

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

на здобуття освітнього ступеня «Магістр»

за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»

на тему:

«Підвищення ефективності виготовлення деталей із пластика методом 3D
друку»

«Improving the efficiency of manufacturing plastic parts by 3D printing»

Виконавець: ст. гр. ТМ-20М

_____ Мкртчян С.М.

Керівник: к.т.н., ст. викл.

_____ Єрьомін П.М.

Рецензент:

Зав. каф. ММіР

_____ Гречка А.І.

Анотація

Мкртчян С.М. Підвищення ефективності виготовлення деталей із пластика методом 3D друку. Вип. квал. роб. – ЦНТУ, 2021. – 68 с., іл., 18 бібліогр., _8_ арк.

В випускній кваліфікаційній роботі доказана можливість підвищення ефективності виготовлення деталей із пластика методом 3D друку за рахунок використання вдосконаленого процесу. Досліджено стан питання о використанні технології 3D-друку FDM при виготовленні різноманітних виробів із технічних пластиків. Розроблено поліпшену методику дослідження якості виготовлених виробів, а саме відповідності їх реальних геометричних розмірів заданим у 3D-моделі. Розроблено рекомендації по режимам друку та методам виготовлення деталей із пластика. Обрано необхідне обладнання для виконання даної операції. Проведено техніко-економічне обґрунтування процесу 3D-друку, який був вдосконалений на основі використання розроблених рекомендацій. Розроблена методика дозволить отримати у користувача річний економічний ефект у розмірі 130000 грн.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	131 Прикладна механіка
Освітньо-наукова програма	Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ	
Завідувач кафедри ММіР	
	А.І. Гречка
«___» _____	2021 р.

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Мкртчяна Саята Мкртчювича (прізвище, ім'я, по батькові)	
1. Тема роботи:	Підвищення ефективності виготовлення деталей із пластика методом 3D друку
2. Керівник роботи:	к.т.н., ст. викл. Єрьомін П.М.
3. Строк подання роботи до захисту	___ грудня 2021 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є підвищення ефективності виготовлення деталей із пластика методом 3D друку за технологією осадження розплавленої нитки (FDM) в умовах одиничного та мілкосерійного виробництва.

Завдання:

- дослідити стан питання о використанні технології 3D-друку FDM при виготовленні різноманітних виробів із технічних пластиків;
- розробити методику дослідження якості виготовлених виробів, а саме відповідності їх реальних геометричних розмірів заданим у 3D-моделі;
- розробити рекомендації по режимам друку та методам виготовлення деталей із пластика;
- обрати необхідне обладнання для виконання даної операції;
- провести техніко-економічне обґрунтування процесу 3D-друку, який був вдосконалений на основі використання розроблених рекомендацій;
- розрахувати економічну ефективність від впровадження результатів проведених досліджень;
- розглянути питання організації та забезпечення заходів з охорони праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Науково-дослідний	Єршомін П.М.		
Організаційно-економічний	Журило І.В.		
Охорона праці	Бевз О.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	Вересень 2021	вик.
2.	Вступ	Вересень 2021	вик.
3.	Мета та задачі роботи	Вересень 2021	вик.
4.	Методика роботи	Жовтень 2021	вик.
5.	Теоретична робота	Жовтень-листопад 2021	вик.
6.	Висновки	Листопад 2021	вик.
7.	Визначення економічної ефективності	Листопад 2021	вик.
8.	Охорона праці	Листопад 2021	вик.
9.	Оформлення роботи	Грудень 2021	вик.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2021 р.

Керівник роботи		П.М. Єршомін
	(підпис)	

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2021 р.

Студент		С.М. Мкртчян
	(підпис)	

ЗМІСТ

Вступ	1
.....	
1. Стан питання, мета та задачі випускної кваліфікаційної роботи	3
1.1 Розвиток 3D друку та його можливості	3
1.2 FDM-технологія 3D друку, її переваги та недоліки	7
1.3 Найбільш розповсюджені витратні матеріали для 3D друку	9
1.4 Проблеми якості деталей із пластику, виготовлених методом 3D друку	18
1.5 Висновки, мета і задачі роботи.....	19
2. Методика проведення досліджень та обробки результатів експериментів	20
2.1. Порівняння традиційного методу лиття пластику під тиском та технології FDM	20
2.2. Характеристики принтера DELTA	23
2.3. Призначення та механічні властивості досліджуваних матеріалів	24
2.4. Розробка технології виготовлення деталей на 3D принтері DELTA і вимірювання надрукованих моделей об'єктів	24
3. Аналіз результатів дослідження та розробка вдосконалених рекомендацій для 3D друку деталей із пластика	30
3.1. Результати вимірювання лінійних розмірів контрольних зразків із досліджуваних матеріалів	30
3.2 Порівняльний морфологічний аналіз моделей і оригіналів зразків	32
3.3 Рекомендації із застосування витратних матеріалів та вибір оптимальних параметрів друку ...	37
3.4 Рекомендації щодо вибору обладнання для 3D друку	41
3.5 Алгоритм 3D друку за технологією FDM	45
3.6 Висновки по розділу	46
4. Економічне обґрунтування ефективності виготовлення деталей із пластику методом 3D-друку.....	49

4.1. Загальні вихідні дані	49
4.2. Визначення витрат на підготовку виробництва деталі	51
4.3. Розрахунок експлуатаційних витрат у розрахунку на одиницю продукції в базовому та проектному варіантах	52
4.4. Розрахунок показників економічної ефективності	58
5. Охорона праці	60
5.1. У чому суть топографічних, монографічних, економічних та ергономічних методів аналізу травматизму	60
5.2 Вимоги безпеки під час виготовлення деталей із пластика	61
5.3 Пожежна сигналізація. Засоби виявлення пожежі та сповіщення про пожежу	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67

ВСТУП

Актуальність теми

Розвиток сучасних технологій передбачає розбудову нових та корінну технічну реконструкцію вже існуючих промислових підприємств, проведення якої вимагає випереджального розвитку машинобудівного комплексу. Досить важлива роль у рішенні цього завдання приділяється новітнім та прогресивним технологіям, які можуть забезпечити значне підвищення продуктивності праці, якості і експлуатаційних властивостей вироблюваної продукції, а також економію енергетичних та матеріальних ресурсів. Сучасні адитивні (від англійського слова additive – додавання) технології принципово відрізняються від традиційних методів обробки тим, що виріб створюється «з нуля» методом додавання матеріалу, а не його видаленням із заготовки різальними інструментами. Таким чином можна значно досягти значної економії витратних матеріалів, тому що вони пошарово накладаються (або друкуються) саме там, де це потрібно, тим самим формуючи об'єм створюваної деталі. Причому матеріалом для 3D-друку можуть бути не тільки технічні пластики різних марок, а й мілкодисперсні порошкоподібні метали, які потім спекаються за допомогою потужних лазерів. Сам принцип 3D-друку базується на методах керування виконавчим органом, подібних до багатокоординатних верстатів з ЧПУ, тільки в цьому випадку матеріал наноситься з певною швидкістю за певною траєкторією (технологія FDM). Такі технології за останні роки отримали надвелику популярність саме за рахунок ефективності та можливості створити в умовах одиничного або мілкосерійного виробництва фізичні моделі, макети та готові вироби із різноманітних матеріалів, вартість яких значно менша, ніж деталей, виготовлених традиційними методами із чорних та кольорових металів та сплавів.

Також можна відмітити, що в сучасних конструкціях стрімко зростає доля неметалевих деталей, що дозволяє окрім економії дефіцитних та коштовних металів знизити вагу виробу, підвищити його стійкість до корозії та ефективно утилізувати виріб після кінця строку його експлуатації. Використання сучасних витратних матеріалів під час 3D-друку дозволяє

створювати деталі, механічні властивості яких практично не поступаються деталям, виготовленим методом лиття або відрізання від заготовки.

Тому ми вважаємо, що 3D-друк є прогресивною сучасною технологією, а підвищення ефективності виготовлення деталей із пластику різних типів є актуальною тематикою та потребує подальшого розвитку.

1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧИ ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1.1. Розвиток 3D друку та його можливості

Індустрія 3D друку бере свій початок в кінці 1980-х років XX сторіччя (хоча слід відмітити, що вона стартувала з окремих початкових експериментів в 1970-х роках, але ці експериментальні машини мали велику вартість і їх використовували лише професіонали). Поточне поширення нової технології 3D друку обумовлено появою можливості використовувати матеріали патентів для FDM, що втратили терміни дії. Fused Deposition Modeling – перекладається як «моделювання методом осадження розплавленої нитки», тобто коли об'єкт будується шар за шаром за допомогою розплавленого пластику, який видавлюється із каліброваного отвору розігрітого металевого сопла друкуючої голівки принтера (як зображено на рисунку 1.1) [].

