline polymers / P. Peyre, Y. Rouchausse, D. Defauchy, G. J. Régnier // Mater. Process. Technol., 225, 2015. p. 326–336.

22. Turner, B.N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. / B. N. Turner, R. Strong, S. A. Gold // Rapid Prototyping J., 0(3), 2014. p. 192–204.

23. Изготовление об'ектов методом ламинирования (LOM) – Режим доступа: <https://3ddevice.com.ua/3d-pechat-iz-bumagi-lom/>.

24. Идеальные температуры для печати PLA–пластика – Режим доступа: <https://ten24.com.ua/blog/idealnye-temperatury-dlya-pechati-pla-plastika/>.

25. Все, что вы хотели узнать о 3D принтерах – Режим доступа: <https://3dprintstory.org/skorost-3d-printera-kak-nastroit-pravilno>.

26. Главные характеристики 3D-принтера – Режим доступа: <https://vektorus.ua/blog/harakteristiki-3d-printerov.html>.

27. Типы 3D-принтеров по технологиям печати – Режим доступа: https://www.hwlibre.com/ru/tipos-impresoras-3d/#Principales_familias/.

28. Кулинарный 3D-принтер еды – Режим доступа: <https://1000.menu/table/15441-kulinaryi-3d-printer-edy>.

29. Специфический 3D пластик: NYLON, PET/COPET, PC (Поликарбонат) – Режим доступа: <https://3ddevice.com.ua/blog/3d-printer-obzory/spetsificheskii-3d-plastik/>.

30. Первый биологический 3D-принтер – Режим доступа: <https://vektorus.ua/blog/bioprinter.html#pervyy-biologicheskii-3d-printer>.

31. CoPET от компании MonoFilament – Режим доступа: <https://3dprinter.ua/shop/copet-monofilament/>.

32. Яригін, В. А. Аналіз параметрів, що впливають на якість 3d друку / В. А. Яригін, С. П. Вислоух // Materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar «Modern questions of production and repair in industry and in transport», March 23-29, 2020, Kosice, Tbilisi, Georgia. – С. 180-183.

33. Яригін В. А. Методологія покращення характеристик міцності деталі, що виготовлена методом 3D друку // В. А Яригін., С. П Вислоух // Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 6–9 листопада 2019 р. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка». – С. 209-213.

34. Лазерный конфокальный микроскоп SRT – Режим доступа: <https://tirit.org/mikroskop/analizator-srt.php>.

35. Щуповые приборы для измерения шероховатости – Режим доступа: https://bstudy.net/986731/tehnika/schupovye_pribory_izmereniya_sherohovatosti

36. Определение шероховатости обработанной поверхности – Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/56061/Opredelenie_sherohovatosti_obrabotannoj_poverhnosti.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

37. Perthometer S2 Surface Measurement System – Режим доступа: <https://www.machinetoolsonline.com/doc/perthometer-s2-surface-measurement-system-0001>.

38. Методические рекомендации к выполнению экономической части дипломных проектов, работ для студентов дневной и заочной форм обучения всех специальностей / Л. В. Соколова, О. І. Горбач, С. В. Гришко, Є. В. Диденко, Л. В. Левченко, Г. М. Путятин, В. Г. Харченко. Харків: ХНУРЕ, 2010. 64 с.

39. Еркешева, З. Д. Методические указания к выполнению экономической части дипломных работ для студентов специальности 5В060200 – Информатика. – Алматы: АУЭС, 2016 – 32 с.

40. Карташов, М. В. Імовірність, процеси, статистика / М. В. Карташов, Київ : ВПЦ Київський університет, 2007. 504 с.

41. Handbook of Maintenance Management and Engineering / Mohamed Ben-Daya, O. Salih Duffuaa, Abdul Raouf, Jezdimir Knezevic, Daoud Ait-Kadi, Publisher: Springer, 2009. 740 p. DOI:10.1007/978-1-84882-472-0.

42. Безпека життєдіяльності та охорона праці : підруч. / В. Г. Грибан, А. Є. Фоменко, Д. Г. Казначеев. Дніпро : Дніпроп. держ. ун-т внутр. справ, 2022. 388 с.

43. ДБН В.2.2-28:2010 Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення . [На заміну СНИП 2.09.04-87 ; чинний від 2011-10-01]. К. : Міненбуд України, 2011. 31 с.

44. ДСТУ EN 60204-32:2018 «Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1».

45. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21]. К. : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

46. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Державний Стандарт України).

47. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01]. К. : Мінрегіон України, 2017. 47 с. (Державні будівельні норми).

48. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [На заміну НАПБ Б.03.001-2004 ; чинний від 2018-02-23]. К. : МВС України, 2018. 23 с. (Правила).