

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
Факультет Хімічних та біофармацевтичних технологій
Кафедра Прикладної екології, технології полімерів та хімічних волокон

Дипломна магістерська робота

на тему Удосконалення технології адитивного формування фотополімерних смол

Виконала: студентка групи МГПП-20
спеціальності 161 – Хімічні технології та
інженерія
освітньої програми Хімічні технології
переробки полімерних і композиційних
матеріалів

Ігор СЛЄПЦОВ

Керівник д.т.н., проф. Богдан САВЧЕНКО

Рецензент д.т.н., Володимир ХОМЕНКО

Київ 2021

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Факультет Хімічних та біофармацевтичних технологій

Кафедра Прикладної екології, технології полімерів та хімічних волокон

Спеціальність 161 – Хімічні технології та інженерія

Освітня програма Хімічні технології переробки полімерних і композиційних матеріалів

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри прикладної екології,
технології полімерів та хімічних волокон**

Вікторія ПЛАВАН

“ _____ ” _____ 2021 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Слепцова Ігора Олеговича

1. Тема роботи Удосконалення технології адитивного формування фотополімерних смол

Науковий керівник роботи Савченко Богдан Михайлович д.т.н., проф.,

затверджені наказом вищого навчального закладу від “04”жовтня 2021 року № 286

2. Строк подання студентом роботи 13 грудня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики, дані науково-технічної та патентної літератури

4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити) Особливості впливу технологічних параметрів адитивного формування фотополімерними смолами на властивості готових виробів. Використання оптимальних параметрів 3D друку та постобробки для отримання функціональних виробів з фотополімерних смол. Дослідження та порівняння фізико-механічних властивостей виробів отриманих методом адитивного виробництва

5. Консультанти розділів дипломної магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Вступ	Богдан САВЧЕНКО, д.т.н., проф.		
Розділ 1	Богдан САВЧЕНКО, д.т.н., проф.		
Розділ 2	Богдан САВЧЕНКО, д.т.н., проф.		
Розділ 3	Богдан САВЧЕНКО, д.т.н., проф.		
Розділ 4	Вікторія ПЛАВАН д.т.н., проф.		
Висновки	Богдан САВЧЕНКО, д.т.н., проф.		

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка про виконання (з підписом керівника і студента)
1	Вступ	01.09.21 р. –18.09.21 р.	
2	Розділ 1. Літературний огляд в галузі адитивного формування	20.09.21 р. –9.10.21 р.	
3	Розділ 2. Об'єкти дослідження та методи дослідження	11.10.21 р. –30.10.21 р.	
4	Розділ 3. Технологічно-експериментальний розділ	01.11.21 р. –13.11.21 р.	
5	Розділ 4. Техніка безпеки та охорона праці в адитивному виробництві методом SLA	15.11.21 р. –30.11.21 р.	
6	Висновки	01.12.21 р. –03.12.21 р.	
7	Оформлення дипломної магістерської роботи (чистовий варіант)	06.12.21 р.	
8	Здача дипломної магістерської роботи на кафедрі для рецензування (за 14 днів до захисту)	06.12.2021 р.	
9	Перевірка дипломної магістерської роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)	13.12.2021 р.	
10	Подання дипломної магістерської роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	13.12.2021 р.	

Студент _____

Ігор СЛЄПЦОВ
(підпис)

Науковий керівник проекту _____

Богдан САВЧЕНКО
(підпис)

Директор НМЦУПФ _____

Олена ГРИГОРЕВСЬКА

Анотація

Слепцов І.О. Удосконалення технології адитивного формування фотополімерних смол

Дипломна магістерська робота за спеціальністю 161 – «Хімічна технологія та інженерія» Київський національний університет технологій та дизайну, Київ 2021 рік.

Дипломну магістерську роботу присвячено удосконаленню технології адитивного формування фотополімерних смол. Розроблено рецептурний склад фотополімерної смоли для адитивного формування на SLA 3д принтері. За допомогою установок для дослідження фізико-механічних властивостей виробів, підібрані оптимальні технологічні параметри друку та умови постобробки виробів.

Досліджено вплив засвічення ультрафіолету на фізико-механічні властивості виробів. Розроблено композицію на основі фотополімерної смоли з поліамідом в якості наповнювача для покращення фізико-механічних властивостей. Отримано вироби для функціонального використання.

Досліджено можливість друку високо наповненими композитами на основі фотополімерної смоли. Розроблено рецептурний склад високо наповненої фотополімерної смоли для адитивного формування.

Робота викладена на 92 сторінках, містить 8 таблиць, 27 рисунків.

Ключові слова: фотополімер, адитивне виробництво, фізико-механічні властивості, полімерні композити.

Summary

Slieptsov I.O. Improving the technology of additive formation of photopolymer resins

Master's thesis in specialty 161 - "Chemical Technology and Engineering" Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv 2021.

The master's thesis is devoted to the improvement of the technology of additive formation of photopolymer resins on SLA 3d printer. The recipe composition of photopolymer resin for additive molding has been developed. With the help of installations for the study of physical and mechanical properties of products, the optimal technological parameters of printing and conditions of post-processing of products are selected.

The influence of ultraviolet illumination on the physical and mechanical properties of products has been studied. A composition based on a photopolymer resin with polyamide as a filler to improve the physical and mechanical properties has been developed.

The possibility of printing with highly filled composites based on photopolymer resin was investigated. The recipe composition of highly filled photopolymer resin for additive molding has been developed.

The work presented on 92 pages, contains 8 tables, 27 figures.

Key words: photopolymer, additive production, physical and mechanical properties, polymer composites.

Перелік скорочень

- SLS – (Stereolithography) лазерна стереолітографія
- FFF – (Fused Filament Fabrication) виготовлення плавленням нитки
- FDM – (Fused Deposition Modeling) моделювання осадженням розплаву
- DLP – (Digital Light Processing) цифрова обробка світлом
- CAD(САПР) – Засоби автоматизованого тривимірного проектування
- STL (StereoLithography) – спеціальний формат файлу, який використовується у сфері прототипування, а саме у стереолітографії.
- Супорт – елементи підтримки нависаючих елементів моделі для 3D друку

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 Літературний огляд в галузі адитивного формування	13
1.1. Загальні відомості про технології адитивного виробництва.....	13
1.1.1. Моделювання осадженням розплаву (FDM).....	17
1.1.2. Стереолітографія (SLA).....	19
1.1.3. Селективне лазерне спікання та плавлення (SLS / M)	24
1.1.4. Цифрова обробка світлом (DLP)	25
1.2. Класифікація матеріалів для SLA 3D друку.....	28
1.2.1. Базові фотополімери для SLA	29
1.2.2. Інженерні фотополімери SLA.....	29
1.2.3. Порівняння фотополімерів для певних завдань.....	32
1.2.4. Особливості процесу полімеризації	34
1.3. 3D-моделювання та калібровка принтерів для 3D-друку	40
1.4. Вплив 3D друку на промисловість світу та 3D революція	43
1.5. Висновок до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2 Об'єкти та методи досліджень.....	48
2.1. Об'єкти дослідження	48
2.1.1. Властивості фотополімерної смоли	48
2.2. Методи досліджень.....	50
2.2.1. Метод випробування на розтяг та відносне видовження	50
2.2.2. Метод визначення твердості за Шором.....	51
2.2.3. Метод визначення ударної в'язкості Шарпі	51
2.2.4. Метод випробування на статичний вигин.....	53
2.2.5. Визначення густини.....	57
РОЗДІЛ 3 Технологічно-експериментальний розділ	59
3.1. Адитивне формування методом лазерної стереолітографії (SLA)	59

3.2. Технологічна схема процесу адитивного виробництва	60
3.3.1 Пост-затвердіння виробів з фотополімерної смоли	62
3.4. Процес 3D друку	63
3.4.1. Розробка 3D моделі.....	63
3.4.1. Підготовка 3D моделі до 3D друку	64
3.4.2. Підготовка 3D принтеру та фотополімерної смоли	69
3.4.3. Проблеми 3D друку SLA та їх вирішення.....	70
3.5. Розробка композитної суміші	72
3.6. Отримані вироби	72
3.7. Аналіз отриманих даних.....	73
3.8. Висновки до розділу 3	79
РОЗДІЛ 4 Техніка безпеки та охорона праці в адитивному виробництві методом SLA	80
Розділ 4.1. Стандарти та інструкції виробника.....	81
Розділ 4.2. Кроки із забезпечення безпеки	81
Розділ 4.3. Пожежна безпека.....	83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86

ВСТУП

Адитивні технології або технології пошарового синтезу, 3D-друк — сьогодні один із найбільш динамічних напрямів “цифрового” виробництва. За динамікою розвитку ринок адитивних технологій випереджає інші галузі виробництва. 3D-друк здатний здійснити революцію в багатьох сферах життя, задовольняючи все більше зростаючі потреби людства, а також здійснити заощадження в земних ресурсах. Популярність адитивних технологій стрімко зростає у 21-му столітті за рахунок можливості, котру ще багато людей вважають дивом, отримувати у відносно короткий проміжок часу дуже корисні унікальні вироби як для дизайну так і для технологічних потреб. Користь цієї технології необширна, можливо створення як звичайних фігурок, які є в уяві людини, так і складних механізмів, протезів, імплантів, які можуть покращити, чи навіть врятувати життя людини.

3D друк здатний здійснити виготовлення складних форм за допомогою 3D моделей від ледь помітних розмірів, мікроскопічних об’єктів до величезних структур, наприклад ракети, будинки, автомобілі.

Насьогодні 3D друк застосовується у наступних сферах виробництва:

- Прототипування;
- Виготовлення функціональних компонентів;
- Дрібносерійне виробництво;
- Макетування;
- Створення медичних моделей;
- Дизайн;
- Архітектурне макетування;
- Сувенірна продукція;

- Косплей;
- Авто тюнінг.
- Виробництво протезів та імплантатів в медицині;
- Домашнє використання виготовлення різноманітних побутових виробів;
- Виготовлення двигунів для космічних ракет;
- Виробництво іграшок та сувенірної продукції
- 3D біодрук
- Виготовлення зброї

Хоча на початку становлення 3D друку доступні були лише полімерні матеріали, зараз перелік матеріалів для друку весь час збільшується і вже не обмежується лише ними.

Ось перелік доступних на даний момент матеріалів для адитивного формування:

- Спеціальний філамент з термопластичних полімерів ABS, PLA, PET-G;
- Фотополімери;
- Порошки полімерів;
- Порошки металів;
- Глина;
- Біологічні клітини;
- Шоколад;

Слід зазначати, що існує багато різних технологій адитивного формування. Всі вони мають свої переваги та недоліки, а також доступні матеріали для друку. При виборі технології слід відштовхуватись від поставлених вимог, чи то велика точність та деталізація, чи низька собі вартість друку, чи висока швидкість, або фізико-механічні показники готового виробу.

Існують такі технології адитивного формування:

- Fused filament fabrication (FFF) – пошарове нанесення розплаву;
- Polyjet – струйний 3D друк
- Stereolithography (SL) стеріолітографія

Сьогодні найпоширеніша є технологія FFF. Це одна з найбільш поширених і простих технологій 3D друку. Саме FDM 3D принтери є найбільш бюджетними і доступними у всіх планах. Більш того, такі прилади деякі умільці збирають самостійно. У певному роді такий «кустарний» 3D друк FDM цілком успішний, але не зрівняний з печаткою на спеціалізованому обладнанні.

Метод друку SLA (Лазерна стереолітографія) - друга за популярністю технологія 3D-друку, яка широко використовується як в промислових, так і в настільних 3D принтерах. SLA 3D друк – це синонім відмінної якості, високої деталізації і гладкої поверхні створюваних виробів. Такий 3D друк є найкращим вибором для ювелірів, медицини, інженерів, створення функціональних прототипів і готових виробів, скульптинга і т.д.

Дана робота присвячена дослідженню та удосконаленню процесу отримання виробів за допомогою SLA 3D друку. Викладено методи та режими друку, приклади сумішей ПВХ пластизолу. Показано та описано необхідне обладнання та програмне забезпечення. Приведені приклади отриманих виробів, проаналізовано результати та описані висновки.

Розроблена технологія перспективна в отриманні адитивно сформованих виробів з полімерних композитів з високою ступеню наповнення (більше 10-20 відсотків). Рідкий пластизоль добре підходить для високого наповнення.

Метою роботи було дослідження та удосконалення доступної технології адитивного формування SLA для отримання функціональних виробів. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні **задачі**:

- дослідження фізико-механічних властивостей виробів;

- виявлення залежності фізико-механічних властивостей від параметрів 3D друку та постобробки виробів ;
- встановлення раціональних технологічних параметрів адитивного формування методом SLA.

Об’єкт дослідження: процес адитивного формування виробів методом SLA 3D друку з використанням фотополімерних смол.

Предмет дослідження: особливості впливу технологічних параметрів адитивного формування фотополімерними смолами на властивості готових виробів.

Наукова новизна: Досліджено особливості формування та властивості виробів, отриманих методом адитивного формування фотополімерних смол.

Практична новизна: Встановлено необхідні технічні параметри методу адитивного формування виробів з фотополімерних смол, що дозволяє отримувати функціональні вироби з високою деталізацією та оптимальними фізико-механічними властивостями. Досліджено композиційну суміш фотополімерної смоли з поліамідом-12, що забезпечує дуже високу жорсткість та гладку поверхню. Цей матеріал має високу стійкість до деформації з плином часу і відмінно підходить для друку функціональних деталей.

Методи наукових досліджень: Міцність при розриві та відносне видовження при розриві для всіх досліджуваних зразків визначали за ISO 527-2:2012. Модуль пружності при розтягу – за ISO 527-1: 2019, густину зразків - за PN-EN ISO 1183-1.

Апробація: Подано статтю до опублікування в фаховому виданні, участь у конференції з доповіддю та публікація тез.

РОЗДІЛ 1

Літературний огляд в галузі адитивного формування

1.1. Загальні відомості про технології адитивного виробництва

Процес 3D-друку виконується за наступними етапами:

1. Виконується 3D моделювання необхідного об'єкта за певними правилами;
2. Файл з цифровою моделлю завантажується в програму-слайсер, в якій генерується керуючий код для 3D принтера;
3. Встановлюються необхідні параметри 3D-друку;
4. Код записується на знімний носій пам'яті, який підключається до 3D принтеру;
5. 3D модель відтворюється.

Відтворення об'єктів відбувається поступово. За необхідної форми шар за шаром наноситься обраний матеріал, формуючи готовий виріб. Варто відзначити, що можливості 3D-друку практично безмежні, тобто виготовити можна все що завгодно. У деяких технологіях для дуже тонких нависаючих елементів передбачено наявність підтримок, завдяки яким можна уникнути їх провисання. [1].

3D-САПР, або засоби автоматизованого тривимірного проектування — це технології проектування та ведення технічної документації, завдяки яким на зміну кресленню вручну прийшли автоматичні процеси. Це програмне забезпечення, популярне серед архітекторів, інженерів та представників інших спеціальностей, дозволяє точно змоделювати та візуалізувати на комп'ютері будь-який тривимірний об'єкт за допомогою набору точок. [2]

3D моделі представлені в даній роботі були виконані за допомогою продуктів Autodesk. Компанія Autodesk пропонує безліч програм САПР з

підтримкою 3D для дослідження ідей, візуалізації концепцій та моделювання динаміки експлуатації об'єктів та конструкцій до початку виробництва.

Насьогодні існує дуже велика кількість програм-САПР, які класифікуються за складністю освоєння та напрямку виробництва. 3D-моделі, згенеровані за допомогою програм САД, містять інформацію про форму та розмір об'єкта, однак ці моделі не можуть бути інтерпретовані безпосередньо 3D-принтером (рис. 1.1).

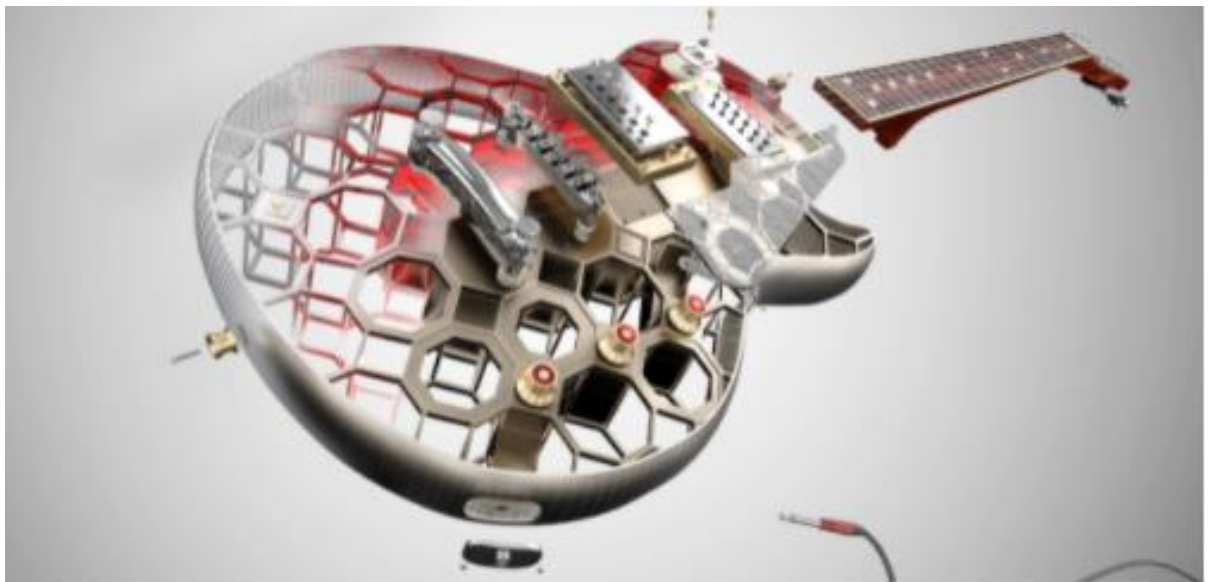


Рис. 1.1 Приклад 3D моделі в Autodesk, надрукована в КНУТД за технологією FDM 3D друку

В даний час найбільш часто використовуваним і фактично методом підготовки моделей САПР для 3D-друку є перетворення їх у стандартний файл тесселяційної мови (STL) [3].

STL (StereoLithography) – спеціальний формат файлу, який використовується у сфері прототипування, а саме у стереолітографії. Перекладається з англійської як «об'ємна літографія». У ньому міститься

інформація, що застосовується у створенні різних деталей. Є два варіанти збереження інформації:

- двійковий код (бінарний);
- Текстова форма.

У першому випадку забезпечується швидкодія системи, документ займає більше простору [4].