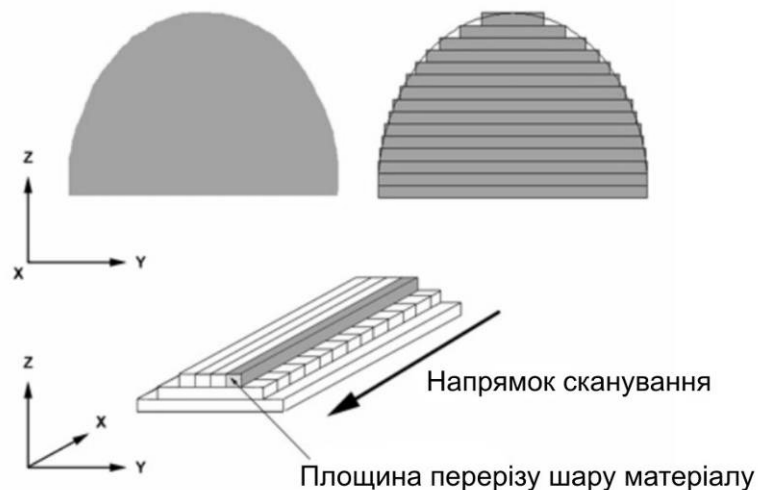


Рисунок 1.1 – Пошаровий друк 3D моделі методом FDM

Нові технології друку також отримали подальший розвиток від реалізації проектів з відкритими вихідними кодами (наприклад, програмний та апаратний Arduino) і від вільного обміну між ентузіастами 3D друку цифровими файлами на спеціалізованих ресурсах через мережу Інтернет.

Програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом дозволяє користувачу розробляти тривимірні об'єкти, а також керувати 3D принтерами для друку створених об'єктів, причому існує велика кількість доступних посібників та інструкцій з використання цих програм. Витратним матеріалом для більшості сучасних 3D принтерів служить біорозкладний пластик PLA (Polylactic acid - полімолочна кислота), екологічно чистий матеріал, який отримується з кукурудзяного крохмалю, або ABS (Acrylonitrile butadiene styrene - акрілонітріл-бутадієн-стирол) полімер, отриманий з нафти. Останній зазвичай використовують для виробництва автомобільних бамперів через його міцність і жорсткість, а також з нього роблять різні пластикові деталі для техніки. Пластикові нитки плавяться при температурі від 170...250°C, і укладається за певною траєкторією таким чином, щоб створити необхідну кількість шарів матеріалу. Такі шари у підсумку утворюють цілісний надрукований 3D об'єкт. Результатом може бути практично будь-який об'єкт відносно невеликого розміру, наприклад корпус медичного приладу для магнітної терапії [1].



Рисунок 1.2 – Надрукований на 3D принтері корпус медичного прибору для магнітної терапії

Єдиним обмеженням для цієї альтернативної технології є обмеження розмірів друкованого об'єкта (зазвичай біля 200x200x200 мм), що пояснюється економією на складових частинах виконавчих пристроїв. Проте, великий 3D об'єкт може, в принципі, бути зібраний з декількох окремих пластикових деталей. Ще одна велика перевага в тому, що весь цей процес виробляє набагато менше відходів, ніж традиційні виробництва, де велика кількість матеріалу обрізується від використовуваної частини.

Портативні 3D принтери можуть виготовляти на замовлення деталі і запасні частини або унікальні елементи, що підлягають зборці в міру необхідності і досить швидко. На рис. 1.3 показано дуже популярну серед дітей та підлітків компактну 3D ручку, за допомогою якої можна власноруч створити невеликі та нескладні об'ємні фігурки або предмети.



Рисунок 1.3 – Комплект 3D ручка та пластик PLA для друку

Складні невеликі 3D об'єкти (розміром з брелок для ключів) можуть бути створені швидше ніж за годину і результат вражаючий: вони міцні, дуже легкі (важать всього по кілька грам) і досить дешеві, так як ціна PLA пластика сьогодні складає близько 250-280 гривень за 1 кг, а одного кілограма цього матеріалу досить щоб створити 10-20 дрібних об'єктів.

На даний час велика кількість 3D принтерів та програмного забезпечення для них, а також доступна ціна пристроїв роблять 3D друк технологією, яка стала доступна для широкої аудиторії. Вартість нового покоління 3D принтерів, заснованих на апаратних засобах з відкритим вихідним кодом варіюється від 50 до 1500 доларів США, і вони можуть бути придбані через Інтернет у спеціалізованих магазинах або зібрані самостійно із покупних деталей та вузлів. Такі принтери можуть бути використані як для домашнього друку об'єктів, для невеликих дослідних лабораторій в університетах і школах для створення навчального матеріалу, без необхідності вкладати багато грошей, а на професійних моделях вже друкуються повноцінні деталі для різноманітних машин. 3D друк відкриває нові можливості, неможливі раніше для творчого виробництва. Така передова адитивна технологія відкриває нові перспективи для науки, освіти та виробництва і надає помітний вплив в багатьох розвинених країнах. Доступна ціна технології, а також величезна кількість 3D об'єктів для друкування у вільному доступі (як правило у форматі *.STL) вже в даний час

роблять новітні 3D принтери привабливою технологією для широкого кола користувачів.

3D друк стрімко розвивається і зростає в глобальному масштабі завдяки багатьом перевагам і доступними цінами. Він застосовується у сферах освіти, охорони здоров'я, археології та інженерного мистецтва, 3D принтери вже надають практичний вплив по всьому світу. 3D друк поширюється від виробництва протезів, в будь-який час і в будь-якому місці (зроблені на замовлення ноги, руки, кисті і т.д. для вивчення школярами будови людського тіла) до друку клітин шкіри безпосередньо для рани або друк оправ для окулярів (які ламаються частіше, ніж лінзи).

На освітньому фронті вчені можуть надрукувати 3D об'єкти, засновані на геометричних формулах для кращої візуалізації складних структур. Концептуальне знання може отримати переваги від можливості технології 3D друку виготовляти різні об'єкти, скорочуючи час, витрачений на розробку приватного рішення, а потім оцінити результат. З 3D технологією можна навчатися швидше за допомогою практики і бути більш продуктивним, використовуючи досвід інших спеціалістів з цієї справи.

3D друк реконструює археологію, забезпечуючи можливість копіювання, за необхідності, кісток древніх істот і скам'янілостей. Інші об'єкти великої історичної цінності, такі як клинописні таблички і монети, також можуть бути скопійовані. Є тенденція, в недалекому майбутньому, отримати більші принтери, які могли б виробляти найрізноманітніші вироби, починаючи від сувенірів до будівель, в контексті сталого розвитку. Вартість доставки запчастин в деяких країнах часто дуже дорога, проте, звичайна посилка або завантаження маленьких файлів даних з необхідним програмним кодом (таких як електронна пошта, аудіо, зображення або відео файли) корисних для країн 3D об'єктів, які тепер можна надрукувати за прийнятною вартістю у віддаленому регіонах світу.

1.2 FDM-технологія 3D друку, її переваги та недоліки

Найпростіший з процесів «струменевого» об'ємного друку – це так званий Fused Deposition Modeling (FDM). Ідея FDM дуже проста – друкуюча голівка видавлює на охолоджувану платформу-основу краплі розігрітого термопластика (в якості матеріалу може використовуватися практично будь-який промисловий термопластик). Краплі швидко застигають і злипаються одна з одною, формуючи шари майбутнього об'єкта (друк тут теж ведеться по шарам). Технологічний процес FDM дозволяє з досить високою точністю (мінімальна товщина шару 0,12 мм) виготовляти повністю готові до використання деталі досить великого розміру (у спеціалізованих промислових

принтерах до 700x600x500 мм). При використанні сучасних адитивних технологій всі етапи реалізації вашого проекту від початкової ідеї до фізичної матеріалізації (у будь-якому вигляді - у проміжному стані або у вигляді готового виробу) перебувають в сприятливому технологічному середовищі, у одному технологічному ланцюзі, у якому кожна технологічна операція виконується в цифрових CAD/CAM/CAE-системах. Практично це означає перехід до так довго очікуваної «безпаперової» технології, коли для виготовлення потрібної деталі паперових креслярських та технологічних документів не потрібно взагалі.

Основи цієї технології була розроблені ще у 1988 році С. Крапом. Першою принциповою схемою FDM принтера (рис. 1.4), яка стала масовою, був принтер RepRap. RepRap (Replicating Rapid Prototyper – самовідтворюваний механізм для швидкого виготовлення прототипів) – ініціатива інженерів з 3D друку, спрямована на створення самокопіюючого пристрою, який може бути використаний для швидкого створення об'єктів за технологією FDM.

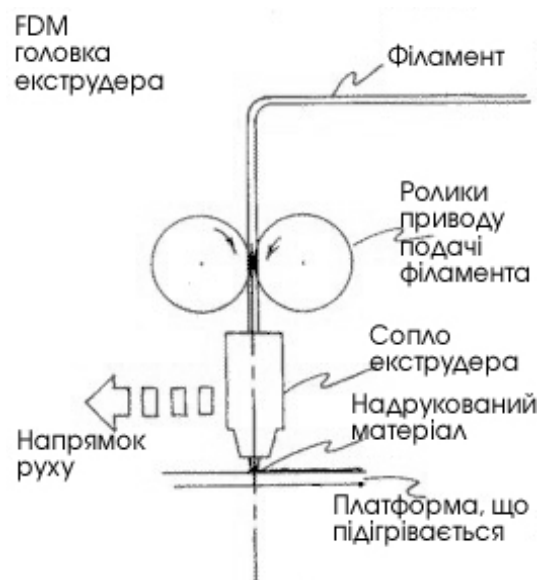


Рисунок 1.4 – Принцип роботи FDM-3D принтера

Однією з цілей проекту є «самокопіювання», яке визначається авторами як здатність апарату відтворювати компоненти необхідні для створення іншої версії себе. Відкритий проект RepRap був офіційно заснований в 2005 році. Всі креслення і схеми безкоштовно поширювалися через мережу Інтернет. Для того щоб принтер міг копіювати сам себе, розробники максимально спростили схему, пожертвувавши дизайном і якістю готових виробів. RepRap – це відкритий проект для ентузіастів, які мріють створити принтер, здатний відтворювати собі подібні пристрої. Поява динамічного попиту стрімко розвинула ринок пластика, основна частина якого вже створена та виробляється у Китаї. В цієї країні присутній практично весь арсенал необхідного пластика,

тому їм залишалося тільки почати екструдувати його в нитку і намотувати на бобіни.

На жаль, для друку виробів різними кольорами, а також різними видами пластиків необхідно дуже багато місця для зберігання бобін з ниткою. Також на сьогоднішній день достатньо складно друкувати одночасно сумішню пластиків різних видів, тому що це значно ускладнює конструкцію 3D принтерів та їх налаштування.

1.3 Найбільш розповсюджені витратні матеріали для 3D друку

На даний час існують два види пластику, які широко використовуються для недорогого 3D друку та декілька трохи менш розповсюджених. Слід відмітити, що на даний час розробляються і проходять практичне тестування багато видів пластику, що мають куди більше широкий діапазон фізичних, хімічних і механічних характеристик ніж PLA та ABS, що відкриває ще більший простір до використання 3D друку в різних напрямках, зокрема виготовлення пластикових деталей для вторинного ринку запчастин. Доступ до нових витратних матеріалів для друку може значно змінити ринок витратних матеріалів.

Пластикові нитки виробляються у двох розмірах: Ø1,75 та 3,0 мм. Трьохміліметровий філамент – це більше старий стандарт, він поступово витісняється ниткою діаметром 1,75 мм, що видавлюється набагато легше, управляється набагато краще та залишає менше облою з боків вашого виробу. Але розмір Ø3,0 мм ще остається актуальним для 3D принтерів великих розмірів в тих випадках, коли треба створити габаритні деталі зі значним об'ємом пластику. Деякі моделі сучасних принтерів в якості опції можуть додатково використовувати 3 мм нитку, і доволі часто вона коштує набагато дешевше ніж 1,75 мм.

1.3.1 Полілактид (PLA) є найпоширенішою пластиковою ниткою, зробленою із полімолочної кислоти (або з полілактиду (PolyLactide Acid) - скорочено PLA). Це біологічно розкладний екологічний пластик, одержуваний із крохмалю. Температура плавлення лежить в PLA межах 180...230°C. Якісний PLA не має неприємного запаху під час друку і його випари відносно безпечні, тому зазвичай не потрібно спеціальних заходів безпеки або примусової вентиляції. Він добре тримається на підставці для друку при температурі 20...30°C, завдяки чому не потрібна основа (платформа, на якій друкується виріб) з підігрівом для принтера. При цьому платформу потрібно покривати спеціальною плівкою, яка коштує відносно недорого, але її потрібно час від часу замінити - головним чином, тому, що вона іноді одержує ушкодження під

час відокремлення надрукованого об'єкта із платформи за допомогою шпателью або ножа.

Об'єкти, надруковані з PLA, міцні, але відносно крихкі, і не можуть використовуватися при високих температурах (як для деяких частин самого 3D принтера). Також з часом цей пластик розпадається під дією сонячних променів або води, тому надруковані об'єкти потрібно захищати від їх дії. Нитка PLA досить недорога, її вартість у середньому 250-280 грн. за 1 кг, і вона звичайно продається в котушках по 0,75 кг. Деякі виготовлювачі продають її на метраж. Вона доступна в природному (білий матовий) кольорі або в безлічі яскравих кольорів, чистих або напівпрозорих. Надруковані з PLA об'єкти мають гарну гладку поверхню та привабливий зовнішній вигляд. Температура експлуатації від -10°C до +60°C. На рисунку 1.5 представлено декоративну вазу з PLA-пластику, яку було надруковано за методом «в одну нитку».



Рисунок 1.5 – Декоративна ваза з PLA-пластику

Існує також спеціальний варіант PLA - м'який або еластичний (soft/flexible) PLA, який може екструдуватись при більш низькій температурі та

дуже низької швидкості. Він може використовуватися для друку гнучких зчленувань, стрічок, шин, і т.д.

1.3.2 Матеріал АБС (ABS)

Друга найпоширеніша нитка, виготовляється з акрилонитрилбутадиенстирола (Acrylonitrile Butadiene Styrene) – скорочено ABS. Цей матеріал має в своїй основі продукти переробки нафти, і використовується для різних цілей, наприклад для виготовлення кузовних деталей для автомобілів. Пари ABS мають неприємний хімічний запах і вони вважаються небезпечними для здоров'я, тому рекомендується використовувати примусову вентиляцію для відводу продуктів плавлення пластику, коли друк ABS триває довгий час та добре провітрювати приміщення. Температура плавлення ABS складає біля 210...260°C.

Філамент ABS коштує приблизно стільки ж, як PLA і є також досить розповсюдженим матеріалом для друку, незважаючи на його більше високі вимоги до налаштування принтера. Об'єкт з ABS звичайно друкується на основі з підігрівом (температура площадки повинна бути у межах 180°C), яка покрита каптоною плівкою для кращого зчеплення пластику з основою. Принтери для друку ABS коштують дещо більше, тому що вони більш технічно складні. Є проміжне рішення - це друк матеріалом ABS на холодній основі, яка заздалегідь покрита декількома шарами спеціального клею, наприклад цианоакрилат, лак для волосся або клей на водній основі типу ПВА. Але все ж таки більше використовують саме основу з підігрівом, тому що це допомагає зменшити деформацію відносно великих об'єктів, що друкуються.

Перевага матеріалу ABS у порівнянні з PLA полягає в тому, що об'єкти, що друкуються з цього матеріалу, більше міцні та менш тендітні, вони можуть витримувати більш високі температури. Вироби з ABS, надруковані із заповненням 75-100%, вже цілком успішно можуть використовуватися як деталі для саморобних пристроїв, іграшок для підлітків та як заміників пластикових деталей, виготовлених методом лиття у термопластавтоматах. Нитка ABS звичайно доступна в багатьох кольорах, включаючи блискучий, світлий у темряві, золотий, срібний, і навіть колір, що змінюється під впливом температури (наприклад, синій/зелений нижче 30°C и жовтий/зелений вище цього порогу). Все це робить об'єкти, надруковані такою ниткою, чутливими до температури тіла. На рис. 1.6 представлено приклади виробів, надруковані з ABS пластику на основі готових 3D моделей. Температура експлуатації виробів з ABS пластику лежить у діапазоні від -10 до +90°C.



Рисунок 1.6 – Вироби із ABS пластика

1.3.3 Нейлон

Фірма Taulman виробляє нитку 618 Nylon®, що має кілька цікавих особливостей, а саме – гнучкість, легкість і стійкість до хімічного впливу. Вона повинна видавлюватися при більшій високій температурі в порівнянні з PLA або ABS (приблизно 245°C), але вона не має випарів, і добре тримається на синій стрічці. Нейлон використовується для друку механічних деталей, яким необхідна висока стійкість до ушкоджень і дуже низьке поверхнєве тертя. Інша дуже цікава можливість цього матеріалу - використання для друку замовлених протезів і деталей, пов'язаних з медициною, тому що нейлон інертний по відношенню до тканин тіла (але офіційно це не підтверджене медичними сертифікатами, принаймні, поки). Вартість нейлової нитки у два рази більше, ніж вартість PLA або ABS, єдиний доступний колір білий (природний). Температура експлуатації складає від -40 °C до +140 °C. Суттєвим недоліком філаменту з нейлону є те, що він потребує спеціальних умов зберігання та боїться вологи (інакше вироби з нейлону практично одразу розшаровуються та стають непридатними для використання). Приклад такого розшарування показано на рисунку 1.7



Рисунок 1.7 – Нейлоновий вкладиш для кулько-гвинтової передачі, який розтріскався внаслідок використання філаменту з підвищеною вологістю

1.3.4 Полікарбонат (PC)

Полікарбонат (Polycarbonate - PC), дуже міцний і довговічний пластмасовий матеріал з високою оптичною прозорістю та високою температурою плавлення (приблизно 270...300°C). Полікарбонат використовується в багатьох промислових виробництвах. Перші тести з дешевими 3D принтерами, друкуючим з полікарбонату, почалися тільки нещодавно і поки є не так вже й багато виробників PC нитки, що продають її досить дорого (приблизно 870 грн. за кілограм). Температура експлуатації до 120°C.