Можливість створення тривимірних моделей полягає в застосуванні послідовностей кількох трикутників. Майже у всіх відомих 3D CAD-системах є опис поверхнями високого порядку. Об'єкт у процесі триангуляції поділяється на невеликі фігури, які називають фасетами. Кожен з них описаний чотирма наборами даних:

- X, Y, Z – це координати вершин;
- вектор – служить описом орієнтування фасета і свідчить про зовнішню сторону.

Перш ніж відкрити STL файл 3d моделі, потрібно вибрати програму. Їх існує кілька, що дозволяє вибрати оптимальний варіант для користувача. У цій роботі досліджено формат файлу та його особливості. Розглянемо кілька варіантів його відкриття.

Всі 3D-принтери супроводжуються програмами для слайсингу (нарізка). У таких програмах модель ріжеться за шарами. Кожен шар складається з периметра та/або заливки. Модель може мати різний відсоток заповнення заливкою, а також заливки може і не бути (пустотіла модель) (рис. 1.2) [5].

На кожному шарі відбуваються переміщення осями X, Y з нанесенням розплаву пластику. Після друку одного шару відбувається переміщення осі Z на шар вище, друкується наступний шар і так далі.

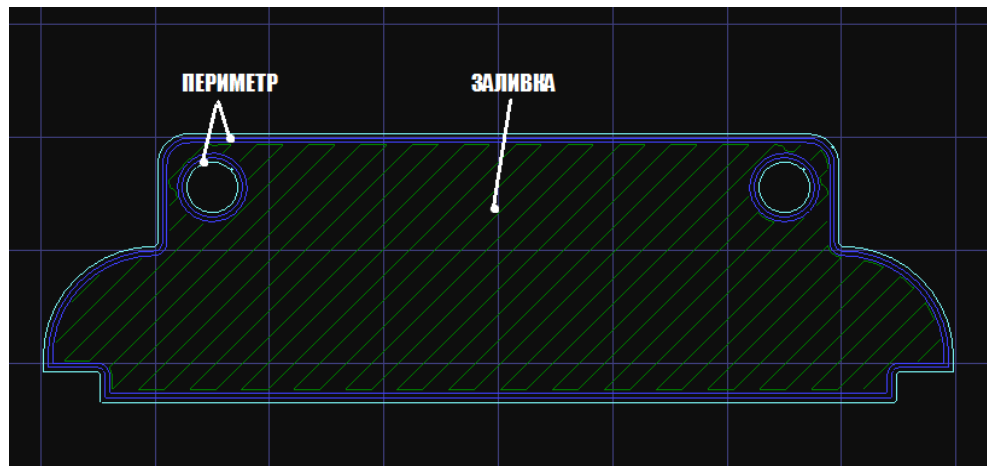


Рис.1.2 Позначення периметру та заливки на одному з шарів у слайсері

За 30 років з моменту виникнення 3D-друку були розроблені такі технології 3D-друку[6]:

- Моделювання методом наплавлення (Fused Deposition Modeling, FDM)
- Стереолітографія (Laser Stereolithography, SLA)
- Селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS)
- Селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting, SLM)
- Цифрова світлодіодна проекція (Digital Light Processing, DLP)
- Пряме лазерне спікання металу (Direct Metal Laser Sintering, DMLS)
- Вибіркове теплове спікання (Selective Heat Sintering, SHS)
- Виготовлення об'єктів за допомогою ламінування (Laminated Object Manufacturing, LOM)
- Метод багатоструеневого моделювання (Multi Jet Modeling, MJM)
- Електронно-променева плавка (Electron-beam Melting, EBM)
- Кольорова струменевий друк (Color Jet Printing, CJP)

Для стислості тут ми зосередимо більше уваги на техніках 3D друку, які широко застосовуються в галузі хімічної науки та були досліджені в даній роботі, це – FDM, SL, SLS, та DLP.

1.1.1. Моделювання осадженням розплаву (FDM)

FDM у 3D-друку – це технологія, в якій екструзійне сопло переміщається над будівельною платформою по всіх трьох осях, як горизонтально, так і вертикально. Для створення виробів використовуються термопластичні матеріали, що нагріваються до точки плавлення та видавлюються через сопло. Таким чином, шар за шаром створюється тривимірний об'єкт (рис. 1.3)[7].

Використання технології FDM у 3D-друку набуло популярності, тому що вона дозволяє створювати деталізовані та складні об'єкти. Наприклад, інженери використовують її, щоб створювати прототипи деталей та перевіряти їх на предмет відповідності розмірів або інших варіантів підгонки. Також 3D-друк методом FDM дозволяє створювати деталі швидше ніж будь-який інший традиційний метод.

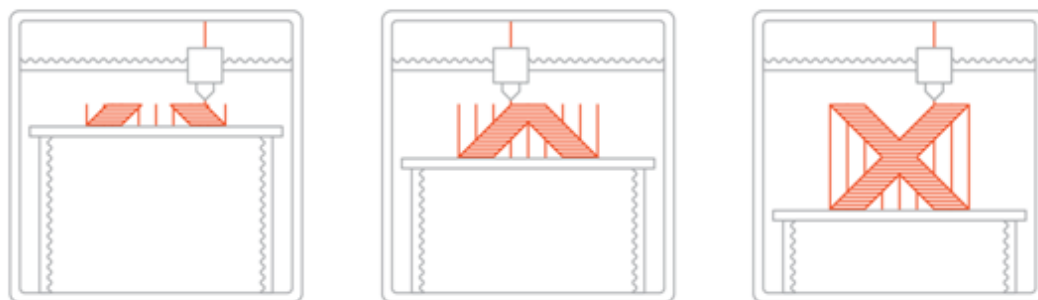


Рис. 1.3. Схема процесу FDM 3D друку

Як і у всіх технологіях 3D-друку, у FDM використовуються 3D-моделі, які завантажуються на 3D-принтер. Для виготовлення виробів використовуються

велике різноманіття полімерних матеріалів. Це катушки із пластиковою «ниткою», яка подається через сопло. У соплі нитка розплавляється і подається на робочу поверхню або «стіл». Керуюча електроніка працює, щоб перевести розміри об'єкта з 3D-моделі в координати по осях X, Y, Z. За цими координатами рухається сопло, через яке видавлюється пластик[8]. Таким чином, виріб наплавляється за шаром, знизу вгору. Поки сопло переміщається, пластик охолоджується і твердне, утворюючи міцний зв'язок із попереднім шаром. Також для додаткового охолодження матеріалу можуть застосовуватись вентилятори, прикріплені безпосередньо до екструдера. Іноді створення одного шару потрібно кілька проходів сопла. Закінчивши шар, сопло піднімається, щоб укласти наступний шар пластику. 3D-друк дуже ефективний і швидкий, хоча на створення великих і складних деталей все одно потрібно достатньо часу. Хоча це все одно набагато менше, ніж у традиційних технологіях[9].

Така технологія створення виробів використовується у багатьох галузях, включаючи автомобільну промисловість та виробників товарів народного споживання. FDM використовується як для розробки продуктів та прототипування, так і безпосередньо у виробничому процесі.

Наприклад, перед тим, як продукт надійде на масовий ринок, важливо його ретельно протестувати. І використання термопластичних матеріалів, які застосовуються в 3D-друку, ідеально підходить для створення прототипів. Наприклад, залежно від полімеру, вироби можуть витримувати нагрівання, вплив хімічних речовин та механічні навантаження. Також можливість створювати дуже деталізовані об'єкти дозволяє використовувати технологію у тих сферах промисловості, де потрібно створювати деталі з ретельною перевіркою на відповідність та точною формою[10].

1.1.2. Стереолітографія (SLA)

Стереолітографія широко визнана як перший процес 3D-друку. Це перший етап, який мав стати комерційним.

3D-друк SLA це процес на основі лазерної технології з використанням фотополімерних смол. Фотополімери вступають у реакцію затвердіння під впливом лазера, пошарово формуючи високоточні деталі (рис. 1.4)[11].

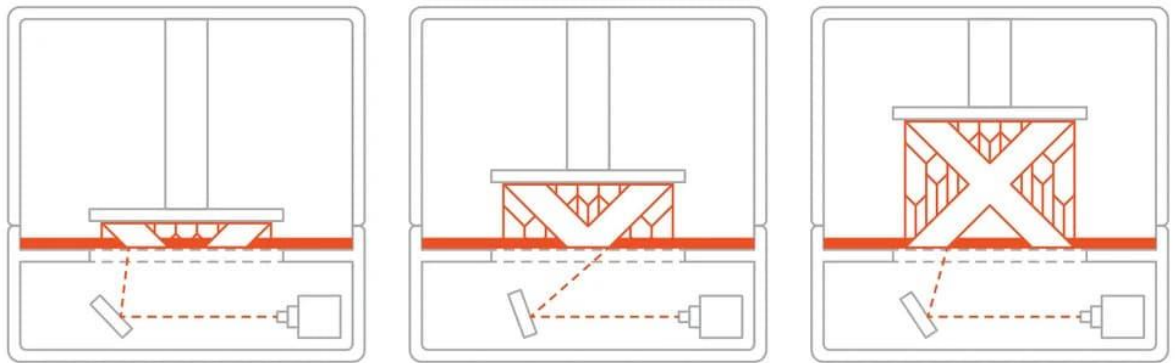


Рис. 1.4. Схема процесу SL 3D друку (стерелітографія)

На схемі фотополімерна смола утримується у ванні з рухомою платформою усередині. Лазерний промінь подається в напрямку осей X-Y вздовж поверхні смоли відповідно до даних .stl-файлу. Смола твердне саме в тому місці, де відбувається вплив лазера на поверхню. Завершивши шар, платформа всередині ванни опускається на частини міліметра (по осі Z) і лазер промальовує наступний шар. Процес триває, доки не буде завершено весь об'єкт. Потім платформа може бути піднята з ванни та видалена.

Об'єкти 3D-друку за технологією SL повинні затвердіти після закінчення друку. Для цього на деталь впливають інтенсивним світлом. Процес відбувається у спеціальному апараті, схожому на піч.

Стереолітографія як метод 3D друку відрізняється також високою швидкістю побудови і широким вибором розмірів робочої області. Відсутність механічних частин дозволяє випускати як недорогі моделі 3D принтерів з камерою об'ємом не більше літра, так і великі пристрої з робочою областю, розміри якої досягають метра і більше по кожному виміру[12].

Незважаючи на те, що смола для принтерів SLA коштує недешево, цей спосіб 3D друку є одним з найекономічніших, оскільки технологія практично безвідходна - незначна кількість полімеру витрачається на елементи підтримки, решта ж невикористаної смоли не втрачає своїх властивостей і годиться для наступних циклів друку. без жодних обмежень.

Стереолітографія вважається одним із найточніших процесів 3D-друку з чудовою якістю поверхні. Однак цей процес має низку обмежень:

- після друку необхідна додаткова обробка виробу;
- з часом деталь стає крихкою.

Right-Side Up SLA

Ці 3D-принтери SLA побудовані навколо великого резервуара з рідким фотополімером (смолою) та платформи. УФ-лазер фокусується на поверхні смоли, відстежуючи поперечний переріз 3D-моделі. Потім будівельна платформа опускається на відстань, що дорівнює товщині одного шару, і свіпер проходить по ванні, щоб покрити її свіжим матеріалом. Процес будує послідовні шари поверх інших, доки деталь не буде закінчено (рис. 1.5)[13]. Цей підхід найчастіше зустрічається у великих промислових системах, і до появи настільних систем він був стандартним підходом до стереолітографії. Його переваги включають великий обсяг складання, низьке зусилля на деталях під час процесу друку і, в свою чергу, високу деталізацію і точність [14].

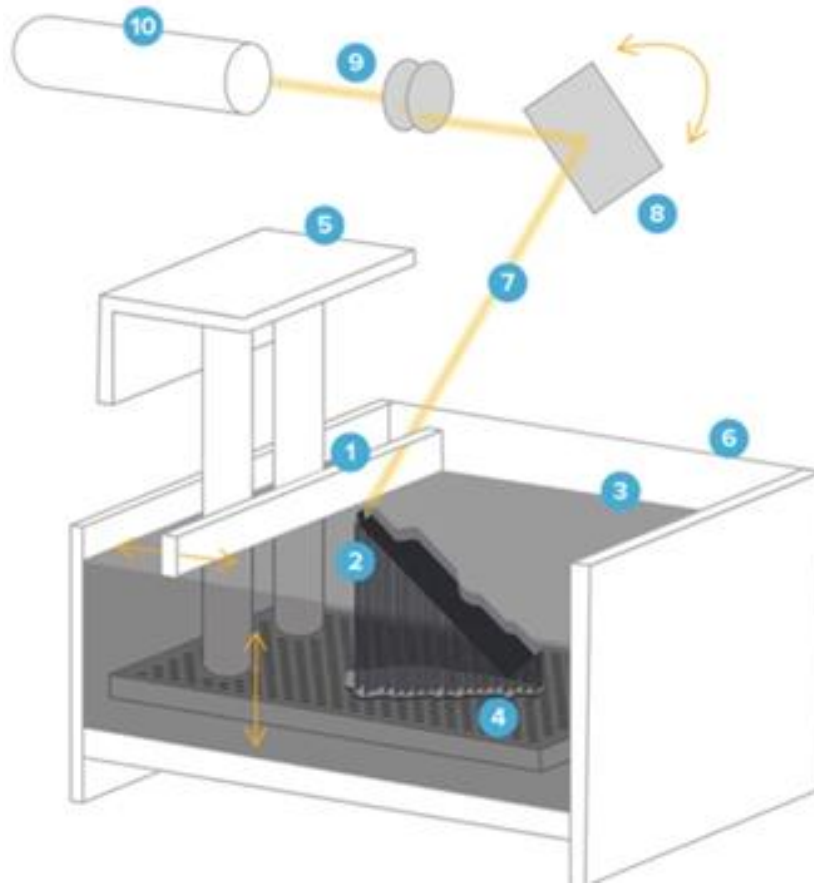


Рис. 1.5 Схема системи Right-Side Up SLA 3D друку. 1 – свіпер, 2 – надрукований виріб, 3 – фотополімерна смола, 4 – платформа, 5 – підйомник, 6 – ванна, 7 – лазерний промінь, 8 – дзеркало, 9 – лінзи, 10 – УФ лазер

Через великі налаштування, вимоги до технічного обслуговування та обсяг матеріалу стереолітографія Right-Side Up вимагає великих початкових інвестицій і є дорогою в експлуатації. Вся площа зборки має бути заповнена смолою, що може легко становити 10-100 літрів сировини, що робить трудомістким завдання обробки, обслуговування, фільтрації та заміни матеріалів. Ці машини дуже чутливі до стабільності та рівня, будь-яка неузгодженість може призвести до звалювання деталі, що призведе до збою друку.

Upside-Down (Inverted) SLA

Як випливає з назви, у Upside-Down стереолітографії процес перевернуть із ніг на голову (Рис. 1.6). У цьому методі використовується резервуар з прозорим дном та антипригарною поверхнею, який є підкладкою для затвердіння рідкої смоли, що дозволяє акуратно від'єднати знову сформовані шари. Платформа опускається в резервуар для смоли, залишаючи простір, що дорівнює висоті шару між платформою або останнім завершеним шаром і дном резервуара.

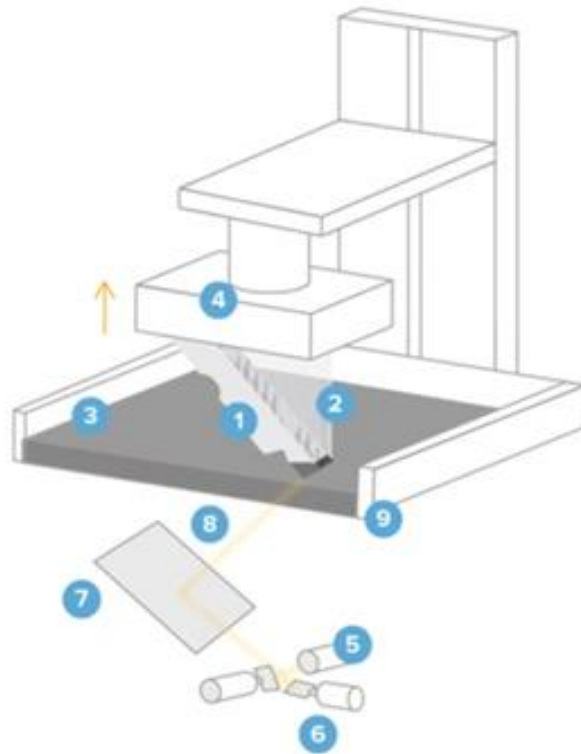


Рис. 1.6. Схема системи upside-down (Inverted) SLA. 1 – надрукована деталь, 2 – підтримка, 4 – платформа, 5 – УФ лазер, 6 – гальванометр, 7 – дзеркало, 8 – лазерний промінь, 9 – ванна.

Перевага цього перевернутого підходу полягає в тому, що обсяг зборки може суттєво перевищувати обсяг резервуара, оскільки машині потрібно лише достатньо матеріалу, щоб нижня частина збірного резервуара постійно була покрита рідиною. Це зазвичай спрощує обслуговування, очищення, заміну матеріалів, а також дозволяє значно зменшити розмір машини і знизити витрати, що дозволяє перенести SLA 3д-принтер на робочий стіл.

Тривимірний друк способом стереолітографії застосовується в тих же галузях і на тих самих підприємствах, що й інші методи адитивного виробництва. Немає жодного унікального застосування для цього обладнання [14]. Однак у кожній галузі бізнесу чи народного господарства можна виділити особливості, які однозначно виділяють цю технологію:

- Дослідницька робота. Точність і складність моделей потрібні майже скрізь, але в деяких випадках незамінною стає властивість моделей фотополімеру - прозорість стінок. Якщо Ваші дослідження пов'язані з рідинами або газами, Ви отримаєте можливість спостерігати за гідродинамічними потоками всередині експериментального виробу.
- Лиття складних деталей. Існують полімери, які під впливом високих температур згорають без залишку, не залишаючи золи. Завдячуючи цьому, надруковані на SLA принтері деталі можна використовувати для лиття з випалюванням - модель заливають формувальною сумішшю, потім нагрівають до 800-1000 градусів, полімер повністю вигоріє, а на його місце заливають метал.
- Ювелірна справа. Висока точність та якість поверхні дають можливість моделювати найдрібніші деталі майбутньої прикраси. Міцність та можливість фарбувати модель, надруковану на принтері SLA, дозволяють виготовляти точні копії існуючих або перспективних ювелірних виробів.