1.3.5 ПВС (PVA)

Полівініловий спирт (Polyvinyl Alcohol - PVA) – розчинний у воді пластмасовий полімер, що може використовуватися для друку підтримуючих опор (для PLA і ABS об'єктів), що легко розчиняються в теплій воді, залишаючи прекрасну поверхню об'єкта й спрощуючи процес видалення опор (звичайно ця процедура є досить стомлюючою та забирає багато часу). Температура друку PVA складає приблизно 170°C, і вона ніколи не повинна

перевищувати 200°C. Нитка PVA досить дороге задоволення, що продається приблизно по 1350-1780 грн. за кілограм.

1.3.6 Удароміцний полістирол (HIPS)

Удароміцний полістирол (High-Impact Polystyrene - HIPS) - пластмасова нитка, що розчиняється в лімонене, іноді використовується для створення підтримуючих структур (особливо для ABS), які можуть бути легко вилучені без механічного впливу. Лімонен - природний розчинник, що витягується з кори лимонів та інших цитрусових. Температура друку HIPS приблизно 230°C. Вартість нитки HIPS сягає близько 785 грн. за кілограм.

1.3.7 Пластик CoPET.

Пластик CoPET має високу ударостійкість, вогнестійкість та хімічну стійкість. Завдяки своїм якостям цей матеріал відносять до так званих інженерних пластиків. CoPET має досить широкий діапазон експлуатації готових виробів в діапазоні від -40 до +70°C. При використанні CoPET пластику можна забути про проблеми деламінації, тому що вироби добре прилипають до друкованої поверхні та іноді навіть потребують значних зусиль для їх відокремлення. Вироби, надруковані із цієї нитки прекрасно піддаються обробці різанням лезвійними інструментами, шліфуванням абразивними матеріалами, їх можна шпаклювати, свердлити, нарізати різьбу в отворах, фарбувати акриловою фарбою.

Характеристики CoPET пластику:

Щільність - 1,270 г/см³;

Овальність нитки філаменту $\pm 0,03$ мм;

Міцність при розтягу - 52 МПа;

Міцність при вигині - 70 МПа;

Стійкість до вигину: до 10 разів;

Модуль пружності при розтягу - 2100 МПа

Відносне подовження - 925%

Модуль еластичності - 2100 МПа

Ударна в'язкість по Шарлі (23°C): не руйнується

Температура плавлення 200°C

Рекомендована температура платформи 40...70°C

Температурний діапазон експлуатації виробів від -40 до +70°C

Лінійна маса: 330 м на 1 кг матеріалу;

Незважаючи на стійкість пластику до зовнішнього впливу рекомендується зберігати пластик у вакуумних пакетах із силікатгелем для запобігання усмоктування їм вологи з повітря.

Рекомендована температура друку: 230-240°C

Рекомендована температура платформи: 40-70 °C

Друк без обдуву (обдув необхідний при печатці дрібних і тонкостінних виробів)

Рекомендована швидкість друку: 40-60 мм/сек

Усадка при охолодженні: 0,2 %.

Вартість CoPET складає від 350 до 620 грн за 1 кг.

Застосування CoPET пластику.

Даний вид пластику завдяки властивостям напівпрозорості, стійкості до зовнішнього впливу, а також екологічності широко застосовується для виготовлення пляшок. Також він відмінно підходить для виробів технічного призначення, вимогою до яких буде рівномірне пропускання світла.

До переваг CoPET пластику можна віднести глянцеvu поверхню нитки, високу ступінь прозорості та рівномірне світлорозсіювання. Висока міцність пластику робить його здатним добре протистояти зовнішньому впливу, він не деформується та не залишає тріщин у холодному стані. Пластик CoPET добре підходить для друку виробів технічного призначення, він не відлипає від друкованої поверхні в процесі 3D друку, довговічний та не токсичний. Але він має і певні недоліки, а саме – цей пластик вимагає ретельної просушки перед початком друку, що дозволяє забезпечити максимальну міцність виробу. CoPET не має стійкості до ароматичних вуглеводнів, бензину, кетонам та розчинникам на їх основі.

1.3.8 Пластик PETG

Вважається, що PETG поєднує в собі переваги ABS - міцність, термостійкість, довговічність, і PLA - легкість використання. Як правило, під час друку PETG дуже гарне сплавлення накладених шарів поміж собою, що значно підвищує механічну міцність готового виробу. Він має низьку термічну

усадку, завдяки чому можна не так побоюватися викривлень у розмірах роздруківок.

Відмінності PET і PETG

PET (поліетиленглікольтерефталат) - пластична смола. Це самий використовуваний пластик у світі. Його волокна ви можете знайти в одязі, посудинах і контейнерах для їжі, промислових аркушах пластику, а також у комбінації зі скловолокном для технічних смол. Тисячі видів товарів, продукти харчування та напої поставляються в цьому матеріалі та у нього впаковуються.

PETG (називаний також сополіефіром PET) - модифікована версія PET. Модифікація полягає в додаванні при полімеризації другого хвоста гліколю. Виходить іррегулярна молекулярна структура, пластик чистий і аморфний, температура стеклування складає близько 88°C.

Основні переваги PETG перед PET полягають у наступному:

- він більш довговічний. Якщо сильно нагріти звичайний PET, він стає мутним і крихким. Чого не відбувається з PETG: додатковий гліколь перешкоджає кристалізації та ламкості. Новий матеріал має також вражаючі удароміцні властивості. Вартість складає від 1500 грн за 1 кг.

- на відміну від PET він непрозорий для ультрафіолету.

- їм можна професійно друкувати, його можна піддавати стерилізації.

- пластик PETG вважається харчобезпечним при наявності сертифікату від виробника філаменту.

Недоліки у пластика PETG є, але їх небагато. По-перше, цей пластик більш легко дряпається, ніж PET. Крім того, під впливом ультрафіолету його структура стає більш слабкою. Деякі виробники стверджують, що це не найпростіший матеріал для друку, тому при його використанні потрібно знайти золоту середину.

Більшість виробників рекомендує тримати температуру екструдера від 200 до 230°C. Першу роздруківку зручно почати з 210-220°C. Підігрів основи не обов'язковий, але він може виявитися корисним, особливо у випадку, якщо буде виявлено викривлення великих деталей. Цілком можливо друкувати без підігріву, однак може потребуватись додаткове налаштування 3D принтера.



Рисунок 1.8 – Втулка, виготовлена методом 3D друку із пластика PETG

Зберігати PETG потрібно у сухому місці. Вогкість змінює цей філамент у гіршу сторону, у результаті чого може виявитися, що друкувати їм неможливо або виходить багато браку.

На щастя, як PET, так і PETG практично не піддаються впливу звичайної вологості повітря навколишнього середовища, тому з друком та зберіганням особливих проблем не виникає. Але буде краще, щоб філамент зберігався в як можна більш сухому місці, поруч із силікатними пакетиками. Температура експлуатації складає від -60 до +220°C.

1.4 Проблеми якості деталей із пластику, виготовлених методом 3D друку

Незважаючи на великі переваги, що надають сучасні технології FDM, все ж таки існує ряд проблем, які стримують широке застосування 3D друку у виробництві деталей для промислового використання.

По перше, навіть при наявності справного та налагодженого 3D принтера велике значення має марка та якість філаменту, якій застосовується при створенні виробів. Різні партії пластику, придбані через певний проміжок часу будуть незначно, але відрізнятись по своїм характеристикам, що може потребувати додаткових контрольних роздруківок еталонних деталей для коригування налаштувань принтера.

По друге, технічні пластики типа PETG коштують доволі багато (від 320...1500 грн/кг проти 260 грн/кг за пластик ABS). Тобто, ціна виготовлення

одної деталі може бути занадто висока у порівнянні із виробом, виготовленим за традиційною технологією методом лиття.

По третє, точність геометричних розмірів під час 3D друку є актуальною проблемою. Якщо при виготовленні звичайного сувеніру або іграшки отримані кінцеві розміри можуть дещо відрізнитись від закладених у 3D модель, то геть зовсім інша справа, коли надрукована деталь повинна встати на призначене їй місце з мінімальною доробкою або взагалі без неї. В такому випадку геометричні розміри деталі повинні максимально співпадати із розмірами на кресленні або 3D моделі.

Витрати часу на одну одиницю деталі при 3D друку набагато більші, ніж при технології лиття у термопресавтоматах традиційної конструкції, а собівартість серійних деталей може значно відрізнитись в більшу сторону.

Іноді, внаслідок нестабільного електропостачання або помилок керуючої програми під час друку деталей може відбутись збій у роботі 3D принтера і деталь в більшості випадків піде у брак, а весь процес прийдеться починати з початку.

1.5 Висновки, мета і задачі дослідження

Базуючись на інформації, яка наведена у літературних джерелах по даній тематиці, нами поставлено за мету підвищення ефективності виготовлення деталей із пластика методом 3D друку шляхом розробки практичних рекомендацій та методик 3D друку, використання яких дозволить на нашу думку знизити витрати пластику та підвищити якість отриманих виробів.

Для досягнення мети, що була поставлена, слід вирішити наступні задачі:

- дослідити стан питання о використанні технології 3D-друку FDM при виготовленні різноманітних виробів із технічних пластиків;
- розробити методику дослідження якості виготовлених виробів, а саме відповідності їх реальних геометричних розмірів заданим у 3D-моделі;
- розробити рекомендації по режимам друку та методам виготовлення деталей із пластика;
- обрати необхідне обладнання для виконання даної операції;
- провести техніко-економічне обґрунтування процесу 3D-друку, який був вдосконалений на основі використання розроблених рекомендацій.

Тому задача підвищення ефективності виготовлення деталей із пластика методом 3D друку та розробки вдосконалених рекомендацій для ефективного

3D-друку в умовах одиничного та мілкосерійного виробництва є актуальною і потребує досконалого вивчення і подальшого розв'язання.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1 Порівняння традиційного методу лиття пластику під тиском та технології FDM.

При обранні технології для виробництва пластмасових деталей доцільно оцінити переваги та недоліки двох найбільш розповсюджених методів, а саме – лиття пластику під тиском у термопластавтоматах [3] та технологію пошарового наплавлення FDM [13].

2.1.1 Лиття пластику під тиском є давно відомим технологічним процесом, який вигідно відрізняється швидкістю отримання деталей та ґрунтується на введенні розплавленого гранульованого пластику в попередньо виготовлену спеціальну форму (зазвичай із полірованого металу), в якій він охолоджується до температури кристалізації, твердіє та набуває заданої форми. Після того, як виріб охолоне та затвердіє, його можна виймати із форми. Процес відливання можна повторювати багато разів (від десятків до сотень тисяч) і він відмінно підходить для серійного та масового виробництв.

Технологія лиття пластиків під тиском дозволяє найбільш ефективно використати всю гранульовану сировину, завдяки чому в процесі виробництва практично не залишається зайвих відходів. Простота та швидкість роблять процес виливання під тиском досить маловитратним. А великі об'єми виробництва роблять собівартість на одиницю продукції доволі привабливими.

Ще однією перевагою цього процесу є те, що отримані деталі або зовсім не потребують додаткової обробки або вона мінімальна. Завдяки надлишковому тиску матеріал максимально заповнює форму і деталь отримується практично без пор та інших недоліків. Зовнішній вигляд вилитих пластикових деталей у порівнянні з надрукованими більш привабливий та гладкий. Можливе виготовлення різноманітних деталей – від найменших і простих до великих та складної форми.

Але метод лиття має декілька суттєвих недоліків. По перше, це дуже висока вартість проектування та виготовлення прес-форм, окрім того практично неможливо у майбутньому модернізувати це оснащення. Якщо деталь буде мати невеликий життєвий цикл то можливий варіант, що прес-форма просто не встигне окупити себе. Взагалі, якщо порівняти схеми традиційного та адитивного виробництв, то можемо побачити, що останні мають ряд суттєвих переваг (рис. 2.1)

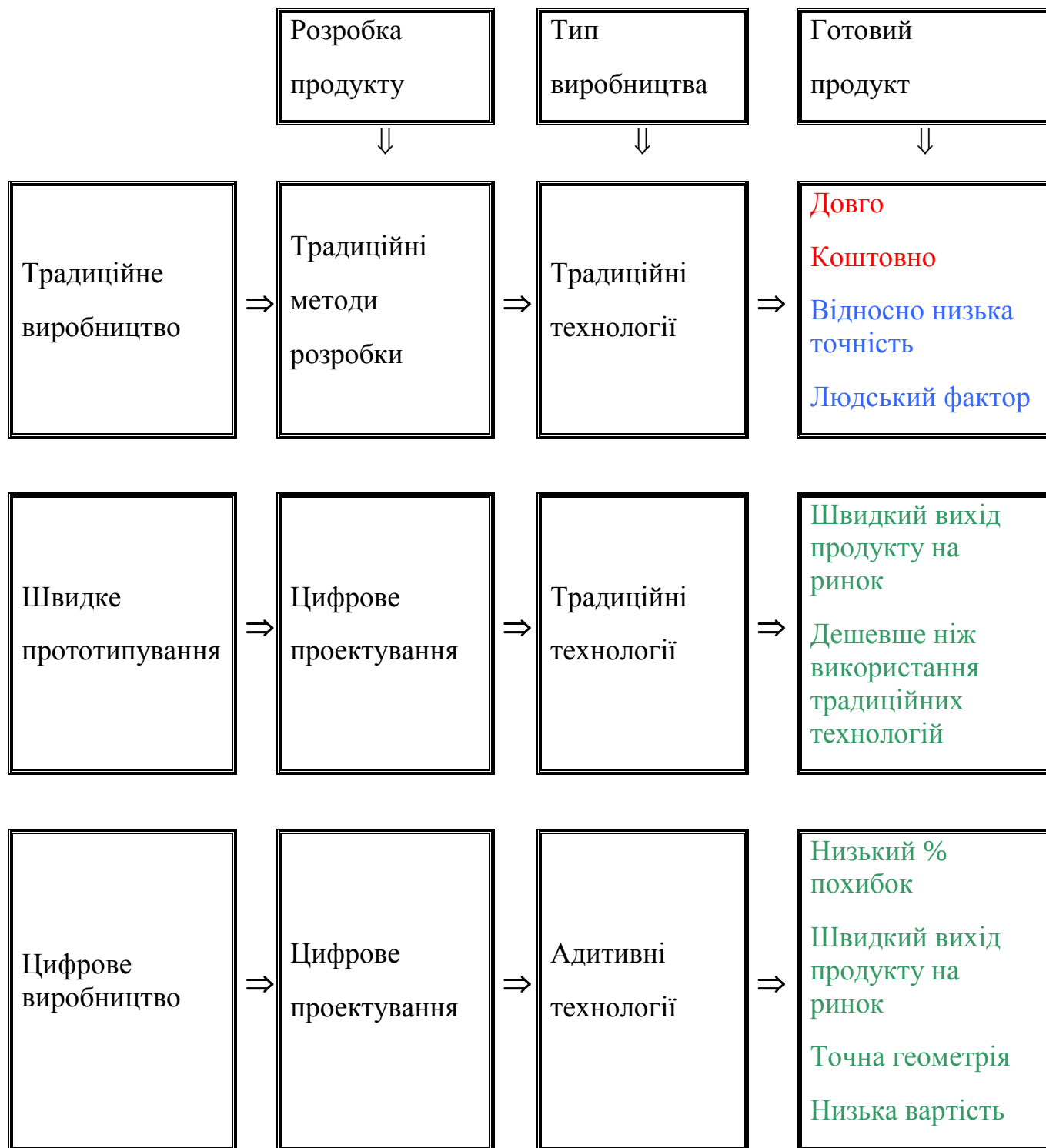


Рисунок 2.1 – Схеми традиційного та адитивного виробництв

2.1.2 FDM 3D-друк використовує CAD-файли для побудови тривимірних деталей шар за шаром, тому при цьому методі не потрібно проектувати спеціальні штампи або прес-форми. Порядок створення готової деталі представлено на рис. 2.2. Після завершення віртуального проектування форми та розмірів виробу, 3D принтер може надрукувати від однієї до сотні готових деталей, причому витрати на одиницю продукції будуть однакові. Наявність 3D моделі дозволяє за потреби швидко внести зміни до конфігурації деталі

безпосередньо на робочому місці. Це майже ідеально підходить для створення різних прототипів, коли потрібно протестувати різні варіанти конструкції на ранніх етапах створення.