1.1.3. Селективне лазерне спікання та плавлення (SLS / M)

Найправильніша назва цієї методики – вибіркве лазерне спікання (від англ. Selective Laser Sintering, SLS). Це одна з методик 3D друку, що широко застосовується в промисловості. Селективне лазерне спікання доступне виключно на дорогих професійних 3D принтерах та відрізняється високою якістю виробів. З її допомогою можна досягти результату, наближеного до відтворення виробів шляхом лиття під тиском. SLS не може похвалитися великою різноманітністю кольорових витратних матеріалів, як FDM або SLA. Проте це означає, що вибір обмежений. Справа в тому, що SLS друк орієнтована на промислові цілі, за рахунок чого матеріали виробляються відповідні. На сьогоднішній день доступно безліч видів різноманітних порошкових сумішей, серед яких нейлон, кераміка, полістирол тощо. Металеві порошки доступні на сьогодні – сталь, алюміній, титан, кобальт та різноманітні суміші сплавів. Багато виробників наголошують на специфічні властивості композитів. Так, для SLS друку доступні ударостійкі, зносостійкі, жаростійкі, гнучкі, інженерні та термостійкі порошки (рис. 1.7). Деякі їх орієнтовані більш конкретні завдання – наприклад, виготовлення деталей для аерокосмічного виробництва [15].



Рис. 1.7. Вироби з поліаміду отримані методом лазерного спікання та плавлення (SLS)

Щодо особливостей, слід відразу відокремити селективне лазерне спікання від іншої схожої технології 3D друку – селективного лазерного плавлення (SLM). Різниця між ними в тому, що SLS забезпечує лише часткове плавлення порошку, необхідне лише його об'єднання в єдиний елемент. SLM ж плавить частинки повністю, спекаючи порошок у монолітний виріб. Щодо переваг, виділити можна наступні плюси:

- Велика область побудови у 3D принтерах. Промислове обладнання для SLS 3D друку зазвичай обладнане великою областю побудови, що дозволяє створювати як великі деталі, а й виконувати дрібносерійне виробництво;
- Висока якість друку 3D. Ця методика дозволяє практично повністю уникнути видимої пошаровості на моделі, а відсутність підтримок також сприятливо позначається на якості виробів;
- Відсутність потреби у побудові підтримок. Селективне лазерне спікання дозволяє створювати вироби складної геометрії без необхідності побудови структур, що підтримують. Це не тільки розширює можливості друку, але й добре впливає на якість поверхні виробу;
- Висока швидкість та продуктивність. За рахунок того, що матеріал не плавиться повністю, SLS 3D принтери працюють набагато швидше за інших своїх порошкових побратимів. Вище швидкість друку – вища продуктивність виробництва;
- Можливість виготовлення готових виробів. Завдяки властивостям витратних матеріалів цю технологію 3D друку цілком реально використовувати для виробництва кінцевих продуктів.

1.1.4. Цифрова обробка світлом (DLP)

DLP 3D друк- це одна з методик адитивного виробництва, в якій для побудови об'єктів використовуються рідкі фотополімерні смоли, які тверднуть

під впливом світлових хвиль. Принцип роботи DLP 3D принтерів дуже схожий на метод друку SLA. Однак затвердіння об'єкта під час DLP друку відбувається під впливом іншого джерела світла [16].

В цілому DLP 3D друк можна охарактеризувати як прямий аналог 3D друку SLA, який в деяких аспектах навіть перевершує його. Наприклад, швидкість друку в DLP 3D принтерах на порядок вище, ніж в SLA пристроях. А різниця в точності відтворення варіюється в залежності від конкретного обладнання та витратних матеріалів, і в основному невелика. Тепер перейдемо до технологічних консультацій і розповімо про принцип роботи технології DLP.

Як і у всіх технологіях 3D друку, першим кроком на шляху до виготовлення фізичного об'єкта є побудова його цифрової 3D моделі. Готова 3D модель завантажується в програму-слайсер, Призначену для виставлення налаштувань друку і «розрізання» моделі на шари. На цьому етапі також генеруються підтримки під нависаючими елементами об'єкта. Отримані налаштування зберігаються, модель конвертується в керуючий код для 3D принтера. Тепер можна приступати до друку [17].

Відмінності DLP і SLA технологій і принцип роботи принтерів DLP: Замість лазерної установки (як в SLA) DLP 3D друк працює зі спеціальним проектором в якості джерела світла. Ця методика не нова: такі DLP проектори ви можете зустріти і в інших, більш поширених пристроях, наприклад, в телевизорах. Тут же вони застосовуються для затвердіння рідких витратних матеріалів - фотополімерних смол

Як і в SLA друку, існує два варіанти пристроїв для DLP 3D друку:

- побудова об'єкта відбувається знизу-вгору (робоча платформа опускається), такий принтер був застосований у даній роботі
- побудова об'єкта відбувається згору-вниз (робоча платформа піднімається)

Зворотній DLP 3D друк. Спеціальна ємність 3D принтера заповнюється фотополімерною смолою до певного рівня. Платформа побудови опускається в ємність так, щоб зазор між нею і дном дорівнював висоті одного шару. Під ємністю розташований DLP проектор. На платформу проектується світло, відповідний перетину першого шару моделі. Після його затвердіння платформа піднімається вгору і починається засвічення другого шару (рис. 1.8)[18].

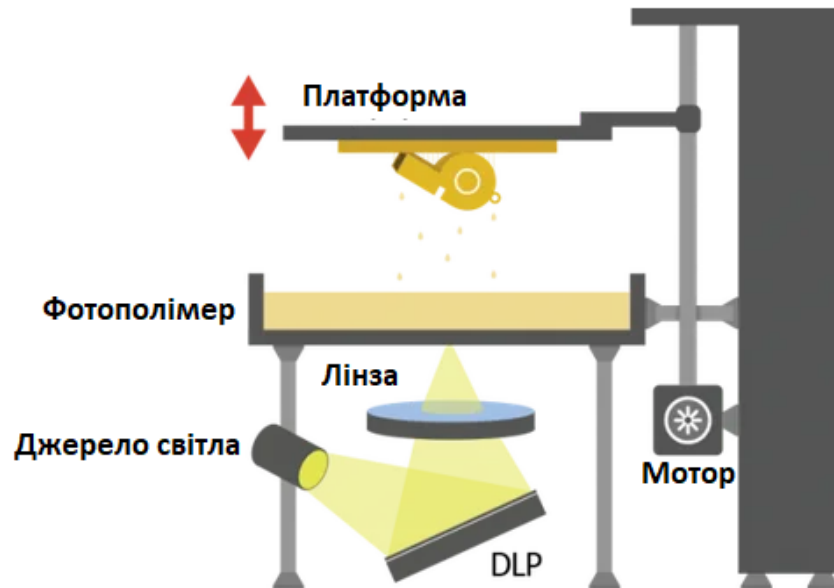


Рис. 1.8. Схема зворотнього DLP 3D друку

Так, крок за кроком і створюється фізичний об'єкт. По завершенню друку платформа піднімається вище рівня фотополімера, виріб витягується і очищується від залишків витратних матеріалів. Після цього необхідно виконати фінальне засвічення в УФ-лампі для повного затвердіння матеріалу.

Прямий DLP 3D друк. На відміну від зворотного друку, DLP проектор тут розташований зверху, над ємністю з фотополімером. При цьому робоча платформа знаходиться у ній. Для побудови першої кулі платформа піднімається вгору так, щоб зазор між нею і поверхнею витратного матеріалу відповідав висоті першої кулі (рис. 1.9).

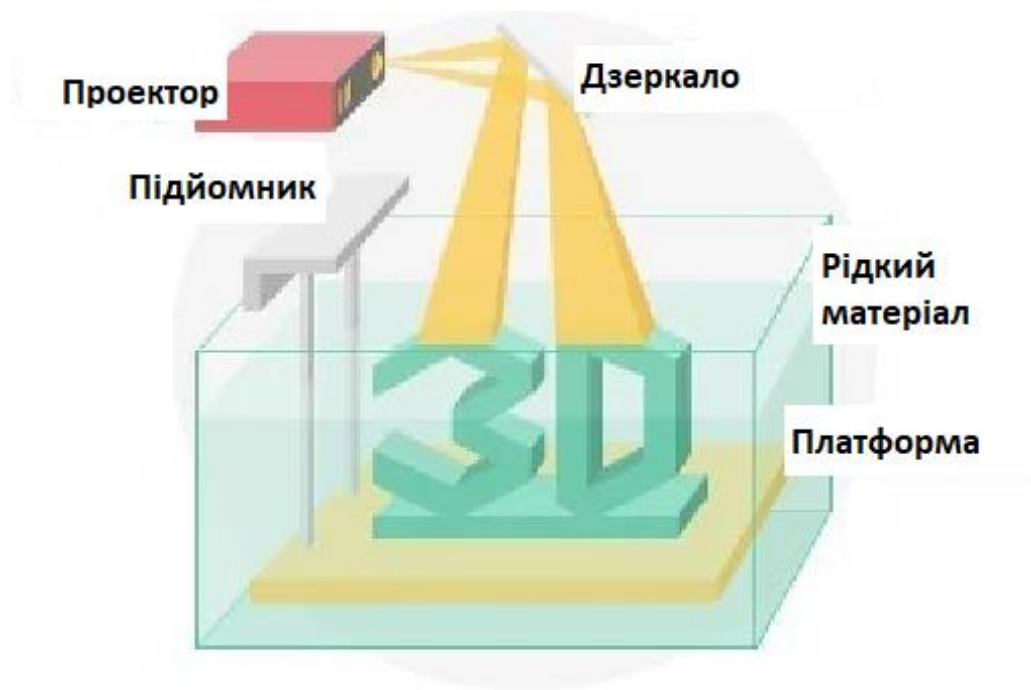


Рис. 1.9. Схема прямого DLP 3D друку

Перетин першого шару проектується на платформу, фотополімер твердне, після чого платформа опускається вниз на висоту одного шару. Ці кроки повторюються аж до повної побудови виробу. Подальші дії ідентичні описаним в попередньому пункті: об'єкт витягується, очищається від витратного матеріалу і піддається додатковому засвіченню.

1.2. Класифікація матеріалів для SLA 3D друку

Різні комбінації полімерів та інших добавок, що входять до складу смоли, дозволяють отримати різні властивості матеріалу.

Є основні переваги та обмеження, які є спільними для всіх смол у SLA 3D друку.

Переваги:

- Гладка поверхня. Відсутність шорсткості.
- Висока якість друку 3D. Максимальна деталізація на об'єкті.

Недоліки:

- Крихкість конструкцій

Колір смоли також впливає на його властивості. Наприклад, сіра смола підходить для моделей з дрібними деталями, а біла смола - для деталей, які вимагають максимально гладкої поверхні.

1.2.1. Базові фотополімери для SLA

1. Стандартна фотополімерна смола – Standard

Зі стандартних смол виходять деталі з високою жорсткістю, деталізацією та гладкою поверхнею. Низька вартість смол від 250 \$ за 1 літр робить їх ідеальними для прототипів.

Переваги використання смол класу Standard:

- Висока деталізація
- Гладка поверхня
- найдешевший матеріал для SLA
- Без необхідності у фінальній полімеризації

Мінуси Standard:

- Крихкість деталей
- Деформуються під дією температур
- Не мають спеціальних властивостей

1.2.2. Інженерні фотополімери SLA

Інженерні смоли мають цілу низку властивостей ливарних пластмас. Всі інженерні смоли вимагають додаткового затвердіння ультрафіолетом, для досягнення їх максимальних властивостей [20].

1. Фотополімерна смола – Tough

Tough смола призначена для моделей, які повинні витримувати високі.

З даного матеріалу виходять міцні, стійкі до руйнування деталі і функціональні прототипи, такі як корпус з'єднаннями, що замикаються.

Переваги:

- Висока міцність деталей

Недоліки:

- Не підходить для деталей із тонкими стінками (рекомендована мінімальна товщина стінок від 1 мм)
- Нестійкий до високих температур
- Підходить для: функціональних прототипів, деталей механічних вузлів

2. Міцна фотополімерна смола – Durable Resin

Durable Resin смола є зносостійким і гнучким матеріалом з механічними властивостями, аналогічними поліпропілену.

Durable Resin підходить для:

- Втулок та підшипників;
- Різних функціональних з'єднань

Переваги:

- Висока зносостійкість
- Гнучкість
- Висока ударостійкість

Недоліки:

- Не підходить для деталей із тонкими стінками (рекомендована мінімальна товщина стінок 1 мм)
- Низька температура теплової деформації
- Низька межа міцності на вигин (нижче ніж у жорсткої смоли)

3. Тугоплавка фотополімерна смола - High Temp Resin від Formlabs

Термостійка смола ідеально підходить для деталей, які потребують високої термостійкості та працюють при високих температурах.

Formlabs High Temp Resin забезпечує найвищу температуру плавлення (HDT): 238 ° C за 0,45 МПа.

Смолу слід використовувати для друку деталізованих точних прототипів з високою термостійкістю.

Переваги:

- Витримує температуру до 238 ° C (проти 80 ° C для стандартних смол)
- Гладка поверхня

Недоліки:

- Не підходить для деталей із тонкими стінками (рекомендована мінімальна товщина стінок 1 мм)

4. Гумоподібна фотополімерна смола - Flexible Resin

Гумоподібна смола дозволяє виготовляти гнучкі деталі. Цей матеріал має низький поріг пружності при розтягуванні та високе подовження при розриві, і він добре підходить для деталей, які будуть зігнуті або стиснуті [20].

Її також можна використовувати для додавання ергономічних функцій у збірки з декількох матеріалів, таких як: штампи, прототипи, що носяться, ручки, накладки та захвати.

Переваги:

- Висока гнучкість (високе подовження при розриві)
- Низька твердість (імітує гуму 80А за дюрOMETром)
- Висока ударостійкість

Недоліки:

- Не має всіх властивостей справжньої гуми

- Вимагає великих структур підтримки
- Властивості матеріалу з часом погіршуються, оскільки деталь піддається впливу ультрафіолетового випромінювання (сонячного світла)
- Не підходить для деталей із тонкими стінками (рекомендована мінімальна товщина стінок 1 мм)

1.2.3. Порівняння фотополімерів для певних завдань

Стандартна смола (Standard) має високу міцність на розтяг, але дуже тендітна (дуже низьке подовження при розриві), тому вона не підходить для функціональних деталей. Здатність створювати хорошу поверхню деталі робить його ідеальним для візуальних прототипів та художніх моделей.

Міцна (Durable) смола має найвищу ударну в'язкість і подовження при розриві в порівнянні з іншими матеріалами SLA. Найкраще підходить для прототипування деталей з рухомими елементами та клямками. Їй не вистачає, міцності термопластичних матеріалів [21].

Жорстка (Tough) смола є компромісом між властивостями матеріалу міцної та стандартної смоли. У неї висока межа міцності при розтягуванні, тому вона найкраще підходить для жорстких деталей, які вимагають високої твердості.

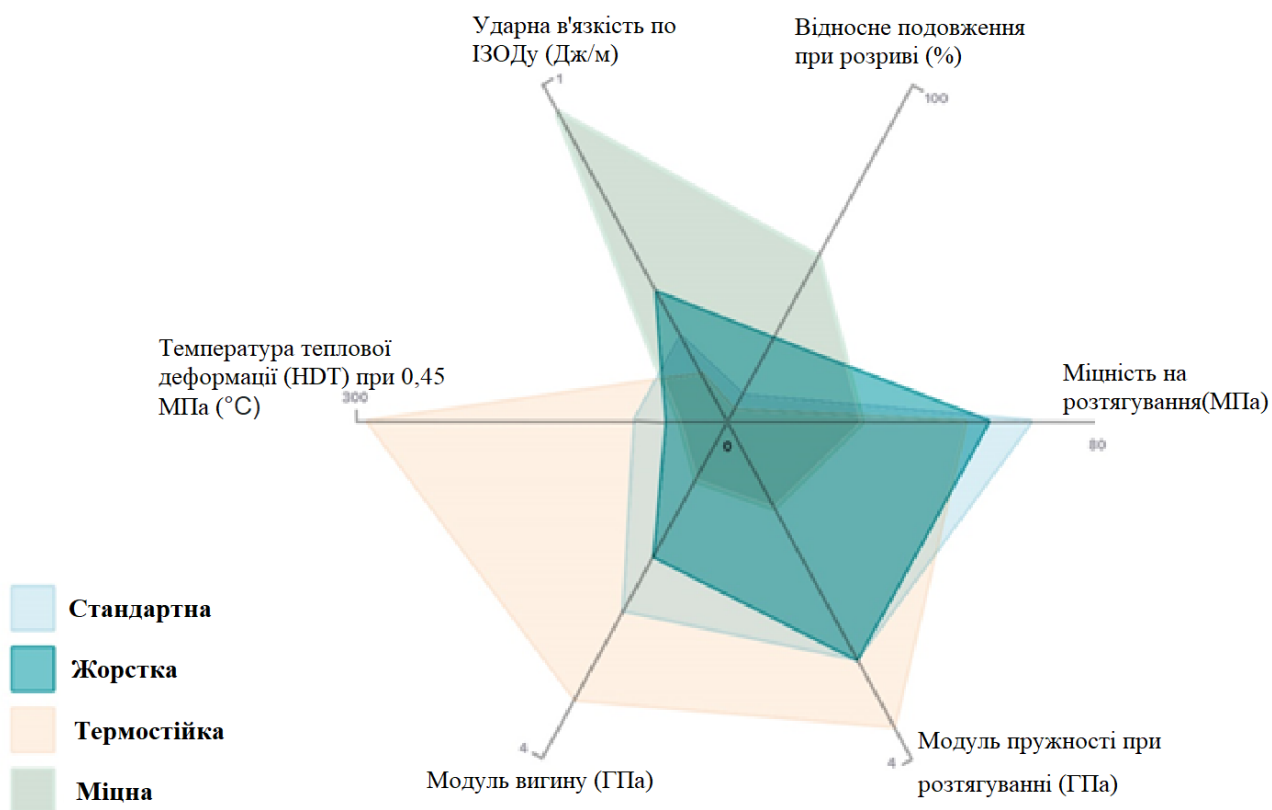
Термостійка смола (Heat Resistant) може витримувати температуру вище 200 °C, але має погану ударну в'язкість і є навіть більш крихкою, ніж стандартна смола. В таблиці 1.1 наведено порівняння фізико-механічних властивостей доступних на ринку фотополімерних смол.

Основні механічні властивості фотополімерів для SLA

	Стандарт на	Жорстка	Міцна	Термостійка	Керамічна
Ударна в'язкість по ІЗОДу (Дж/м)	25	38	109	14	45
Відносне подовження при розриві (%)	6,2	24	49	2,0	5,6
Міцність на розтягування(МПа)	65,0	55,7	31,8	51,1	75,2
Модуль пружності при розтягуванні (ГПа)	2,80	2,80	1,26	3,60	4,10
Модуль вигину (ГПа)	2,2	1,6	0,82	3,3	3,7
Температура теплової деформації (HDT) при 0,45 МПа (°C)	73	48	43	289	88

На діаграмі (Графік 1.1) відображено порівняння властивостей матеріалів різних технічних смол на основі даних з таблиці.

Порівняльна діаграма властивостей матеріалів різних технічних смол.



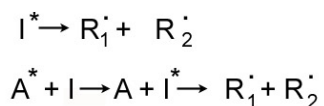
1.2.4 Особливості процесу полімеризації

Фотополімеризація - створення полімерів під дією світла, головним чином УФ випромінюванням. Здійснюється в газовій, рідкій і твердій фазах. До фотополімеризації відносять усі фотохімічні процеси отримання полімерів незалежно від їх механізму - ланцюгового (полімеризаційного) або ступеневої (поліконденсаційного). У першому випадку світло служить тільки для ініціювання реакції, яка далі розвивається як звичайна полімеризація. У другому випадку кожен акт зростання ланцюга вимагає поглинання кванта світла [35].

Радикальна полімеризація - це процес утворення полімеру, коли стадії ініціювання та зростання ланцюга протікають за участю радикалів. Оскільки одним з основних способів отримання вільних радикалів є фотоініційована дисоціація, то відповідно фотоініційована полімеризація мономерів і олігомерів, або просто фотополімеризація, є однією з основних різновидів радикальної полімеризації як в виробничих технологіях, так і при проведенні наукових експериментів.

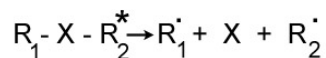
Кінетична схема процесу фотоініційованої радикальної полімеризації виглядає наступним чином. Спочатку відбувається процес поглинання світла молекулою фотоініціатора. Поглинута світлом молекула переходить в збуджений стан і далі відбувається процес розриву хімічного зв'язку. Руйнується як правило найслабша (або одна з найслабших) зв'язків в молекулі. Сполуки, що використовуються як фотоініціатори, дисоціюють на два радикала, або за рахунок внутрішньої молекулярної регрупіровки утворюється бірадикал - молекула, що має в різних частинах дві вільних валентності. У ряді випадків замість фотоініціатора використовуються спеціальні добавки - фотосенсибілізатори - які поглинають світло в даній області спектра. Збуджений барвник або передає поглинену енергію ініціатору, або взаємодіє з ним, утворюючи пару вільних радикалів (формула 3.1).

(3.1)



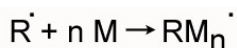
Також збуджена молекула фотоініціатора може продісоціювати на більшу ніж два число фрагментів, але тільки два з них будуть вільними радикалами, інші - нейтральні молекули невеликої як правило молекулярної маси (формула 3.2).

(3.2)



Утворені в результаті розпаду фотоініціатора радикали здатні приєднуватися до мономерів з подвійним зв'язком вуглець-вуглець (вінілові і акрилові мономері), розкриваючи цей зв'язок і утворюючи новий радикал з більшою молекулярною масою, який, в свою чергу, буде взаємодіяти з наступною молекулою мономера, формуючи полімерну молекулу з вільною валентністю на кінці. Якщо в якості мономера використовувати поліфункціональне з'єднання, що має в своєму складі більше одного ненасиченого зв'язку, то в процесі полімеризації буде формуватися не набір лінійних полімерних молекул, а єдина тривимірна зшита полімерна молекула з безліччю вільних валентностей (формула 3.3).

(3.3)



Вільний радикал може взаємодіяти з молекулою мономера і не розкриваючи подвійного зв'язку, а відриваючи атом водню - відбувається передача ланцюга на мономер (формула 3.4).

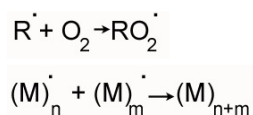
(3.4)



Обрив ланцюгової радикальної реакції відбувається або в разі, коли радикал рекомбінує з іншим радикалом, або коли радикал взаємодіє з інгібітором радикальної полімеризації. В останньому випадку утворюється радикал з дуже низькою реакційною здатністю. Класичним інгібітором є кисень, що проникає з атмосфери в реакційну суміш, якщо не проводити процедуру дегазації суміші

перед початком процесу. Взаємодіючи з киснем, активні радикали створюють стабільні і малоактивні пероксирадикалами. Так само ланцюгова радикальна реакція полімеризації припиняється, коли радикал виявляється ізольованим в матриці полімерної сітки. Однак в цьому випадку можлива «міграція» вільної валентності по полімерного ланцюга за рахунок ряду внутрішньо молекулярних перегрупіровок. Але такий процес протікає не швидко і як правило, після завершення опромінення (формула 3.5).

(3.5)

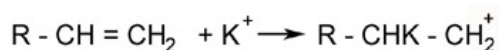


Катіонна полімеризація представляє з себе різновид іонної полімеризації, яка має на увазі, що ланцюгова реакція ініціюється взаємодією іона з реакціоноздатною групою в мономері або олігомери. Залежно від типу іона виділяють аніонну і, власне, катіонну полімеризації. Більш дослідженими і більш широко використовуваними фотоініціаторами є саме катіонні. Так як при фотодиссоціації відомих іонних ініціаторів утворюється активний катіон і малоактивний аніон, то під іонної фотополімеризацією мають на увазі як правило катіонну фотоініційовану полімеризацію. За катіонним механізмом можуть полімеризуватися вінілові і дієнові мономери і олігомери, акрилати та їх похідні, сполуки з гетероциклами. Полімеризація останніх протікає з розкриттям циклу в процесі отримання полімеру.

Кінетична схема процесу іонної полімеризації виглядає наступним чином. Перша стадія - взаємодія фотоініціатора з УФ випромінюванням. На цій стадії фотоініціатор I під дією поглиненого кванта світла утворює іонну пару K + A-. Ця іонна пара може залишитися в вигляді сполуки з іонним зв'язком, або продисоціювати на катіон і аніон. Зазвичай один з іонів перевершує інший по реакційноздатності, і навіть незважаючи на потенційну можливість присутнього

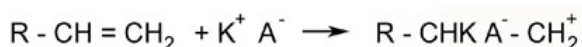
мономера або олігомера полімеризуватись як по аніонному, так і по катіонному механізмам, тільки один іон з пари ініціює ланцюговий процес. Механізм такого процесу для з'єднань, які містять, наприклад, винільну групу виглядає так (формула 3.6):

(3.6)



Утворений катіон взаємодіє з наступною молекулою мономера або олігомера і т.д. Якщо дисоціації іонної пари на аніон і катіон не відбувається, то реакція ініціювання ланцюга має такий вигляд (формула 3.7):

(3.7)



Обрив ланцюга рекомбінацією полімерного катіона з аніоном відбувається дуже рідко. Як правило, обрив ланцюга відбувається або шляхом передачі ланцюга на мономер з відщепленням атома водню і утворенням малоактивного катіона, або ланцюгова реакція припиняється тоді коли полімерна молекула втрачає рухливість і катіон виявляється просторово ізольованим в навколишньому полімерній матриці. Для випадку сполук, що мають у своїй структурі гетероцикли, рівняння реакції ініціювання ланцюга і розкриття циклу виглядає наступним чином (формула 3.8)[37]:

(3.8)



3D-принтери SLA надають інструмент, а матеріали дозволяють стереолітографії створювати широкий спектр функціональних частин для різних

галузей промисловості. У цьому розділі ми розглянемо процес фотополімеризації та її сировину, смолу.

Полімери виготовлені з довгих вуглецевих ланцюгів. Чим коротший ланцюг, тим менш щільний або в'язкий пластик. Смола це полімер, що складається з коротких вуглецевих ланцюжків - від 1 до декількох тисяч атомів вуглецю. Він містить усі компоненти кінцевого пластику, але ще не повністю полімеризований. Коли на смолу впливає ультрафіолетове світло, ланцюги з'єднуються, утворюючи набагато довші і, отже, жорсткіші ланцюги. Коли спрацювало достатньо ланцюгів, результат є твердою деталлю (Рис. 1.10).



Рис. 1.10 Стадії процесу полімеризації в адитивному виробництві.

Ланцюги мономеру та олігомеру в смолі мають активні групи на своїх кінцях. Коли на смолу впливає ультрафіолетове світло, молекула фотоініціатора розпадається на дві частини, і зв'язує її зв'язок стає двома дуже реактивними радикалами. Ці молекули переносять реакційноздатні радикали до активних груп на мономерних та олігомерних ланцюгах, які, у свою чергу, реагують з іншими активними групами, утворюючи довші ланцюги. У міру того як ланцюги стають довшими і утворюють поперечні зв'язки, смола починає твердніти. Весь процес, від рідкого до високополімеризованого твердого стану, відбувається за лічені мілісекунди [36].

Різні смоли складаються з різних основних ланцюгів та бокових груп – різних комбінацій довгих та коротких мономерів, олігомерів, фотоініціаторів та добавок. Це дає унікальну свободу для створення різних складів із широким спектром оптичних, механічних та термічних властивостей, від прозорих до непрозорих та кольорових, від гнучких до жорстких та міцних до теплостійких.

1.3. 3D-моделювання та калібровка принтерів для 3D-друку

Перед початком робочого процесу 3D друку необхідно створити цифрову 3D модель, виконати калібровку принтера враховуючи особливості 3D моделі та виконати підготовку матеріалу (рис. 1.11). Друк перших кількох моделей – це процес хвилюючий, непередбачуваний та захоплюючи-цікавий. На ваших очах поступово створюватиметься нова річ. Але треба підготуватися до того, що не одразу все піде гладко. Небажано виставляти для друку моделей високу або максимальну швидкість, бажаючи якнайшвидше отримати готовий виріб – поспіх позначиться на якості та поверхня виробу може виявитися нерівною, а контури – неакуратними [22].

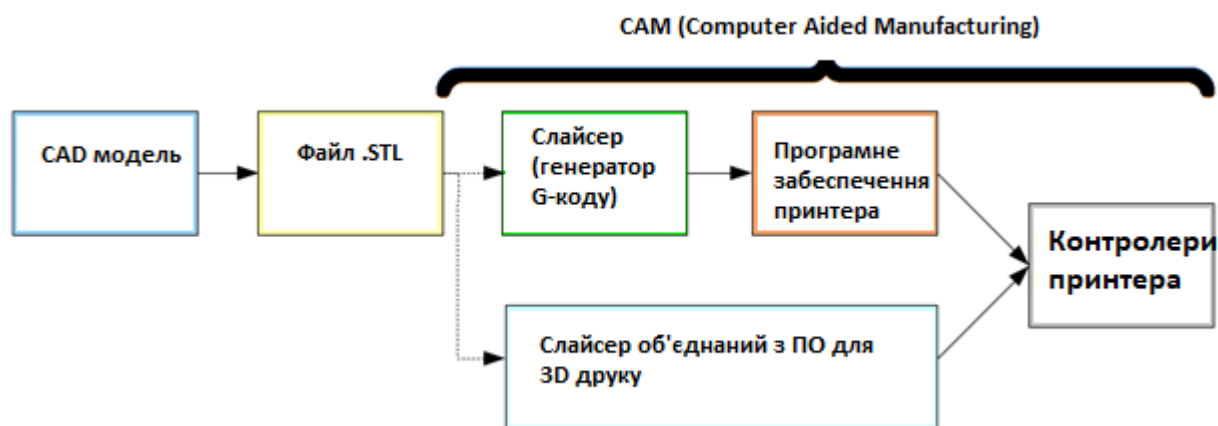


Рис. 1.11 Схема робочого процесу 3D-друку

У 3D-друку використовується чотири основні типи програмного забезпечення, які виконують свої функції послідовно [23]:

1. Моделювання

Програмне забезпечення для 3D-моделювання дозволяє створювати 3D-моделі на комп'ютері. Ви можете спроектувати будь-що, від викрутки до моделі автомобіля. Звичайно, якщо ви не хочете створювати власну 3D-модель, ви можете завантажити 3D-моделі зроблені іншими - їх багато на таких сайтах, як Muminifactory та Thingiverse.

2. Редагування

Перегляд, редагування та ремонт моделей для друку у форматі STL. Незалежно від того, чи ви створюєте свою власну 3D-модель або завантажуєте її з інтернету, найчастіше ви отримуєте STL-файл. Однак не всі файли STL ідеальні, а деякі можуть мати явні недоліки. Дефекти моделей призводять до перетинання або збоїв під час друку. Програмне забезпечення перегляду, редагування та ремонту файлів STL дозволяє візуалізувати, змінювати та виправляти файли STL, щоб гарантувати, що вони готові до 3D-друку. Зазвичай таке програмне забезпечення поєднане з наступним різновидом програм для 3D-друку - слайсерами.

3. Нарізка на шари

Слайсер перетворює STL-файл на G-код — керуючий код для принтера, що містить команди для друку кожного шару моделі та послідовність їх застосування. Найчастіше слайсер містить функції діагностики і ремонту або автовиправлення моделей.

4. Калібрівка

Програма калібрування допомагає відкалібрувати принтер і спрощує вибір параметрів для оптимального друку. Вона потрібна як при початковому

налаштуванні принтера, так і в процесі використання для визначення параметрів друку конкретного пластику.

Ці чотири типи програмного забезпечення для тривимірного друку дозволяють втілити цифрову 3D-модель у фізичний 3D-об'єкт. Далі буде розглянено всі необхідні вимоги при роботі в цих програмах для того, щоб створити якісний виріб [24].

На етапі створення моделі слід враховувати наступні особливості:

- Інвертовані нормалі - неправильно орієнтовані нормалі. Нормалі завжди повинні бути спрямовані назовні, вони визначають межі об'єкта та дозволяють програмному забезпеченню 3D-принтера зрозуміти, де внутрішня, а де зовнішня поверхня моделі. Якщо хоч одна з нормалей спрямована у зворотний бік і суперечить іншій нормалі, це викликає збій при 3D-друку, оскільки принтер не може розрізнити лицьову та виворітну сторону об'єкта.
- Неманіфолдна геометрія – неманіфолдність 3D-моделі є обов'язковою умовою для 3D-друку. Суть цього поняття полягає в тому, що у кожного ребра 3D-моделі має бути рівно дві грані.
- Меш з дірками - проблема “неприхованої” полігональної сітки. Пам'ятайте основне правило 3D моделювання: ваша модель повинна бути «водонепроникною» або «герметичною». Якщо утворюється дірка, це означає, що у якогось ребра не вистачає однієї грані, отже модель неманіфолдна, а значить, не підходить для 3D-друку.
- Наявність внутрішніх полігонів. У середині моделі, наприклад, усередині стінок, не повинно бути граней.
- Загальні ребра. Помилка виникає, коли до одного ребра прикріплено більше двох полігонів. Кожне ребро у вашій 3D моделі має поєднувати лише дві суміжні грані.

- Збігаються ребра. Виникають, коли два окремих ребра створені в тому самому місці і при цьому не з'єднані, такі ребра повинні об'єднуватися в одне загальне ребро.
- Нахльост полігонів. Утворюється, коли створюється полігон поверх існуючого. Грані, що перетинаються, можуть збити з пантелику слайсер - програму, яка за шарами переводить 3D модель в керуючий код для 3D принтера.
- Нульова товщина полігону. Щоб уникнути такої помилки, переконайтеся, що кожен полігон має задану товщину.

Отже, навіть змодельювавши предмет, не варто зі стовідсотковою впевненістю вважати, що справа зроблена, і незабаром принтер видасть вам готовий виріб. Не всі моделі придатні для 3D-друку. Є певні вимоги до розмірів, товщин та дизайну моделей – причому ці вимоги варіюються в залежності від використовуваного матеріалу та принтера.

1.4. Вплив 3D друку на промисловість світу та 3D революція

Ще трохи — і промисловий 3D-друк стане справою повсякденною. Більшість керівників та багато інженерів цього не усвідомлюють, але 3D-технологія давно переросла своє первісне призначення: моделювання, виготовлення прототипів, іграшок та різного дріб'язку. За так званого адитивного виробництва — фізичний об'єкт «вироснує» шар за шаром за параметрами віртуальної моделі — створюються дрібними та великими партіями довговічні та надійні товари для продажу їх реальним споживачам [25].

Ще у 2014 році було виконано аналітичне опитування в якому взяли участь більше 100 промислових компаній. На той час 11% із них уже перейшли на масове виробництво виробів або комплектуючих за допомогою 3D-друку. А, за

твердженням аналітиків консалтингової компанії Gartner, технологія стає мейнстримом, коли рівень її впровадження перевищує 20% [26].

Серед численних компаній, що розвивають 3D-виробництво:

- GE (реактивні двигуни, медичне обладнання, запчастини до побутових електроприладів)
- Lockheed Martin та Boeing (авіакосмічна та оборонна промисловість)
- Google (споживча електроніка)

Прикладу перелічених компаній будуть слідувати інші, оскільки асортимент матеріалів для 3D-друку неухильно розширюється. Економічні успіхи передових країн зрештою переконують решту. Хоча прямі витрати виготовлення товарів за допомогою нової технології і нових матеріалів, як правило, вище, загальні витрати адитивного виробництва завдяки його високій маневреності будуть істотно нижче, ніж традиційного.

Оскільки технологічна революція вже йде на повний хід, керівникам зараз треба шукати відповіді на стратегічні питання трьох рівнів.

По-перше, постачальникам матеріальних товарів треба подумати, як вони самі чи їхні конкуренти могли б удосконалити їхню продукцію. Якщо предмет виготовляється пошарово за завантаженим у принтер цифровим макетом, можна враховувати будь-які побажання конкретних клієнтів і нескінченно ускладнювати конструкцію предмета [27].

По-друге, промисловим підприємствам слід переглянути принципи свого виробництва. Адитивні технології дозволяють по-новому вирішувати, як, коли і де найкраще виготовляти товари та компоненти, вибудовувати найзручніші та найвигідніші ланцюжки поставок, оптимально комбінувати старі та нові виробничі процеси. І варіантів тут — безліч.

По-третє, керівникам потрібно проаналізувати стратегічні наслідки переходу на об'ємний друк, оскільки навколо нової технології починають

формуватись цілі бізнес-екосистеми. Здатність потужних промислових утворень дробитися на незліченну кількість дрібних виробників експлуатувалася неодноразово. Але ця ідея заступає більш приземлену і важливу обставину: щоб розробники, виробники та продавці виробів могли постійно взаємодіяти, потрібні цифрові платформи.

Важко уявити, що 3D-технологія замінить нинішні стандартні принципи масового виробництва. Скажімо, автоматичні преси для лиття під тиском можуть виготовляти тисячі деталей на годину. І людям, котрі бачать, як працюють 3D-принтери, поширене нарощування предмета здається до абсурду повільним. Але завдяки останнім розробкам технологія стрімко вдосконалюється і ситуація із її застосуванням у промисловості кардинально змінюється. Можливо, не всі розуміють, із чим пов'язана така вражаюча швидкість стандартного виробничого процесу. Виливки виготовляються так швидко тому, що спочатку у верстати та інше обладнання, необхідне для їхнього виробництва, було вкладено великі гроші [28].