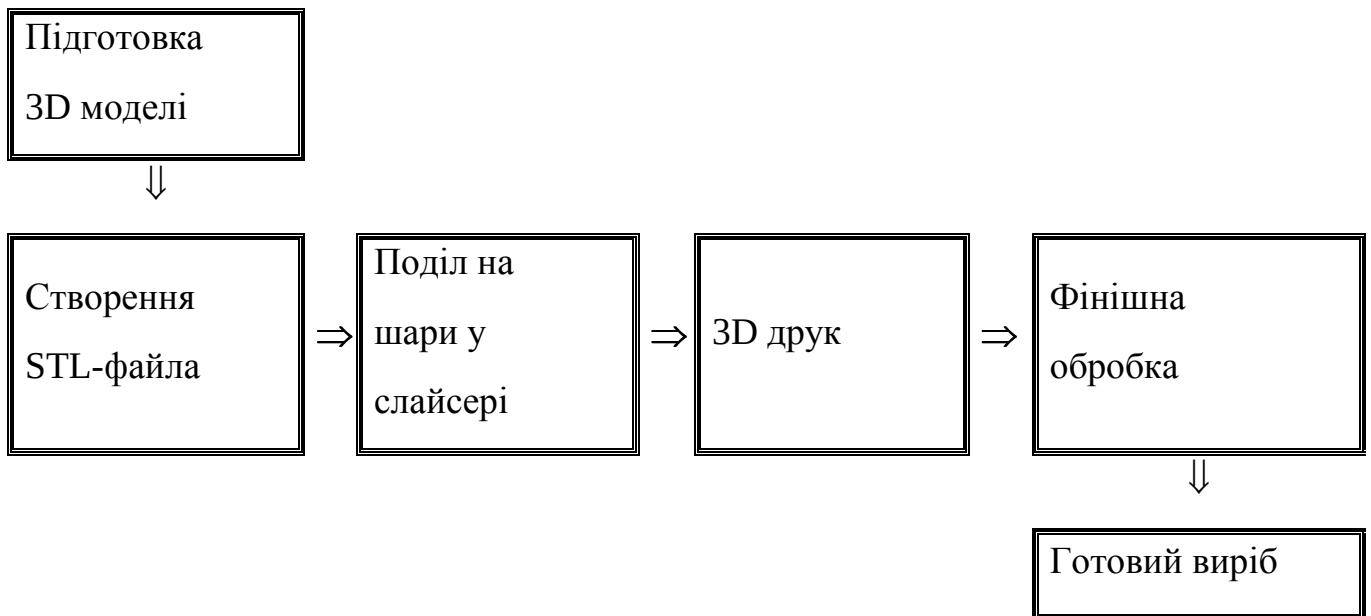


Рисунок 2.2 – Порядок створення готової деталі

Але також слід відмітити, що апаратне та програмне забезпечення для 3D друку все ж таки іноді дає збій, що може призвести до припинення друку або неякісної структури надрукованих шарів пластику.

3D-друк створює деталі шар за шаром, по одному виробу за раз. Це ефективний спосіб для виготовлення партій деталей кількістю до 100 штук. Якщо ж потрібно виготовити більшу кількість виробів, тоді цей метод стає затратним як за часом так і економічно. Під час 3D-друку можливе створення певних структурних дефектів у товщі матеріалу, внаслідок чого деталь буде забракована.

Технологія FDM буде вигідніше класичних способів виробництва, а іноді стане єдиним можливим рішенням в наступних випадках:

- коли немає необхідності в 100% заповненні виробу;
- при створенні деталей із сітчастою структурою, із прямими або гострими внутрішніми кутами (радіаторів і т.п.);
- якщо в деталі складна геометрія, у тому числі складні внутрішні канали;
- при виготовленні малої серії (до 500 одиниць) або дослідних зразків у НДКР;

- при виробництві ливарних майстер-моделей, виплавлюваних і випалюваних моделей у ювелірній промисловості;
- при створенні протезів, стоматологічних шаблонів, тимчасових коронок з біосумісних матеріалів;
- коли функціональність виробу важливіше його вигляду.

2.2 Характеристики принтера DELTA

Загальний вигляд принтера представлено на рис. 2.3

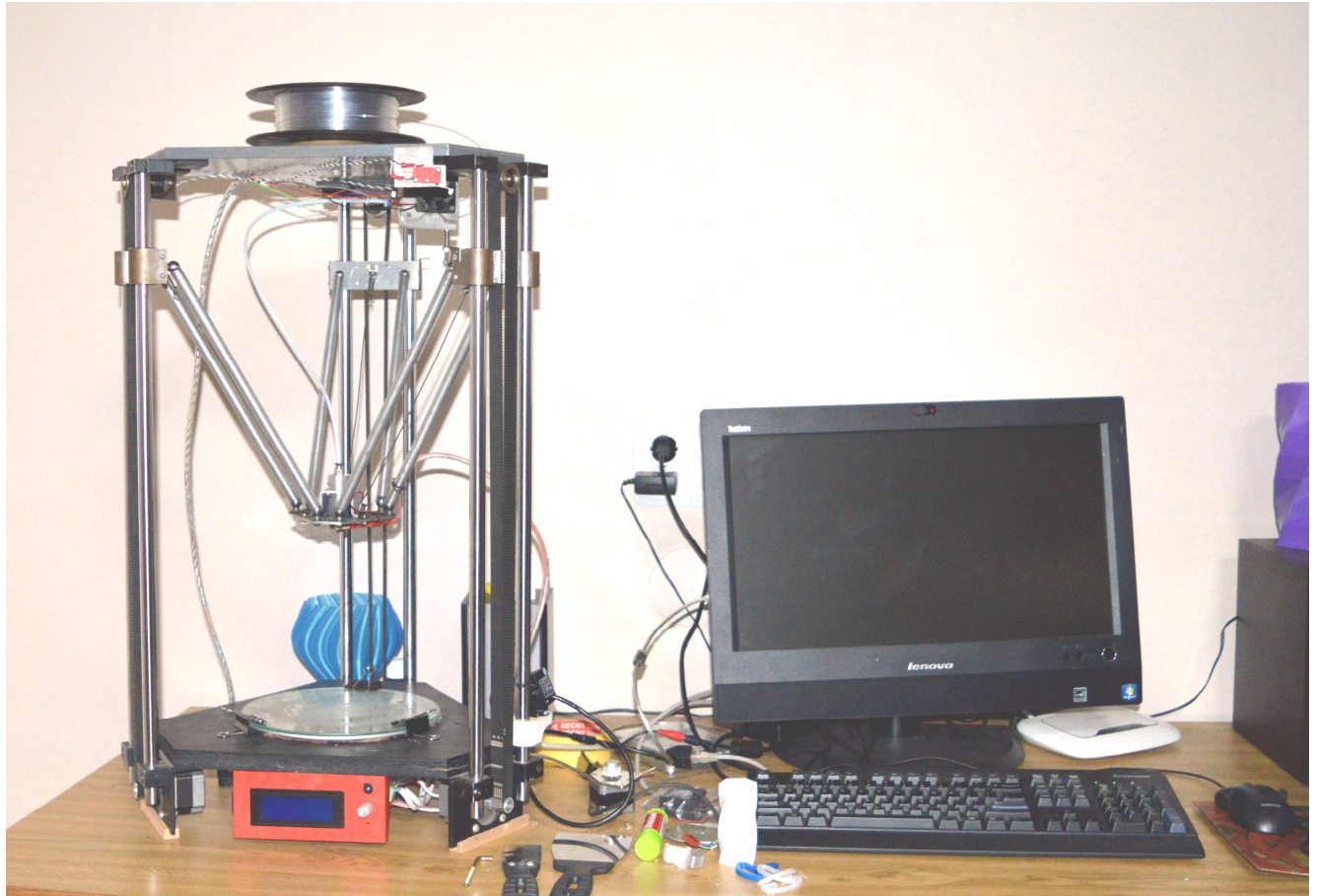


Рисунок 2.3 – 3D принтер моделі DELTA-FDM

Модель принтера – DELTA

Орієнтовна вартість – 500 \$

Вага принтера 10 кг

Витрати електроенергії 450 Вт/год

Програмне забезпечення, з яким працює принтер – Cura, Repetier Host (shareware or freeware)

Висота друкованого шару – від 0,1 до 0,5 мм;

Швидкість друку – до 100 мм/с;

Температура друку (сопло екструдера) – від 180 до 250°C

Температура стола з підігрівом – від 40 до 80°C.