Перший виріб обходиться дуже дорого, але потім чим більшої кількості вони виробляються, тим різкіше скорочуються граничні витрати. Такого ефекту масштабу адитивна технологія не має. Але вона не має і такого мінусу традиційного виробництва, як відсутність маневреності. Оскільки кожна одиниця продукції виготовляється автономно, її легко модифікувати та врахувати будь-які побажання конкретного замовника чи, у сенсі, внести конструктивні поліпшення чи відстати моди. І запустити виробництво набагато простіше, бо має значно менше етапів. Ось чому 3D-друк ідеально підходив для виготовлення єдиних у своєму роді досвідчених зразків та рідкісних запасних деталей. Але адитивна технологія грає дедалі важливішу роль промислового виробництві. До послуг клієнтів - різноманітні та незліченні варіанти форм, розмірів та кольорів. Причому виконання на індивідуальне замовлення

практично не збільшує витрат виробника, навіть якщо йдеться про масову партію товару. При адитивному виробництві деталі, які завжди виготовлялися окремо, а потім збиралися, тепер можна робити в один прийом як один виріб — і в цьому його великий плюс.

Простий приклад — сонцезахисні окуляри: процес 3D-друку дозволяє варіювати пористість та склад пластику у різних місцях оправи. Дужки виходять м'якими та гнучкими, а обідки, які тримають лінзи, – жорсткими. І жодного складання. Завдяки можливості друкувати вироби та окремі компоненти можна ускладнювати їхню структуру — скажімо, робити стільникові сталеві панелі або конструкції, які раніше надто важкі для виготовлення. Складні механічні деталі на кшталт комплекту зубчастих коліс не вимагають збирання під час виготовлення. За допомогою адитивної технології можна комбінувати деталі і робити їх «начинки» набагато складнішими. Ось чому NASA тепер друкує паливні форсунки для деяких реактивних двигунів і передбачає в рік випускати понад 45 тисяч штук одного типу. Може здатися, що традиційні методи в даному випадку були б доречнішими. Але раніше ці форсунки збирали із 20 окремих литих деталей, а тепер їх роблять єдиним цілим. За підрахунками аналітиків, новий спосіб скоротить витрати виробництва на 75% [28].

1.5. Висновок до розділу 1

Застосування 3D-принтера для перетворення цифрового файлу на фізичний об'єкт вже набуло широкого поширення. Це означає, що 3D друк вже пройшов стадію «концептуалізації» на якій було формування бачення та ідеї, які визначають подальший шлях. Тепер є фундамент для «реалізації», протягом якої задуми, що здаються раніше неможливими, починають частково реалізовуватися. Наступним кроком буде «масова комерціалізація», коли підприємства освоюють виробництво та застосування нової технології [29].

Технологія з використанням фотополімеру набула широкого поширення у сфері адитивного виробництва. Залежно від виробу використовуються різні формати фотополімеру. Головна перевага цього виду 3D друку полягає у високій деталізації виробу.

Але саме для того щоб досягти цієї високої деталізації та отримати якісні вироби, не тільки гарні зовні, але й технічно застосовні, необхідно правильно підібрати параметри для друку. Механічне калібрування принтера, оптимальний час засвітлення шару, підбір «супортів» (підтримки для нависаючих елементів), підготовка цифрової моделі та слайсінг, вибір матеріалу – усе це необхідні етапи 3D друку для отримання якісного виробу з оптимальними затратами матеріалів та часу. Постобробка також має великий вплив на якість виробу. Тому доцільно дослідити режими процесів виготовлення та обробки виробів з використанням фотополімеру [30].

Більшість фотополімерів крихкі. Є ті, що мають деяку еластичність і не коляться при спробі, наприклад, свердління, але вони зазвичай і коштують істотно дорожче. Тобто, незважаючи на те, що це практично литі деталі, вони часто можуть поступатися в міцності друкованим деталям, зробленим за технологією FDM. Тому було вирішено дослідити можливість наповнення фотополімерів, для цього було використано порошок поліаміду-12. Правильно підібрана суміш та параметри друку забезпечать кращу жорсткість, високу механічну зносостійкість виробів, та покращення інших параметрів які треба дослідити. Завдяки таким композиційним фотополімерам є перспектива отримання кінцевих деталей двигунів або будь-якого іншого застосування, що вимагає особливої жорсткості, високої температури низької теплової деформації та низького абразивного зносу.

РОЗДІЛ 2

Об'єкти та методи досліджень

2.1. Об'єкти дослідження

Для дослідження та удосконалення процесу 3D друку за технологією SLA, було використано фотополімерну смолу Anycubic 405nm UV resin від виробника ANYCUBIC. Для виготовлення композиційної суміші з фотополімером було використано поліамід Adsint PA12 від виробника BASF . Властивості цих матеріалів приведені в таблицях 2.1 та 2.2.

2.1.1. Властивості фотополімерної смоли

Фотополімер Anycubic призначений для роботи з SLA та DLP 3D принтерами, які полімеризують смолу довжиною хвилі 405 нанометрів: Anycubic Photon, Wanhao Duplicator 7 (D7) Plus та іншими, що друкують за технологією стереолітіографії (SLA/DLP) та були в наявності для дослідження.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики фотополімерної смоли Anycubic 405nm UV resin

Властивість	Значення
Довжина хвилі для полімеризації, нм	405
Твердість повністю затверділого полімеру за Шором (шкала D), од	79
В'язкість (25°C), мПа·с	552
Коефіцієнт усадки, %	7,1
Щільність рідини, г/см ³	1,1
Щільність твердої речовини, г/см ³	1,184

Серед особливостей фотополімеру Anycubic – висока швидкість полімеризації та твердість кінцевих виробів (коефіцієнт щільності за шкалою Шора становить 79 за шкалою D), тому вона підходить для друку виробів

широкого призначення та підходить для виявлення оптимальних параметрів друку (Таблиця 2.1).

Типовим застосуванням є прототипи та невеликі серії функціональних деталей. Adsint PA12 можна обробляти на більшості поширених принтерів SLS тому було вирішено використати саме цей матеріал у нашому дослідженні з DLP.

Adsint PA12 є багатоцільовим матеріалом для застосування в лазерному спіканні. Деталі, виготовлені з цього матеріалу, мають збалансований профіль властивостей з дуже гладкою поверхнею деталей і чудовими результатами для надрукованих виробів (Таблиця 2.2).

Таблиця 2.2

Технічні характеристики поліаміду Adsint PA12 від виробника BASF

Властивість	Значення
Середній розмір частинок (ISO 13320), d50/мкм	550
Насипна щільність (ISO 1068-1975), кг/м ³	550
Твердість за Шором, (за шкалою D) од.	80
Поглинання води (23 °C, 65% год), %	1
Міцність на розтяг (ISO 527-2:93-1B), МПа	46
Модуль розтягування (ISO 527-2:93-1B), МПа	1750
Відносне подовження при розриві (ISO 527-2:93-1B), %	22
Ударна міцність (ISO 179-1), кДж/м ²	87
Модуль згину (DIN EN ISO 178), МПа	1520

2.2. Методи досліджень

Для дослідження було використано велику кількість зразків за відповідними стандартами з фотополімерної смоли. Поверхня зразків відповідала стандартам, за якими повинна бути гладкою, без западин, тріщин, пазирів, пір, подряпин, шорсткості, надривів, сторонніх включень та інших дефектів, видимих неозброєним оком.

2.2.1. Метод випробування на розтяг та відносне видовження

Зразок оцінювали на їх розтяжні властивості на машині, як показано на малюнку (Рис. 2.1). Дані про деформацію та навантаження записані при 25 Гц, зразки навантажували зі швидкістю 50 мм / хв згідно з ASTM D638-10 [32]. Дані, записані було збережено у форматі .gm5 та проаналізовано.

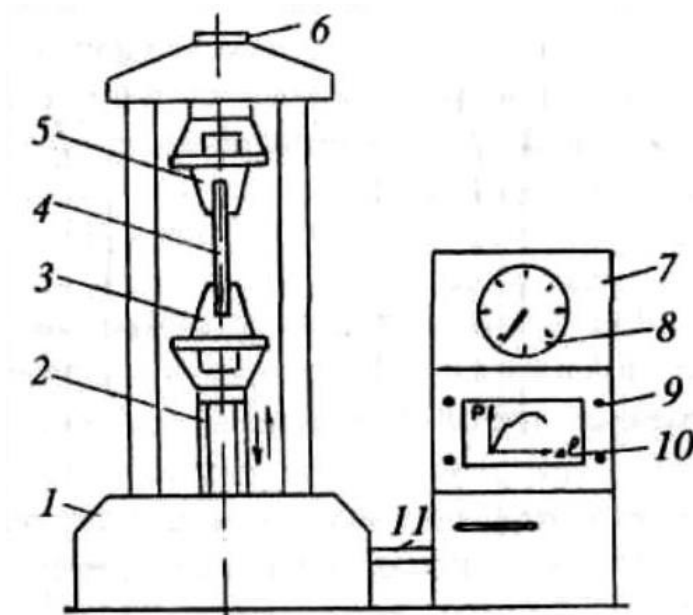


Рис. 2.1. Схема розривної машини. 1 – станина, 2 – навантажний гвинт, 3 – нижній захоплювач, 4 – зразок, 5 – верхній захоплювач, 6 – силовимірювальний датчик, 7 – пульт управління, 8 – індикатор навантажень, 9 – рукоятки управління, 10 – діаграмний механізм, 11 – кабель.

2.2.2. Метод визначення твердості за Шором

Вимірювання твердості за Шором (шкала А) проведено згідно ISO 868-85 на твердомірі (Рис 2.2). Вимірювалися значення максимальної твердості і твердості після проходження процесів релаксації після 1 секунди і після 10 секунд перебування зразка під навантаженням відповідно. За результат випробування брали середнє арифметичне не менше п'яти визначень твердості в різних місцях поверхні зразка на відстані не менше 6 мм від точки попереднього виміру [33].

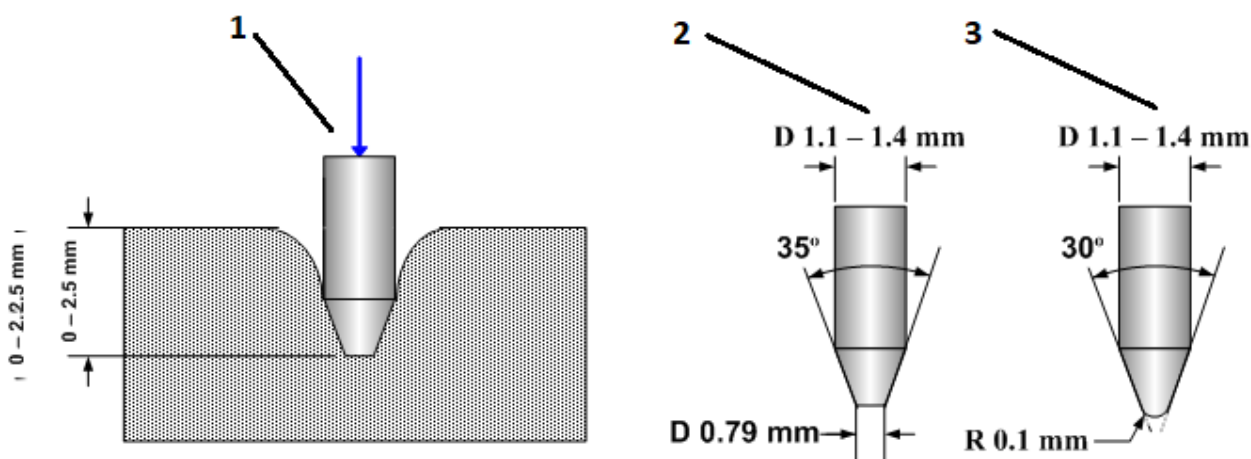


Рис. 2.2 Схема вимірювання твердості за методом Шора. 1 – нагрукка пружини, 2 – індентор типу А, 2 – індентор типу D.

2.2.3. Метод визначення ударної в'язкості Шарпі

В'язкість пов'язана з площею під кривою напруження-деформація. Щоб матеріал був міцним, він повинен бути міцним і пластичним. Наприклад, крихкі матеріали (кераміка), які є міцними, але з обмеженою пластичністю, не є жорсткими; навпаки, дуже пластичні матеріали з низькою міцністю також не є жорсткими. Щоб матеріал був міцним, він повинен витримувати як високі навантаження, так і високі деформації. Взагалі кажучи, міцність вказує, яку силу

може витримати матеріал, тоді як міцність вказує, скільки енергії може поглинути матеріал перед розривом [34].

Випробування на ударний вигин по Шарпі - випробування, при яких зразок, що лежить на двох опорах, піддається удару маятнікового копра, причому лінія удару знаходиться посередині між опорами безпосередньо навпроти надрізу у зразків з надрізом (Рис. 2.3). Для пластмас оцінюється ударна в'язкість (енергія віднесена до площі поперечного перерізу місці удару) в Дж/м². Оскільки значення енергії удару різних матеріалів залежать від температури, то випробування проводять при заданих температурах [35]. Випробування на ударний вигин Шарпі регламентовано в стандартах ГОСТ Р ИСО 148-1, ISO 148-1, ASTM A370, ASTM E23 (для металів) і в ГОСТ 4647, ISO 179, ASTM D6110 (для пластмас).

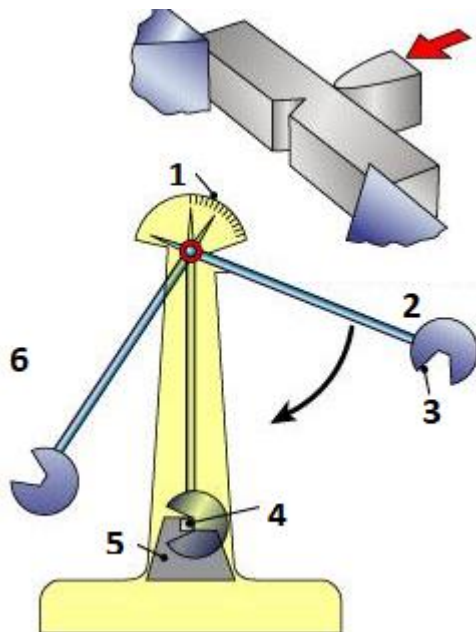


Рис. 2.3 Схема випробувальної установки за методом Шарпі. 1 – циферблат, 2 - вихідне положення, 3 – молоток, 4 – пробірка, 5 – підтримка, 6 - верхня мертва точка.

Випробувальна установка є маятниковим копером, який встановлюється на певній висоті над зразком. Удар за зразком відбувається за допомогою падіння копра. Поглинена при розламуванні зразка енергія удару пропорційна різниці висоти, з якої впав копр, та висоти, до якої він зміг піднятися за інерцією після того, як розламав зразок. Надріз зразка впливає результати випробувань, тому його форма і розміри суворо регламентовані у різних стандартах. Розміри зразка можуть вплинути на результати випробувань [36].

Одним із недоліків традиційного методу випробування на удар є те, що в результаті визначається лише сумарна енергія руйнування. Іноді застосовують інструментальні методи контролю випробування, суть яких полягає у безперервному вимірі зусилля навантаження у процесі руйнування. Це дає можливість оцінки крім енергії руйнації ще й максимального зусилля при руйнуванні, що дозволяє оцінити перехід від тендітного до пластичного механізму руйнування при зниженні температури [37].

2.2.4. Метод випробування на статичний вигин

Цей стандарт поширюється на неармовані та армовані пластмаси та встановлює метод випробування на статичний вигин.

Сутність методу полягає в тому, що зразок для випробувань, що вільно лежить на двох опорах, короткочасно навантажують у середині між опорами. При цьому визначають такі показники:

- згинальна напруга і значення прогину в момент руйнування для пластмас, що руйнуються при заданій величині прогину або до досягнення цієї величини;
- згинальна напруга при заданому значенні прогину для пластмас, що не руйнуються при заданій величині прогину або до досягнення цієї величини;

- згинальна напруга при максимальному навантаженні для пластмас, у яких при заданій величині прогину або до досягнення цієї величини навантаження проходить через максимум;
- згинальна напруга при руйнуванні або при максимальному навантаженні, коли прогин перевищує задане значення прогину, якщо це передбачено нормативно-технічної документації на пластмасу (див. довідковий додаток 2).

Випробування проводять на випробувальній машині, що забезпечує рівномірну швидкість відносного руху навантажуючого наконечника і опор і дозволяє вимірювати навантаження з похибкою $\pm 1\%$, а прогину - з похибкою $\pm 2\%$.

Рекомендується застосовувати випробувальну машину, у якої зсув силовимірювального пристрою у всьому діапазоні навантажень становить не більше 2 мм. Відстань між опорами має бути регульованою. На випробувальній машині повинен бути розміщений пристрій із навантажуючим наконечником та опорами (Рис. 2.4). Зближення їх має відбуватися з постійною швидкістю з урахуванням допусків [38].

Радіуси наконечника (r_1) та країв опор (r_2) (рис.1) повинні мати такі розміри в міліметрах:

$$r_1 = (5 \pm 0,1);$$

$$r_2 = (0,5 \pm 0,2) \text{ (при товщині зразка до 3 мм);}$$

$$r_3 = (2,0 \pm 0,2) \text{ (при товщині зразка понад 3 мм).}$$

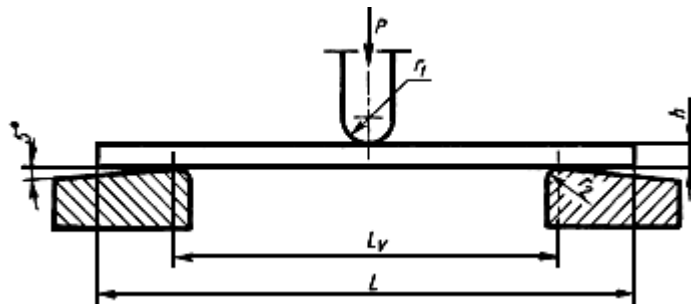


Рис. 2.4. Схема розташування зразка

Пристрій з опорами повинен забезпечувати можливість їх встановлення та закріплення на потрібній між ними відстані.

Стандартний зразок повинен мати такі розміри в міліметрах:

довжина (L) – не менше 80;

ширина (b) – $(10,00 \pm 0,50)$;

товщина (h) – $(4,00 \pm 0,20)$.

При випробуванні анізотропних матеріалів зразки вирізають так, щоб згинальне напруження при випробуванні зразка було прикладено в тому ж напрямку, що і при експлуатації виробів цих матеріалів. Місце та напрямок вирізки зразків із готових виробів повинні забезпечувати отримання стандартних зразків, інакше зразки вибирають за п.2.1.2. При цьому слід враховувати, що розташування шарів або орієнтація в матеріалі можуть значно впливати на результати випробування, особливо для шаруватих пластмас.

Розташування зразків, що вирізуються з листів анізотропних матеріалів, зазначено на малюнку (Рис. 2.5).

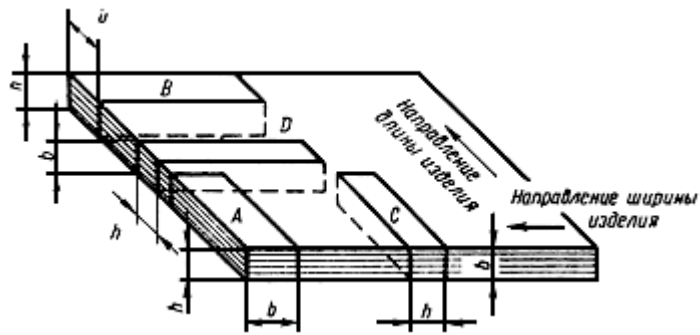


Рис. 2.5 Схема розташування зразка

Зразки повинні мати гладку рівну поверхню без здуття, сколів, тріщин, раковин та інших видимих дефектів.

Перед випробуванням у середній третині довжини зразка заміряють ширину зразка з похибкою $\pm 0,1$ мм та товщину - з похибкою $\pm 0,02$ мм.

Випробування проводять при температурі $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ відносної вологості $(50 \pm 5)\%$ за ГОСТ 12423-66, якщо в нормативно-технічній документації на матеріал немає інших вимог [39].

Відстань між опорами має бути від 15 до 17 .

Відстань між опорами вимірюють із похибкою $\pm 0,5\%$.

Зразок встановлюють на опори широким боком (черт.1). Якщо зразок піддавався механічній обробці з одного боку, його кладуть на опори тією стороною, яка не піддавалася механічній обробці.

Навантаження зразка проводять у середині між опорами плавно, без поштовхів.

Швидкість відносного переміщення навантажувального наконечника та опор v має бути встановлена у нормативно-технічній документації на матеріал.

За відсутності таких вказівок швидкість відносного переміщення наконечника і опор в мм/хв обчислюють за формулою 2.1:

(2.1)

$$v = \frac{v_r \cdot L_v^2}{6h}$$

Де L_v - Відстань між опорами, мм;

V_r - швидкість деформації, що дорівнює 0,01 мм/хв або значення, передбачене в нормативно-технічній документації на матеріал, мм/хв;

h - Товщина зразка, мм.

Випробування продовжують до руйнування зразка або до досягнення заданого максимального навантаження, якщо це передбачено нормативно-технічної документації на матеріал. У кожному з цих випадків визначають навантаження та прогин.

Якщо при випробуванні зразка максимальне значення навантаження спостерігається до досягнення заданої величини прогину, то в цьому випадку визначають максимальне навантаження і відповідне значення прогину.

Якщо зразок руйнується поза середньою третиною відстані між опорами, то отриманий результат не зараховують і проводять повторно випробування на новому зразку [40].

2.2.5. Визначення густини

Визначення густини композита фотополімерної смоли з поліамідом було здійснено методом гідростатичного зважування матеріалу на аналітичних вагах *RADWAG AS-X2*. Визначення густини методом гідростатичного зважування здійснювалось за результатами двох вимірювань маси досліджуваного предмета.

Спочатку в повітряному середовищі, потім в рідині, з відомою власною щільністю. В якості рідини використовувалась дистильована вода та етиловий спирт [41]. Перше зважування дозволяє визначити масу предмета, а друге по різниці обох зважувань, дозволяє обчислити об'єм за формулою 2.2.

$$V = \frac{m_1 - m_2}{\rho_2} \quad (2.2)$$

Густина досліджуваного об'єкта обчислюється за формулою 2.3:

$$\rho_1 = \frac{m_1}{V} \quad (2.3)$$

Де: V – об'єм; ρ_1 – густина досліджуваного об'єкта; ρ_2 – густина води; m_1 – маса досліджуваного об'єкта, m_2 – маса об'єкта в рідині.

0,67 рідка

РОЗДІЛ 3

Технологічно-експериментальний розділ

3.1. Адитивне формування методом лазерної стереолітографії (SLA)

В ННЛ «Перспективних полімерних матеріалів» кафедри ПЕТПХВ було досліджено метод адитивного формування цифровою обробкою світлом, досліджено фізико-механічні властивості виробів, вплив параметрів друку на властивості виробів та розроблено композиційну суміш з фотополімерної смоли та поліаміду-12.

Для реалізації процесу адитивного виробництва було використано 3D принтер Anycubic Photon Mono (Рис. 3.1), технічні характеристики наведено в таблиці (Таблиця 3.1).



Рис. 3.1 Фото принтеру Anycubic Photon Mono з інтернету.

Технічні характеристики принтеру Anycubic Photon Mono

Параметр	Значення
Метод друку	Лазерна стереолітографія (SLA), Стереолітографія (SLA), LCD
Максимальна швидкість друку, мм/сек	0.83
Довжина хвилі лазера, нм	405
Робоча довжина, мм	130
Робоча ширина, мм	80
Максимальна робоча висота, мм	165

3.2. Технологічна схема процесу адитивного виробництва

Як було раніше згадано для дослідження використано 3D принтер SLA зі схемою Upside-Down. В цьому випадку ультрафіолетовий лазер спрямований на два дзеркальні гальванометри, які спрямовують світло на правильні координати, фокусують світло вгору через дно ванни і закріплює шар фотополімерної смоли на дні резервуара. Комбінація вертикальної робочої платформи та горизонтального руху резервуара потім відокремлює отверджений шар від дна резервуара, і будівельна платформа переміщається вгору, щоб дозволити свіжій смолі текти вниз. Процес повторюється до завершення друку. У більш досконалих системах резервуар нагрівають, щоб забезпечити контрольоване середовище, і склоочисник проходить через резервуар між шарами для циркуляції смоли та видалення скупчень напівзатверділої смоли.

Upside-Down 3D-друк SLA має обмеження. Через сил відшаровування, що впливають на деталь, обсяг зборки обмежений, і для утримання частини, прикріпленої до платформи складання, потрібні більші опорні конструкції. Сили

відшаровування також обмежують використання більш гнучких матеріалів, оскільки опорні конструкції стають гнучкими.

SLA потребує використання підтримок для більшості деталей залежно від їх конструкції.

У системах Right-Side Up ці опори утримують деталі в точному місці, щоб гарантувати, що всі деталі мають щось, до чого можна прикріпитись, і протистоять бічному тиску (Рис. 3.2). Upside-Down стереолітографія використовує опори для прикріплення нависаючих частин до будівельної платформи, запобігання прогину під дією сили тяжіння та збереження новостворених секцій під час процесу відшаровування.



Рис. 3.2 Обидві системи SLA використовують допоміжні структури для прикріплення деталей до платформи збирання.

Більшість програмних інструментів автоматично створюють підтримки під час підготовки 3D-моделей, але їх також можна настроїти вручну. Після завершення друку ці опори повинні бути видалені з готового продукту вручну.

3.3.1 Пост-затвердіння виробів з фотополімерної смоли

Після завершення друку деталі залишаються на платформі складання у вищезгаданому зеленому стані. Хоча вони досягли своєї остаточної форми, реакція полімеризації ще не завершена, тому механічні та термічні властивості не встановлені повністю.

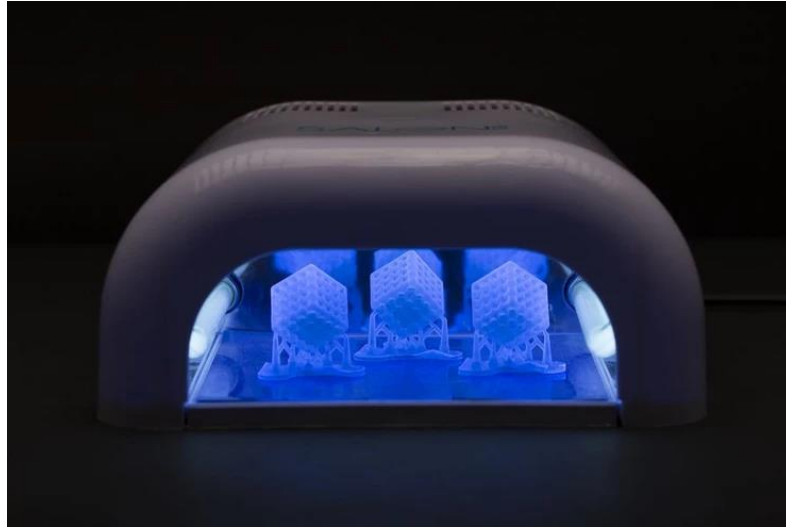


Рис. 3.4 УФ-затвердіння завершує процес полімеризації та стабілізує механічні властивості.

Додавання камери наступного затвердіння до друку завершує процес полімеризації і стабілізує механічні властивості (Рис. 3.4). Це дозволяє деталям досягти максимально можливої міцності та стати стабільнішими, що особливо важливо для функціональних смол для машинобудування, стоматології та ювелірних виробів. Наприклад, успішне вигорання відлитої відбитків вимагає наступного затвердіння, а гнучкі деталі подвоюють свою міцність при подальшому затвердінні. Порівняння параметрів постобробки наведено в таблиці 4.2.

3.4. Процес 3D друку

Після освоєння теорії, що лежить в основі стереолітографії, розглянемо, як виглядає процес друку на прикладі настільного SLA-принтера Anycubic Photon Mono.

3.4.1. Розробка 3D моделі

Як і у всіх процесах 3D-друку, стереолітографія починається з тривимірної моделі, математичного представлення будь-якої тривимірної поверхні. Це може бути створене за допомогою програмного забезпечення автоматизованого проектування (CAD) або розроблено на основі даних тривимірного сканування (Рис. 3.5). Потім дизайн експортується у файл .STL або .OBJ, який читається програмним забезпеченням, яке готує файл для 3D-принтера.

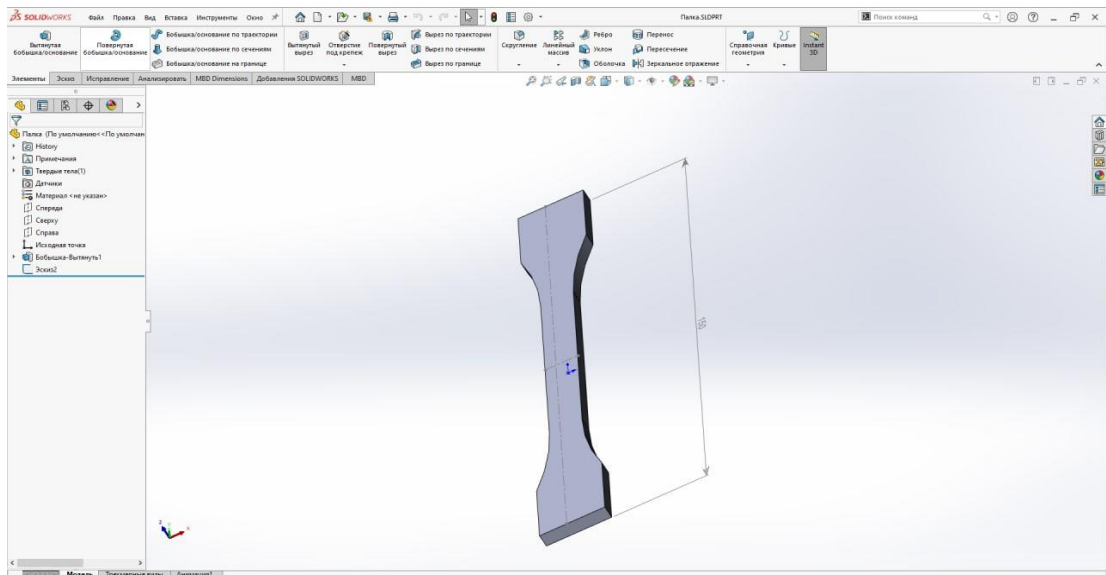


Рис. 3.5 Процес створення 3D моделі зразка за ISO 527 для випробування на розтяг.

Можна використовувати будь-яке програмне забезпечення для автоматизованого проектування (CAD), щоб спроектувати свою модель та

експортувати її у формат 3D-файлу для друку. У даній роботі використано програму Solidworks 2021.

3.4.1. Підготовка 3D моделі до 3D друку

Кожен принтер SLA включає програмне забезпечення для завдання параметрів друку та розбиття цифрової моделі на шари для друку (Рис. 3.6). Налаштування друку, що регулюються, включають орієнтацію, опорні структури, висоту шару і матеріал. Після завершення інсталяції програмне забезпечення надсилає інструкції на принтер через бездротове або кабельне з'єднання.

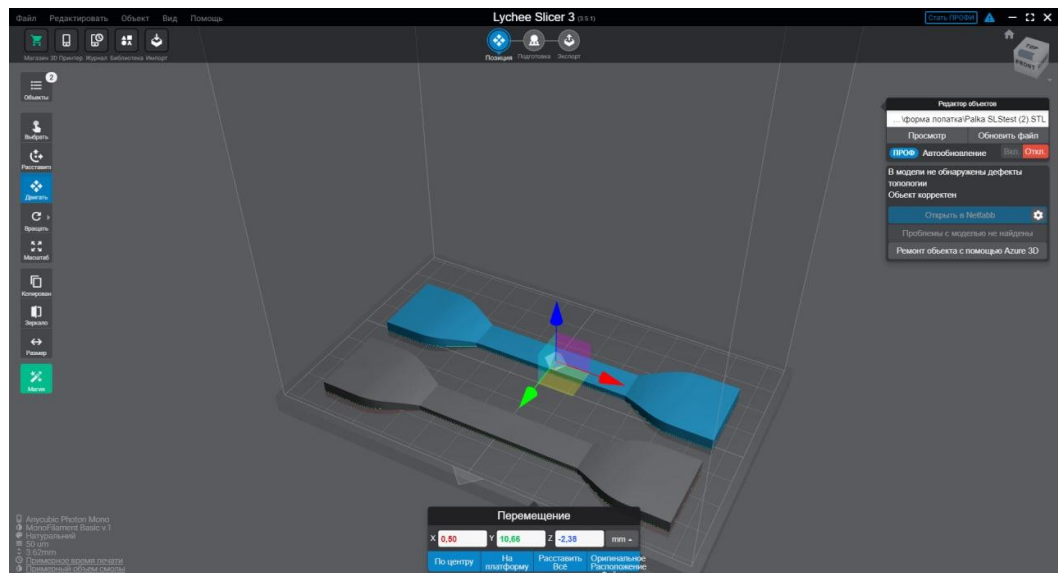


Рис. 3.6 Завантаження моделі у слайсер Lychee Slicer 3 .

Спочатку у слайсері завдяки візуальному інтерфейсу програмується масштаб, орієнтація, кількість моделей та розташування її на робочій платформі принтеру. Це важливий етап який визначає властивості кінцевого виробу, за рахунок розташування шарів моделі у певному напрямку, змінюється

ізотропність. Також можна візуально з'ясувати місця в яких необхідно створити підтримки необхідні для якісного створення виробу.

Наступний етап – програмування параметрів дії УФ лазера та механіки принтеру, визначення матеріалу та підбір оптимального часу полімеризації шарів (Рис. 3.7 та 3.8).

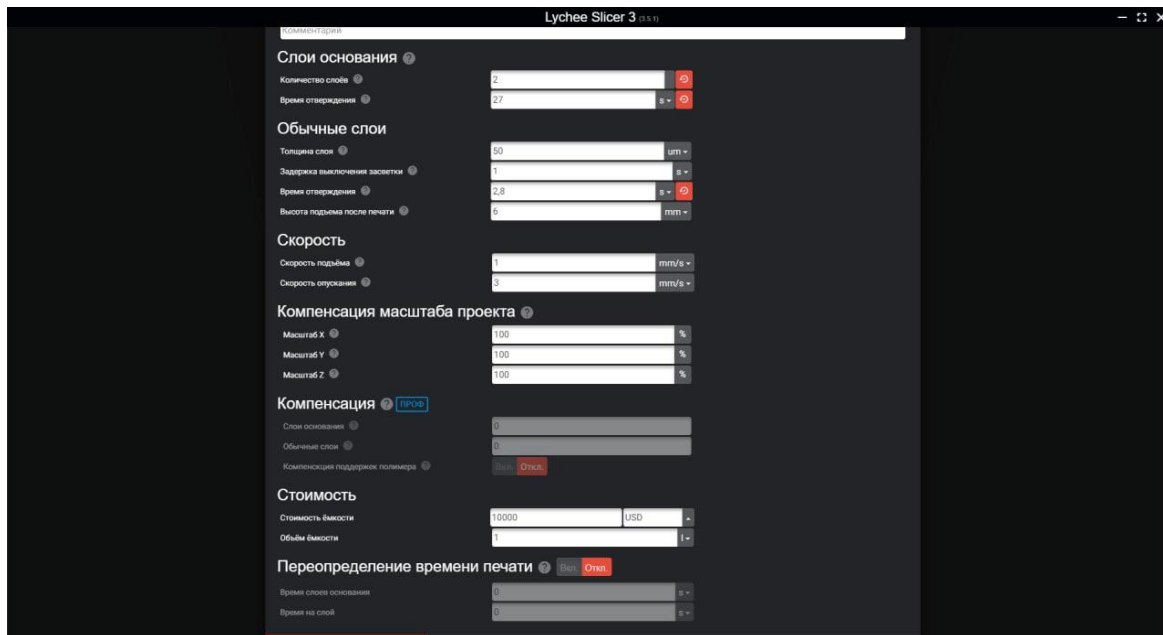


Рис. 3.7 Встановлення параметрів роботи 3D принтера

Зазвичай програми для налаштування друку мають шаблони з налаштуванням певних 3D принтерів для роботи з певними фотополімерними смолами. Але доволі часто необхідно вручну робити налаштування через те, що існує велике різноманіття матеріалів та кожна 3D модель потребує унікальних налаштувань. Програми дозволяють створити власні шаблони з параметрами для кожного окремого випадку. Відштовхуючись від необхідних властивостей кінцевого виробу та матеріалу можна створити власні шаблони з підібраними параметрами. Для встановлення оптимальних параметрів необхідно з'ясувати вплив окремого параметру на процес друку. Також слід враховувати що параметри друку впливають не тільки на деталізацію виробу але й на

фізико-механічні властивості. В залежності від потреби можна регулювати внутрішню структуру та коефіцієнт заповнення виробу для економії матеріалу та часу зменшивши процент заповнення або збільшивши для більшої міцності виробу.