2.3. Призначення та механічні властивості досліджуваних матеріалів

Таблиця 2.1 – Механічні властивості досліджуваних матеріалів

№ п/п	Параметр	Назва матеріалу				
		PLA	ABS	CoPET	Nylon	Petg
1	Щільність, г/см ³	1,23...1,25	1,06	1,27	1,134	1,27...1,29
2	Міцність при розтязі, МПа	10...60	≥38	52	65,99	50...56
3	Міцність на згін, МПа	88...119	70...80	70	70	50...83
4	Стійкість до згину, разів	10		10		
5	Відносне подовження, %	1,5...380	≥20	925	300	3...5
6	Модуль пружності при розтязі, МПа	350...2800	≥2800	2100	2700	
7	Модуль еластичності	2100		2100	2600	
8	Крапка плавлення, °C	200	130...140	200	218	260
9	Рекомендована температура друку, °C	180...210	215...230	230...240	235...245	230...255
10	Рекомендована температура платформи,	20...60	80...95	40...70	100...120	50...70
11	Температурний діапазон експлуатації виробів, °C	-20...+40	-40...+70	-40...+70	-60... +120	51...64
12	Усадка, %	практично	0,4...0,7	0,2	1	0,2...0,6

		немає				
--	--	-------	--	--	--	--

2.4 Розробка технології виготовлення деталей на 3D принтері DELTA і надрукованих моделей об'єктів

Отримана 3D модель досліджуваного зразка деталі у форматі STL була спроектована у програмному комплексі SolidWorks 2012 та надрукована у лабораторії 3D друку кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки ЦНТУ, що обладнана 3D принтером власного виробництва DELTA-FDM (рис. 2.2). DELTA-FDM це принтер середнього рівня, виконаний за схемою «дельта-робот». Принтер оснащений системою калібрування, робочим столом підігрівом, відкритою робочою камерою та системою охолодження екструдера. DELTA-FDM друкує моделі до 150 мм у діаметрі та до 125 мм висотою, з мінімальною товщиною друкованого шару від 0,4 мм. Завдяки обдуву моделі при друку та механізму регулювання підтиску нитки філаменту, принтер друкує такими видами пластику як ABS, PLA, CoPET, Nylon та PETG. Він створює об'єкт пошарово, шляхом екструзії пластикової нитки. Друкуюча голівка підвішена на шести діагоналях, шарнірно з'єднаних із трьома каретками, що роблять вертикальні переміщення вздовж напрямних. При цьому друкуюча голівка робить плоскопаралельний рух у просторі. Основна перевага цієї схеми в тім, що під час друку модель нерухомо закріплена на столі, і друкуюча голівка піднімається уздовж осі моделі, друкуючи шар за шаром. Також, завдяки невеликій вазі голівки, швидкість друку вища, ніж у 3D принтерів, виконаних за іншими схемами. Широке застосування схеми Delta та доступність робить принтери цього типу вигідними для використання при створенні макетів, прототипів, фізичних моделей, різних деталей і тестових зразків, сувенірів, дизайнерських предметів інтер'єра, друку будь яких моделей продукції для виставок і презентацій, створення іграшок, предметів побуту для будинку та багато чого іншого. Складні або великі моделі потрібно розділяти на елементи, тому що надрукувати за один прохід це або неможливо, або результат буде помітно менш якісний, ніж роздрукувати правильно в декількох частинах, а потім склеїти. Крім того, що об'єкти повинні бути точно виготовлені, вони повинні виконувати необхідні функції.

В якості еталонних зразків було обрано дві 3D моделі (рис. 2.4 та 2.5), одна з яких складається із охоплюваних поверхонь (квадратний, круглий, шестигранний та прямокутний вали), а друга із пластини з отворами (охоплюючи поверхні) ідентичної форми та розмірів.

Як матеріали для друку еталонних зразків обрали ABS, PLA, CoPET, Nylon та PETG. STL-моделі були імпортовані в слайсер Repetier Host (рис. 2.6). Слайсер - це програма для перетворення тривимірної моделі в зрозумілий принтеру

набір команд (так називаний G-code). Також слайсер розраховує та показує передбачувані час друку, вагу та метраж пластикової нитки, що буде витрачена.

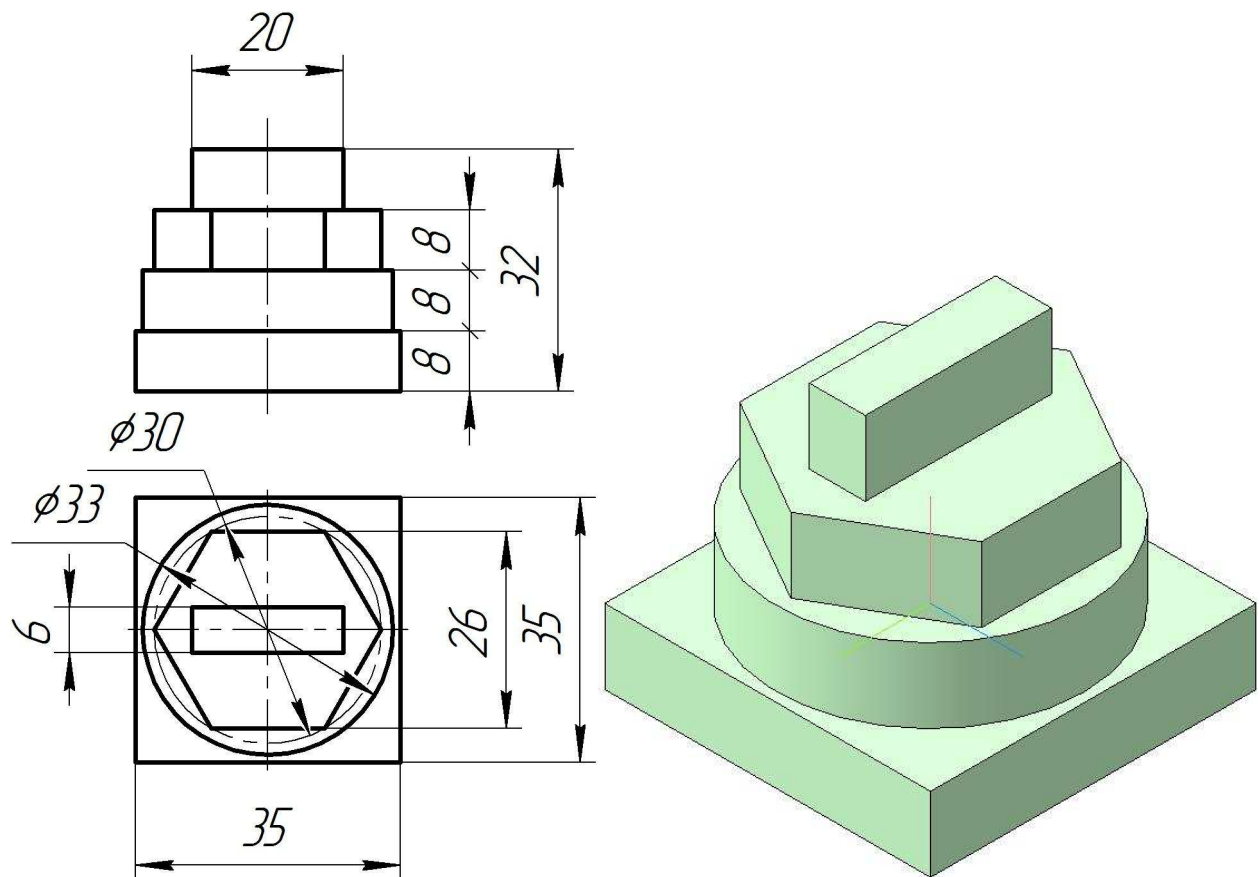


Рисунок 2.4 – Зразок, що імітує вали різної форми

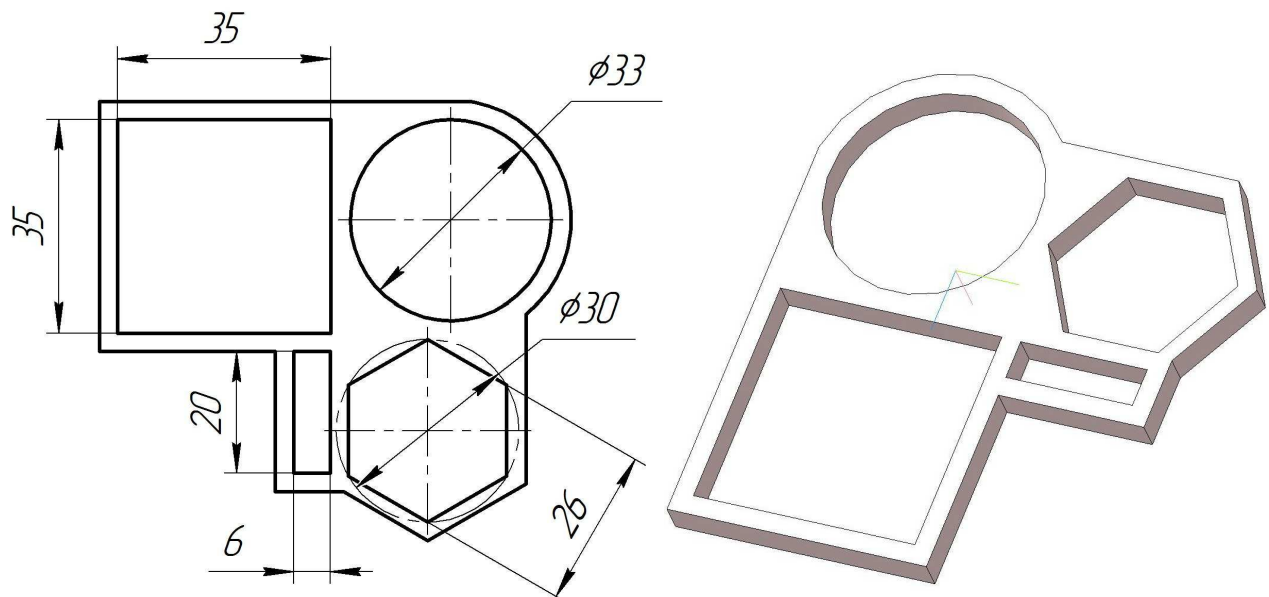


Рисунок 2.5 – Зразок, що імітує отвори різної форми

Передбачуваний час друку обох еталонних зразків - 70 та ____ хв. відповідно, вага затраченої на друк пластикової нитки - ____ та ____ грам, загальний метраж затраченої на печатку пластикової нитки - 3584 та ____ мм. З урахуванням геометричних особливостей еталонних зразків необхідної якості

друку були обрані наступні основні параметри друку моделі в слайсері Repetier-Host v.2.1.6: висота шару – 0,3 мм; щільність заповнення - 30 %; швидкість друку - 50 мм/сек; температура друку від 210 до 235°C; температура стола - 55°C.