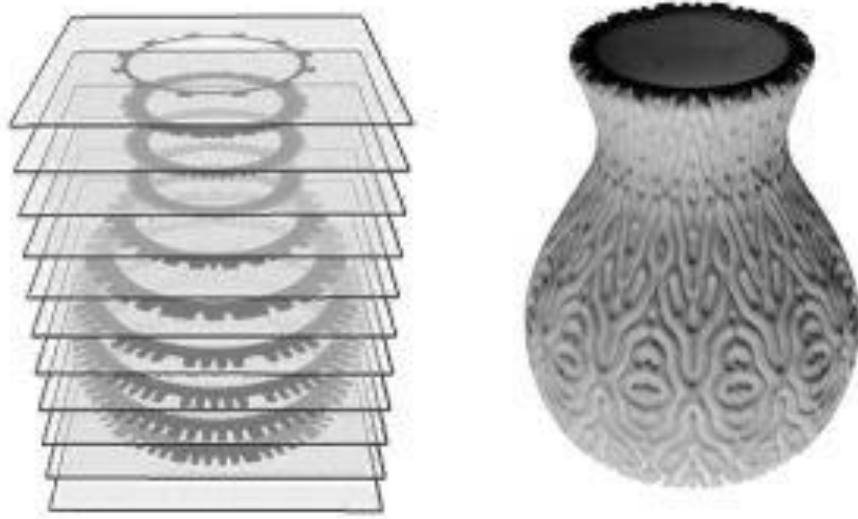


Рис. 3.8 Демонстрація «слайсінгу» - розрізання моделі на шари

Основні технічні можливості програм для «слайсінгу»:

- Вказавши час затвердіння, товщину шару, швидкість руху, а також ціну за матеріал та щільність, можна регулювати деталізацію виробу та отримати розрахунок часу друку та кількість необхідного матеріалу.
- В програмах «слайсерах» можна вручну, використовуючи інструменти візуального інтерфейсу, згенерувати підтримки, побудувати власну опору, створити плоти. Цей крок не є обов'язковим, якщо вибрати автоматичне створення, але забезпечує більшу функціональність для складніших

випадків використання. Це меню також дозволяє налаштувати форму, щільність, діаметр ваших опор, а також характеристики плоту.

- Створення пустотілих та дренажних отворів у реальному часі дозволять заощадити на дорогій смолі, зберігаючи при цьому деталізацію.
- Змінна висота шару дозволяє потенційно оптимізувати час та якість друку, автоматично збільшуючи або зменшуючи висоту шару на різних ділянках об'єкту.

Налаштування параметрів:

- Висота шару - програмування принтера починається з вибору висоти шару. Від цієї величини залежить якість та деталізація друку. Мінімальна висота шару Anycubic Photon Mono становить 10 мкм. Такий розмір шару ідеально підходить для полімерів із низькою в'язкістю. Стандартна висота цього принтера - 50 мкм. Для фотополімерів із середньою та високою в'язкістю рекомендується ставити товщину шару 100 мкм.
- Час засвічення - важливий параметр, від якого залежить якість друку. Для більшості полімерів рекомендований час засвічення звичайних шарів варіюється від 3 до 20 секунд. Звичайними шарами називаються ті, які є основою (не стикаються з робочою платформою). Якщо час засвічення виставлено неправильно, то модель виходить ширшою (перевищено час засвічення) або вузькою (час засвічення менше, ніж потрібно). Саме тому потрібно робити тестовий друк новим матеріалом. Було встановлено, що для друку стандартними фотополімерами на принтері Anycubic Photon Mono, необхідно 4 секунди для полімеризації звичайних шарів.
- Час засвічення перших шарів - для полімеризації перших шарів потрібно трохи більше часу, ніж для засвічення інших. В середньому, кількість часу на засвічення перших шарів у 5-10 разів перевищує нормальний час

полімеризації. Це потрібно для того, щоб полімер знайшов необхідне зчеплення з основою. Якщо виробник не вказує час засвічення для бази, то ця величина визначається досвідченим шляхом. Але й тут діють такі ж правила, як і під час друку основних шарів. Занадто довгий час засвічення робить основу ширше (ефект "слонячої ноги"), а недостатній час - вужче. Саме тому більшість виробів друкуються на підтримках. В нашому досліді встановлено оптимальний час – 25 секунд для полімеризації шарів основи.

- Кількість базових шарів - основа деталі досягає необхідної міцності при кількості шарів зі збільшеним часом засвічення близько 3-8.
- Час затримки у верхньому положенні - під час руху платформи вгору важливо, щоб фотополімер затік під модель і продовжив новий шар. Найчастіше цей етап йде 1 секунду. Для більш в'язких смол час можна збільшити.
- Час затримки у нижньому положенні - коли платформа рухається вниз до ванни з фотополімером, матеріал може нерівномірно рухатися під дією повітряного потоку, що призводить до порушення цілісності шару. Оптимальне значення 1-3 секунди.
- Висота підйому - ця величина визначає, наскільки деталь піднімається з дна ванни після друку шару. Оптимальна відстань – 4-6 мм. Найменша відстань може призвести до того, що вже надрукована модель не зможе відокремитися від дна ванни.
- Швидкість підйому та опускання платформи - ця величина визначає, з якою швидкістю платформа рухається вгору і вниз після друку шару. У деяких принтерах швидкість можна збільшити, однак для отримання якіснішого результату друку цей параметр краще залишити без змін.

Інші настройки Anycubic Photon Mono можна залишити без змін, тому що вони не суттєво впливають на друк.

3.4.2. Підготовка 3D принтеру та фотополімерної смоли

Калібрування робочої платформи - важливий етап, без якого не обходиться жоден цикл друку. Якщо робоча поверхня буде під кутом до матриці, то виріб може бути забраковано. Для цього використовується паперовий лист, щоб встановити зазор між дисплеєм та платформою (Рис. 3.9).

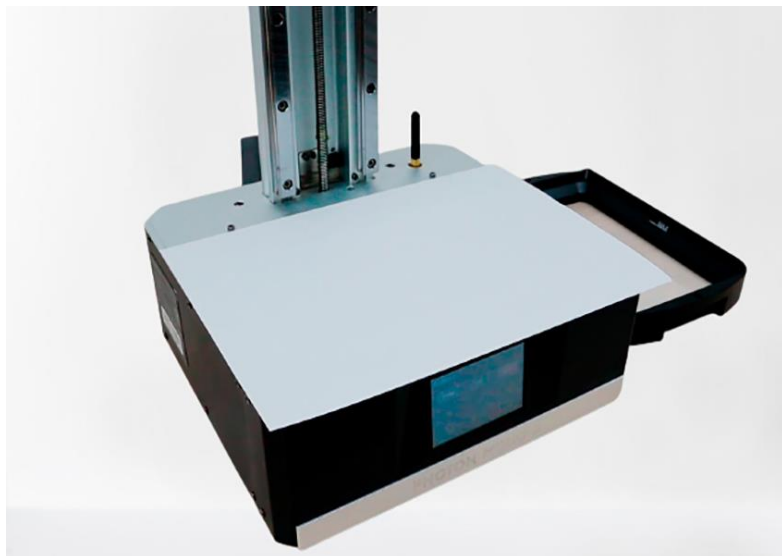


Рис. 3.9 Калібрування робочої платформи принтеру Anycubic Photon Mono

Принтер Anycubic Photon Mono оснащений спеціальними гвинтами, що дозволяють закріпити платформу у потрібному положенні (Рис. 3.10). Послабивши гвинти та опустивши платформу на дисплей (через меню), можна швидко виконати калібрування принтера.

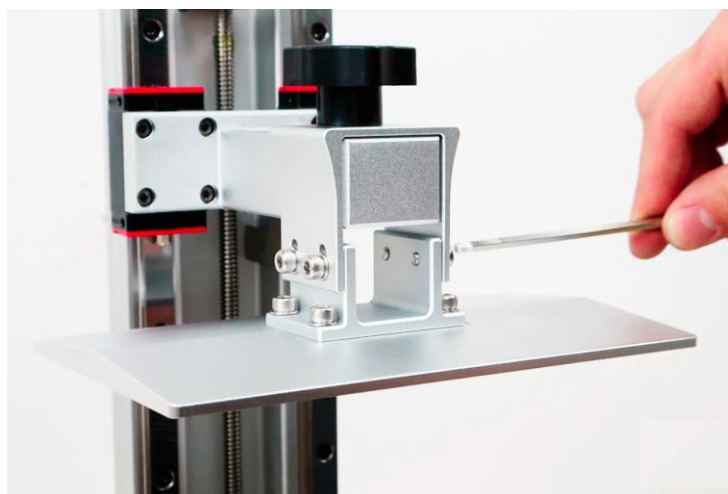


Рис. 3.10 Закріплення гвинтів робочої платформи принтеру Anycubic Photon Mono

3.4.3. Проблеми 3D друку SLA та їх вирішення

У процесі друку моделей за допомогою 3D-принтерів SLA може виникнути багато різних дефектів, проблем, для цього проводяться тестовий друк (Рис. 3.11). Було досліджено та усенено найпоширеніші варіанти дефектів:

- Деталь відліпає від платформи - необхідно збільшити час засвічення перших шарів на 30-50%. Довгий час засвічення дозволить надійніше закріпити основу на друкарській платформі. Якщо деталь липне не до платформи а до плівки у ванні можна зробити поверхню плівки більш електро-негативною, наприклад обробивши її концентрованим перекисом водню або азотною кислотою.
- Деталь відривається від підтримки, рветься у процесі друку - це відбувається за недостатнього часу засвічення основних шарів. Необхідно збільшувати час засвічення з кроком 2 секунди до отримання бажаного результату. Якщо деталь стає товстішою, а рельєф змашеною, слід зменшити час засвічення. Для більшості смол час засвітлення може бути збільшено на 10 секунд без втрати якості друку.

- Велика площа друку - під час друку об'єктів, які практично повністю займають друкарську платформу, необхідно збільшити товщину шару, а також час засвітлення кожного шару на 2-3 секунди. Також необхідно ретельніше готувати модель до друку, оскільки недостатня кількість підтримок може призвести до деформації виробу.
- Перший друк - існує кілька тестових моделей для фотополімерних принтерів, які дозволяють визначити правильність параметрів для кожного конкретного полімеру.



Рис. 3.11 Тестова модель для підбору параметрів 3D друку SLA

Після калібровки принтера в ванну наливається необхідна кількість фотополімеру. Перед заповненням, ванну слід очистити від пилу та змити жирові залишки ізопропиловим спиртом.

Для перевірки всіх налаштувань рекомендується друкувати кілька тестових моделей - це дозволить краще познайомитись із властивостями матеріалу та параметрами друку на конкретному принтері.

3.5. Розробка композитної суміші

Загальне використання технології SLA друку полягає в виготовленні високо деталізованих прототипів та дизайнерських виробів. Ця технологія є дуже затребуваною, тому дуже стрімко розвивається, з'являються нові види витратних матеріалів, які можуть задовольнити більше потреб виробництва. Ці матеріали мають багато переваг в порівнянні зі стандартними фотополімерними смолами, але й деякі недоліки та обмеження, а також високу ціну. В 2021 році існує невелика кількість композитних сумішей фотополімерних смол, які ще потребують вдосконалення. Альтернативою для отримання функціональних виробів є SLS друк, але недоліком цього методу є – висока ціна матеріалів та обладнання, складність та громіздкість обладнання. Розробка нових матеріалів та способів їх переробки у вироби – актуальне завдання для всіх галузей науки та техніки.

Для створення суміші було використано поліамід-12, який вже дуже гарно зарекомендував себе в якості витратного матеріалу для SLS 3D друку. Таким методом можна виготовляти деталі з дуже складною геометрією, які мають високу деталізацію та міцність. Проте слід враховувати, що в процесі SLS друку, необхідна дуже велика кількість матеріалу для заповнення резервуару відносно маси кінцевого виробу. Залишковий матеріал майже не використовується повторно. Це питання допомагає вирішити SLA друк. Вторинний поліамід-12, який було застосовано в процесі SLS друку, було використано для отримання композитної суміші з стандартною фотополімерною смолою.

3.6. Отримані вироби

Методом SLA 3D друку було отримано різні вироби складної просторової структури та з різним відсотком та структурою заповнення (Рис. 3.12).



Рис. 3.12 Вироби отримані 3D друком методом SLA з складною просторовою структурою.

Для дослідження фізико-механічних властивостей було розроблено 3D модель та надруковано вироби згідно зі стандартом ASTM D6110 (Рис. 3.13).



Рис. 3.13 Вироби для дослідження фізико-механічних властивостей

3.7. Аналіз отриманих даних

Для досліджень було використано фотополімер марки Anycubic призначений для створення тривимірних об'єктів на 3д принтері за технологією

LCD/DLP з довжиною хвилі до 405 нм. Адитивне виробництво дослідних зразків здійснювали на 3д принтері марки Anycubic Photon LCD. Для оцінки отриманих результатів вимірювань використовували як базу для порівняння зразки фотополімеру, отверджені у формі після вільного заливання (Табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Властивості базового зразка

№ п/п	Властивості	Значення
1	Міцність при розриві, МПа	34,5
2	Відносне видовження, при розриві, %	6,3
3	Ударна в'язкість, кДж/м ²	25,4
4	Твердість за Шор Д, од	96
5	Модуль пружності при згині, МПа	2156
6	Густина, кг/м ³	1196

Для постобробки дослідних зразків використовували камеру з УФ лампою потужністю 40 Вт, довжина хвилі 405 нм, відстань від джерела випромінювання до зразка – 10 см.

Основні технологічні параметри адитивного виробництва – тривалість засвічування одного шару варіювалась від 5 до 60с. Товщина шару складала 50мкм.

Визначали основні фізико-механічні властивості дослідних зразків - міцність та відносне видовження при розриві (ISO 527-2:2012), ударну в'язкість (ISO 179-1:2010), твердість за шкалою Шор Д (ISO 2039-1:2001), модуль пружності при згині (ISO 178:2010), а також густину (ISO 1183-1:2019) в рідкому та твердому станах. Результати досліджень представлені в таблиці 3.3.

Густина фотополімеру у рідкому стані становить 690 кг/м^3 - визначена пікнометричним методом при 20°C

Таблиця 3.3

Властивості дослідних зразків

№ п/ п	Властивості	Значення						
		Тривалість засвічування шару, с	Тривалість постобробки, хв					
			0	15	30	45	60	120
1	Міцність при розриві, МПа	10	7,61	19,5	20,2	27,7	28,3	27,8
		20	11,2	23,8	23,5	27,8	27,4	30,1
		30	13,5	24,5	25,6	27,5	27,9	29,5
		40	15,6	24,7	23,6	27,8	29,6	30,5
2	Відносне видовження, при розриві, %	10	8,0	8,5	3,8	8,6	8,2	6,3
		20	8,2	8,6	6,2	7,7	8,3	7,0
		30	8,5	8,3	6,5	7,4	7,4	8,2
		40	8,1	8,6	5,5	7,8	7,7	5,7
3	Ударна в'язкість, кДж/м ²	10	8,4	10,5	16,1	22,7	17,6	18,6
4	Твердість за Шор Д, од	10	88	90	92	93	94	95
5	Модуль пружності при згині, МПа	10	1240	1350	1480	1680	1760	1920
6	Густина, кг/м ³	10	1190,9	1194,5	1192,5	1197,6	1198,0	1199,0

Збільшення тривалості засвічування шару до 40с приводить до зростання міцності при розриві дослідних зразків практично в 2 рази. Тривалість постобробки суттєво впливає на значення міцності при розриві. Так постобробка зразка сформованого з тривалістю засвічування шару 10с на протязі 30 хв

дозволяє в 3 рази підвищити його міцність при розриві, а постобробка 60 хв – в 4 рази підвищує міцність. Такі зміни пов'язані з проходженням реакцій додаткової радикальної полімеризації в процесі постобробки. При зростанні тривалості засвічування шару виробу, тривалість постобробки має менш відчутний вплив на зміну міцності – всього в 2 рази, що зумовлено меншою інтенсивністю проходження реакції полімеризації в процесі постобробки через попереднє утворення сітчастої структури в процесі адитивного виробництва. Збільшення тривалості постобробки до 120 хв практично не впливає на зміну міцності зразків через відсутність вільних реакційноздатних молекул. Відносне видовження в незначній мірі змінюється при зміні тривалості засвічування шару та тривалості постобробки.

Ударна в'язкість дослідних зразків зростає практично в 2 рази при збільшенні тривалості постобробки до 60 хв. Також зростає твердість зразків та модуль пружності при згині, що вказує на підвищення жорсткості виробів зі зростанням тривалості постобробки. Таким чином, властивості готових виробів при адитивному виробництві можна регулювати шляхом зміни тривалості засвічування шару та тривалості постобробки.

Густина фотополімеру після дії УФ випромінювання зростає з 690 кг/м^3 до $1190,9 \text{ кг/м}^3$ в наслідок підвищення щільності упаковки макромолекул. В процесі постобробки значення густини зразка незначно зростає через додаткове проходження реакцій структурування. Зміна густини вказує на значення об'ємного усадження фотополімеру - чим більша зміна густини спостерігається, тим вище усадження фотополімеру, що варто враховувати на стадії 3д моделювання майбутнього виробу.

Порівнюючи властивості матеріалу, отвердженого під час адитивного виробництва та отвердженого у формі, слід зазначити, що більш високе значення міцності при розриві та модулю пружності спостерігається при

отвердженні в формі. Дане спостереження можливо пов'язане з розкладом фотоініціатору під час першої стадії адитивного виробництва, коли фотополімер частково отверджується у 3D принтері випромінюванням малої потужності. Подальша обробка в камері зумовлює додаткове отведження смоли, але частина фотоініціатору вже вступила в реакцію. При отвердженні в формі, фотоініціатор опромінюється випромінюванням більш високої потужності, ніж в принтері, що зумовлює одержання більшого ступеня зшивання.

Для вдосконалення фізико-механічних показників виробів отриманих методом адитивного виробництва SLA, щоб мати можливість функціонального використання виробів, було досліджено композитну суміш фотополімеру Anycubic 405nm UV Resin з поліамідом-12. Були використані дані дослідження оптимальних параметрів 3D друку та постобробки.

Таблиця 3.4

Властивості дослідних зразків з композитної суміші

№ п/п	Властивості	Значення	
		Тривалість засвічування шару, с	Тривалість постобробки, хв
		40с	60хв
1	Міцність при розриві, МПа	29,5	
2	Відносне видовження, при розриві, %	7,9	
3	Ударна в'язкість, кДж/м ²	27,1	
4	Твердість за Шор Д, од	97	
5	Модуль пружності при згині, МПа	2010	
6	Густина, кг/м ³	1200	

Властивості досліджених зразків фотополімеру та композитної суміші при здійсненні коректної постобробки наближаються або перевершують відповідні значення для промислових термопластів, таких як полістирол удароміцний та полістирол загального призначення (Табл. 3.4). Така особливість є важливим критерієм для застосування адитивних технологій виробництва для отримання функціональних деталей.

Технологія адитивного виробництва методом FDM вже давно зарекомендувала себе в сферах де необхідно отримання функціональних деталей, але деталізація при цьому значно менше ніж в SLA. Використовуючи дані досліджень можна затвердити, що вироби з фотополімерів майже досягли показників фізико-механічних властивостей виробів з дуже розповсюдженого матеріалу – ABS (Табл. 3.5). В таблиці наведені дані випробування виробів з ABS пластику отриманих методом пробування виробів з ABS пластику отриманих методом 3D друку FDM.

Таблиця 3.5

Властивості дослідних зразків з композитної суміші

№ п/п	Властивості	Значення
1	Міцність при розриві, МПа	35,5
2	Відносне видовження, при розриві, %	29,1
3	Ударна в'язкість, кДж/м ²	135,2
4	Твердість за Шор Д, од	97
5	Модуль пружності при згині, МПа	2500
6	Густина, кг/м ³	1050

3.8. Висновки до розділу 3

Досліджено зміну фізико-механічних характеристик при зміні параметрів друку та умов постобробки виробів з фотополімеру надрукованих на 3д принтері за технологією LCD з довжиною хвилі до 405 нм. Збільшення тривалості засвічування шару з 10 с до 40 с зумовлює зростання міцності при розриві зразків в 2 рази в наслідок збільшення числа утворених поперечних зв'язків в структурі фотополімеру. Постобробка після адитивного виробництва має ключовий вплив на фізико-механічні властивості виробу. Так після 60 хв постобробки зразки володіють в 4 рази вищим значенням міцності при розриві, ударна в'язкість зростає практично в 2 рази, що узгоджується зі збільшенням модулю пружності при згині в 1,4 рази.

Таким чином, раціональними технологічними параметрами адитивного виробництва виробів на основі акрилового фотополімеру є тривалість засвічування шару 10с та наступна постобробка виробу 60 хв.

Отриманий матеріал повністю задовольняє деталізації отриманих виробів та значно покращує їх фізико-механічні властивості. Вдосконалення рецептурного складу фотополімеру шляхом введення ударомодифікуючих добавок та використання суміші полімерних смол є перспективним кроком для подальших досліджень в даному напрямку.

РОЗДІЛ 4

Техніка безпеки та охорона праці в адитивному виробництві методом SLA

Технології роботи з фотополімерними смолами, такі як стереолітографія (SLA), раніше застосовувалися лише в зуботехнічних лабораторіях, інженерних відділах та виробничих підприємствах через високу вартість обладнання. Тепер, коли машини стали доступнішими, все більше звичайних користувачів застосовують SLA-технологію, що ставить під сумнів їхню безпеку.

Основна загроза фотополімерних смол полягає в тому, що вони можуть спричинити подразнення шкірних покривів при контакті. У деяких випадках зіткнення речовини з незахищеною шкірою призводить до опіків і пухирів, що може вимагати медичної допомоги. Якщо матеріали торкнуться очей, вони завдадуть непоправної шкоди.

Багато смол є сенсibilізаторами, а це означає, що тривалий їхній вплив іноді викликає легку алергічну реакцію. Хімічні речовини, що входять до складу більшості смол, є подразниками, які провокують появу дерматиту – запалення шкіри через відторгнення сторонніх елементів. Шкірні покриви швидко вбирають подібні хімікати, тому тривалий контакт зі складом або вплив великої дози можуть призвести до тяжких наслідків.

Ще одна проблема 3D-друку смолою – це забруднення атмосфери. Матеріал виділяє пари, потенційно знижуючи якість повітря у приміщенні (IQA). Погані показники IQA здатні спровокувати головний біль, втому або серйозніші реакції, такі як проблеми з диханням. Ці наслідки настають через леткі органічні сполуки (ЛОС) та інші дрібні частинки, що викликають запальну реакцію дихальних шляхів, що призводить до набряку або підвищеної чутливості.

Довгострокові ефекти від роботи з рідким полімером рідкісні, але суттєві:

- Якщо вдихати пари протягом тривалого часу, можуть виникнути хронічні захворювання дихальної системи.
- Деякі з речовин, що виділяються, імовірно є канцерогенами, тому є ймовірність, що вони здатні викликати рак після тривалого впливу.
- Постійний фізичний контакт може призвести до серйозної алергії.

Розділ 4.1. Стандарти та інструкції виробника

Більшість смол, які є на ринку, не становлять значної небезпеки. Компанії, які виробляють подібні матеріали, повинні дотримуватись державних стандартів та додаткових рекомендацій ISO 9001. Правила гарантують, що хімічні речовини, вироблені підприємствами, мінімально шкідливі. Однак деякі небезпечні елементи, такі як пари асфальту і синтетичні мінеральні волокна, що використовуються в скловолокні, як і раніше, широко застосовуються, і понад півмільйона робітників піддаються їх впливу.

Виробники зазвичай надають паспорти безпеки на матеріали (MSDS), в яких перераховуються будь-які проблеми зі здоров'ям. Наприклад, опіки рогівки від надмірного впливу на очі або нудота та блювання при ковтанні. Всі ці документи надаються для того, щоб забезпечити користувачам максимальну безпеку під час використання витратної сировини.

Деякі склади можуть бути небезпечнішими за інших для конкретних людей. Якщо людина не знає, чи має вона алергію на будь-які матеріали, слід діяти так, ніби вона є, і поводитися з продуктом з обережністю.

Розділ 4.2. Кроки із забезпечення безпеки

Декілька державних структур провели дослідження нешкідливості 3D-друку епоксидною смолою. Всі вони показали, що довгострокові викиди від друку в основному незначні, хоча, якщо не дотримуватися належних запобіжних

заходів, ризики існують. Оскільки дослідження виявили сліди небезпечних речовин при роботі зі смоляними складами, необхідно дотримуватись правил техніки безпеки [45].

Друк смолою безпечний при дотриманні належних запобіжних заходів:

- Насамперед, потрібно уникати прямого контакту рідини маси з будь-якою частиною тіла. Завжди слід носити захисні окуляри та рукавички з нітрилу чи латексу, щоб токсини не потрапили у вічі чи шкіру.
- Також необхідно переконатись, що робоче місце добре провітрюється. Вентиляція є критично важливим фактором для будь-якого 3D-принтера, але особливо для обладнання, яке друкує складами на основі смоли. Найкраще працювати під витяжним ковпаком, але якщо це неможливо, доцільно друкувати біля відкритого вікна з вентилятором.
- Перш ніж відкрити ємність із фотополімером, треба прочитати паспорт безпеки від виробника. Якщо є якісь особливі вказівки щодо застосування матеріалу, вони відображені в документі.
- Не можна зливати залишки або відходи в каналізацію, оскільки це здатне завдати шкоди довкіллю. Або утилізуйте його способом, рекомендованим виробником, або висушіть ультрафіолетовим світлом, доки маса не затвердіє.
- Сумарний час безпосередньої роботи з 3D-принтером протягом робочого дня має бути не більше 6 годин.
- Забороняється класти предмети на або в 3D-принтер.
- Забороняється залишати увімкнене обладнання без нагляду.
- Забороняється під час роботи 3D-принтера пити поруч будь-які напої, приймати їжу.
- Забороняється переміщувати та переносити 3D-принтер під час друку.

- Не допускайте сторонніх осіб, які не беруть участь у роботі, до 3D-принтера.

Після завершення процесу 3D друку необхідно:

- Вимкнути 3D-принтер від електромережі, для чого необхідно відключити тумблер на задній частині, а потім витягнути штепсельну вилку з розетки.
- Прибрати робоче місце. Залишки смоли прибратив окремий контейнер та витерти зі стола використовуючи ізопропиловий спирт.

Коли користувач знає, які ризики становлять смоляні склади, він убезпечиться від неприємності. При правильних запобіжних заходах немає причин уникати друку смолою на 3D-принтері.

Розділ 4.3. Пожежна безпека

Підприємцям, які планують задіяти 3D-принтери у практичній діяльності, слід знати основи безпечної праці. 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 [47].

Про всі обставини на робочому місці слід негайно повідомляти керівнику. Категорично забороняється експлуатувати периферійне обладнання у разі виникнення поломок. Ремонтні роботи мають право виконувати лише спеціалісти, які мають відповідний допуск.

В приміщеннях, де виконується друк, рекомендується встановити пожежну сигналізацію, а під рукою завжди мати вогнегасник.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено раціональні технологічні параметри адитивного виробництва методом SLA. Час засвічення ультрафіолетом шарів виробу впливає на фізико-механічні властивості. Для економії часу та кращих показників встановлено оптимальне значення 40 секунд засвічення довжиною хвилі 405nm для кожного шару. Час засвічення перших 3-х шарів – 60 секунд, для кращого закріплення виробу з платформою. Швидкість руху платформи залишається стандартною яка встановлена в програмі «слайсері». Час затримки платформи у верхньому та нижньому положенні підвищено до 5 секунд для композитної суміші для кращого розподілення матеріалу.
2. Виявлено залежності фізико-механічних властивостей від параметрів 3D друку та постобробки виробів. На загальну міцність виробу впливає степінь та структура заповнення тому 3D-надрукований об'єкт може мати різне подовження при розриві або жорсткість у напрямках X, Y та Z. Під час процесу 3D друку SLA смоли утворюють ковалентні зв'язки. Це забезпечує високий рівень поперечної міцності, але реакція полімеризації не доводиться остаточно. Швидше, процес друку модулюється таким чином, що шар утримується в напівреагуючому стані, званому «зеленим станом». Цей зелений стан відрізняється від повністю затверділого стану одним дуже важливим фактором: на поверхні все ще залишаються групи, що полімеризуються, тому наступні шари можуть утворювати ковалентні зв'язки. Коли наступний шар твердне, реакція полімеризації включає групи в попередньому шарі, утворюючи ковалентні зв'язки не тільки в бічному напрямку, але і з попереднім шаром. Це означає, що на молекулярному рівні практично немає відмінностей між віссю Z та площиною XY з погляду хімічних зв'язків. Кожна безперервна деталь надрукована на машині SLA є ізотропною. Ізотропія має як механічні, так і оптичні

переваги. Ізотропні деталі ідеальні для інженерного прототипування, оскільки вони відображають діапазон властивостей, пов'язаних із звичайними термопластами, отриманими литтям під тиском, і не страждають від розшарування або поверхневої пористості. Процес хімічного зв'язування та відсутність видимих ліній шарів усередині деталей дозволяє друкувати оптично чисті деталі.

3. Досліджено фізико-механічні властивості виробів, отриманих методом адитивного виробництва з фотополімерної суміші наповненої поліамідом-12. Композитна суміш фотополімерної смоли з поліамідом-12 дає можливість отримувати функціональні вироби з високими фізико-механічними властивостями в порівнянні з стандартними фотополімерами. При цьому деталізація та якість поверхні виробів не погіршується. В порівнянні зі звичайним полімером спостерігається підвищення міцності при розриві, ударної в'язкості, та модуля пружності при згині. Виявлено проблему осадження поліаміду-12 в композитній суміші. Для уникнення цього процесу в суміш було додано антиосаджувальну добавку та змішування виконувалось в лабораторному міксері.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Слюсар, В.І. (2003). Фабер-технології. Новий засіб тривимірного моделювання. Електроніка: наука, технологія, бізнес. – 2003. – № 5. с. С. 54-60.
2. The Economist. "3D printing scales up". 5 September 2013.
3. «Statistic». «Most used 3D printing technologies» 2 грудня 2018.
4. Petros Bangeas, Lazaros Tzounis 3D printing and nanotechnology ISBN: 9780323661935
5. Leandros Savvides Approaching 3D printing ISBN: 978-1-80071-666-7
6. Пчелінцев В. О. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів [Текст]: навч. посіб. / В. О. Пчелінцев, О. І. Дегул. - Суми: СумДУ, 2012. - 247 с. - ISBN 978-966-657-449-0
7. Фрідман Я. Б. - Ч. 2: Механічні випробування. Конструкційна міцність. - М: Машинобудування, 1974. - 368 с.
8. ГОСТ 28840-90 Машини для випробування матеріалів на розтяг, стиснення та вигин. Загальні вимоги.
9. В.К.Грищенко, О.Ф.Маслюк, С.С. Гудзера Рідкі композиції, що фотополімеризуються, К.: Наук. Думка, 1985 Radiation Curing Primer I: Inks, Coatings and Adhesives, Second Edition, C.J.Kallendorf, ed., RadTech International North America, 1991
10. Cooper, Kenneth G., 1973- (2001). Rapid prototyping technology : selection and application. New York: Marcel Dekker. 39–41.
11. Wang, Ben (27 January 1999). Concurrent Design of Products, Manufacturing Processes and Systems. CRC Press. ISBN 978-90-5699-628-4.
12. Жан-Клод, Андре. «Пристрій для виготовлення моделі промислової деталі».

13. How Stereolithography Works. THREE3D.com. Архів оригіналу за 21 лютого 2014. Процитовано 4 February 2014.
14. Stereolithography. Архів оригіналу за 14 лютого 2008. Процитовано 22 липня 2014.
15. Зленко М.А., Попович А.А., Мутіліна І.М. Адитивні технології у машинобудуванні. – Санкт-Петербург: Видавництво політехнічного університету. – 2013.
16. В.Слюсар (2008). Фабрика в кожному будинку. Навколо світу. - № 1. – Січень, 2008.
17. Огірко І. В., Дуб Я. І., Ясінський М. Ф. Дослідження пружно-деформованого стану фотополімерної форми на основі рівнянь теорії пружності // 1989. — №25.
18. Снук, Г. 3D-ландшафти в реальному часі на C++ та DirectX 9. - 2-ге вид. - М.: Кудіц-прес, 2007. - 368 с.
19. Херн Д., Бейкер М.П., Комп'ютерна графіка та стандарт OpenGL. - 3-те вид. - М: Вільямс, 2005. - 1168 с.
20. К. Афанасьєв, 3D-принтери, - [Електронний ресурс] URL:<http://www.3dnews.ru> (дата звернення 24.01.2017)
21. 3D-друк: третя індустріально-цифрова революція. Частина 1, -[Електронний ресурс] URL: <http://bloggerator.ru> (дата звернення 24.01.2017)
22. 3D моделі. ж: Blackie, Липень №24, С-П, 2013 - [Електронний ресурс] URL: <http://3dtoday.ru/3dmodels-2/soft3d/784> (дата звернення 24.01.2017)
23. 3D-принтери у медицині. Сьогодні та майбутнє, - [Електроннийресурс] URL:

- <http://medicena.ru/blogpost/3d-printeryi-v-meditsine-ihnastoyashhee-ibudushhe/> (дата звернення 24.01.2017)
24. Иванов, В.П., Тривимірна комп'ютерна графіка/За ред. Г.М. Поліщук. - М: Радіо і зв'язок, 1995.
 25. Лі, Дж., Уер, Б. Тривимірна графіка та анімація. - 2-ге вид. - М: Вільямс, 2002.
 26. Валетов В.А. Адитивні технології. Стан і перспективи (Адитивні технології). Status and prospects, Saint-Petersburg, Університет ІТМО, 2015, 63 р.
 27. Зленко М.А., Нагайцев М.В, Довбиш В.М. Адитивні технології у машинобудівництві (Additive technologies in machine engineering), Moscow, Nami, 2015, pp. 209.
 28. Гібсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологія адитивного виробництва. Трьохвимірний друк, швидке прототипування і пряме цифрове виробництво (Additive production technologies. 3D printing, rapid prototyping and direct digital production), Москва, Tekhnosfera, 2016, 656 р.
 29. Шішковській І.В. Основи адитивних технологій високого розрішення (Principles of high-resolution additive technologies), Saint-Petersburg, 2015.
 30. Пластик для 3D друку, інтернет-ресурс: <http://250041.ua.all.biz/plastikdlya-3d-pechati-podderzhki-hips-g8707738> (accessed: 19.01.2017).
 31. Моделирування методом наплавлення, інтернет-ресурс: <http://can-touch.ru/blog/fuseddeposition-modeling> (accessed: 19.01.2017).
 32. Выборочне лазерне спікання, інтернет-ресурс: http://3dtoday.ru/wiki/SLS_print/ (20.01.2017).
 33. Обзор виробника розхідних матеріалів для FDM 3D-друку, інтернет-ресурс: <http://geektimes.ru/post/231299/> (accessed: 20.01.2017).

34. Литунов С.Н., Слободенюк В.С., Mel'nikov D.V. Омський научний вісник. 2016, no 1 (145), pp. 12–17.
35. Технології адитивного виробництва металічних виробів, інтернет-ресурс: <http://geektimes.ru/post/218271/> (accessed: 21.01.2017).
36. Алмазов А.Б., Павлоцький І.П. Імовірнісні методи теорії полімерів. М., наука, 1971.
37. Аскадський А.А., Матвєєв Ю.І. Хімічна будова та фізичні властивості полімерів. М., Хімія, 1983.
38. Бартенєв Г.М., Зеленєв Ю.В. Фізика та механіка полімерів. М., Вища школа, 1983.
39. Ван Кревелен Д. Властивості та хімічна будова полімерів. М., Хімія, 1976.
40. Гольберг І.І. Механічна поведінка полімерних матеріалів. М. Хімія, 1970.
41. Грассі Н., Скотт Дж. Деструкція та стабілізація полімерів. М., Світ, 1988.
42. Бартенєв Г.М., Зеленєв Ю.В. Курс фізики полімерів. Л. Хімія, 1976, 288 с.
43. Бартенєв Г.М., Френкель С.Я. Фізика полімерів Л., Хімія, 1990, 432 с.
44. Беспалов Ю.А., Коноваленко Н.Г. Багатокомпонентні системи на основі полімерів. Л. Хімія, 1981.
45. Богданов В.В. Методи дослідження технологічних властивостей пластмас. Л., 3-во ЛДУ, 1978.
46. Богданов В.В. Змішування полімерів. Л. Хімія, 1982.
47. Бокін Н.М., Циплаков О.Г. Розрахунок та конструювання деталей із пластмас. М.-Л., машинобудування, 1966.
48. Біляков, Г.І. Охорона праці та техніка безпеки: Підручник для прикладного бакалаврату/Г.І. Біляків. – Люберці: Юрайт, 2016. – 404 с.

49. Бурашніков, Ю.М. Безпека життєдіяльності. Охорона праці на підприємствах харчових виробництв: Підручник/Ю.М. Бурашніков, А.С. Максимів. – СПб.: Лань, 2017. – 496 с.
50. Бадагуєв, Б.Т. Пожежна безпека на підприємстві: Накази, акти, інструкції, журнали, положення/Б.Т. Бадагуєв. - М: Альфа-Прес, 2018. - 488 с.