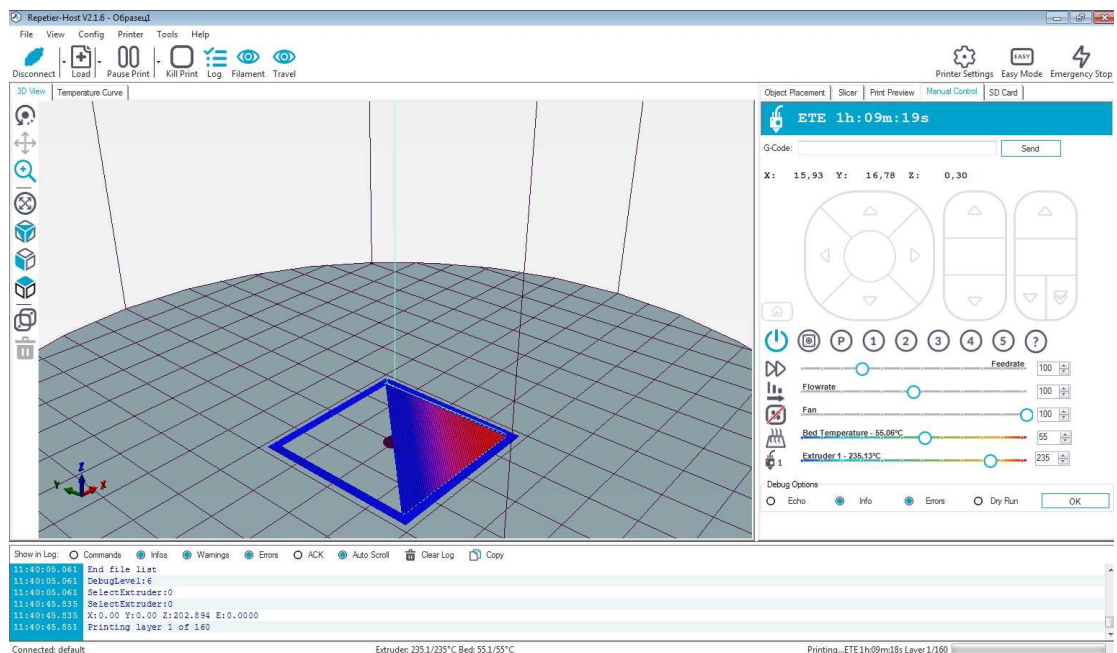
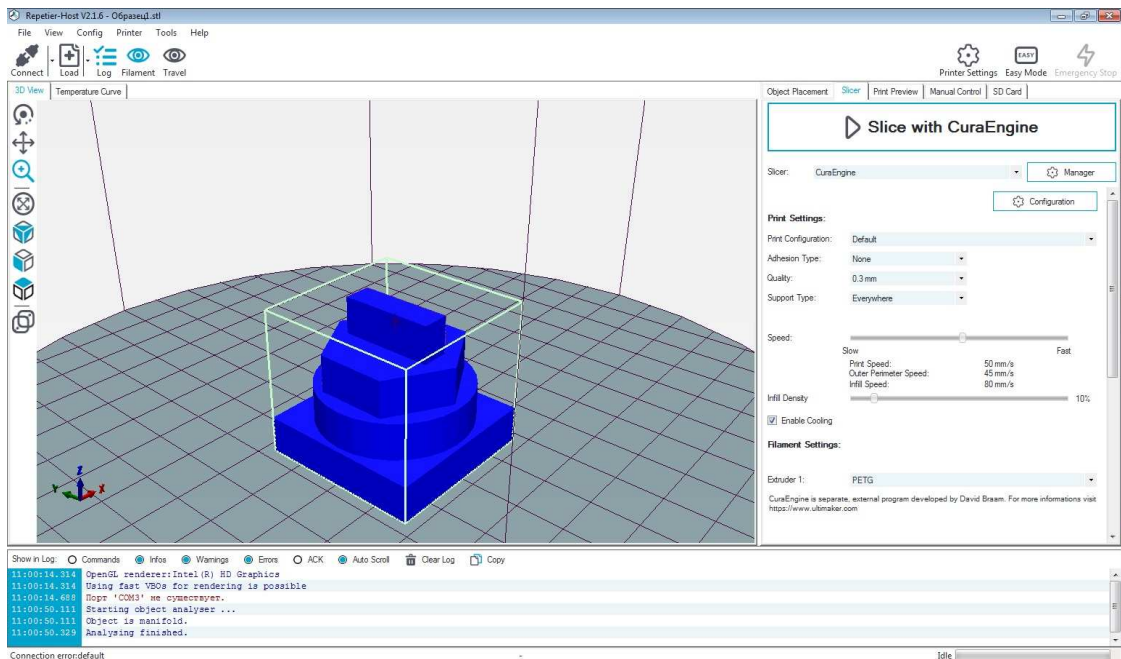


Рис. 2.6 – Підготовка моделі еталонного зразка до друку в Repetier-Host v.2.1.6.

Також у слайсері можна побачити загальну кількість шарів, які будуть надруковані - 160 шт., тобто візуалізацію G-коду (рис. 2.7). Ще можна попередньо подивитися, як буде виглядати деталь пошарово.

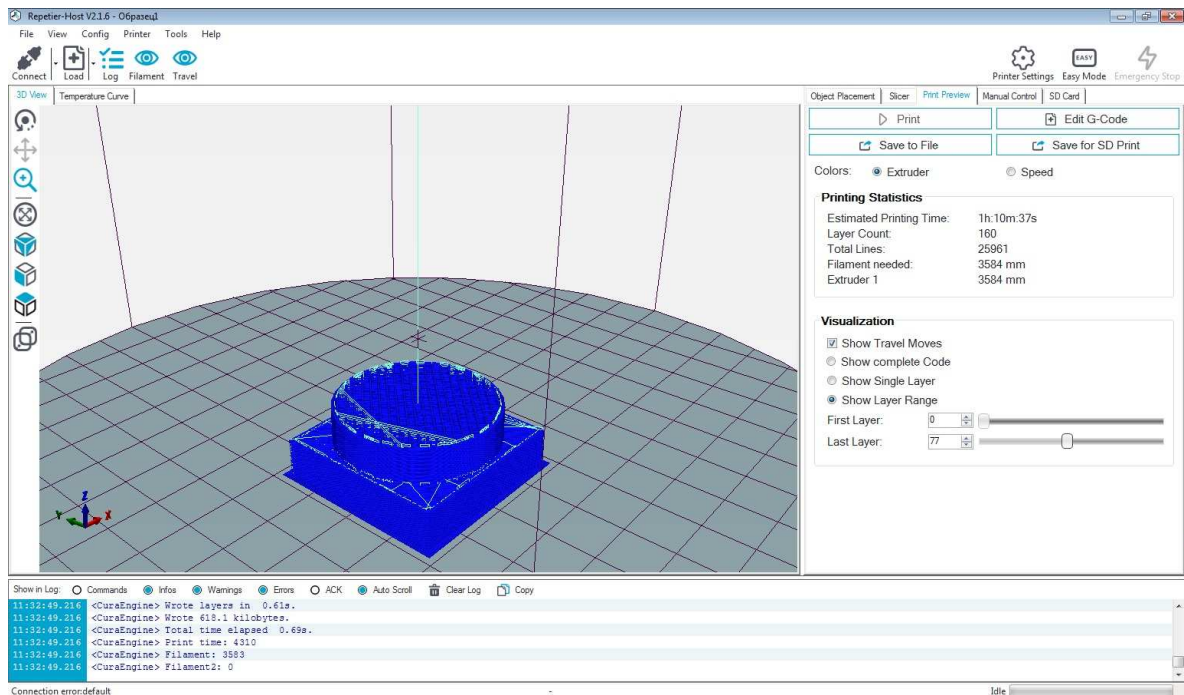


Рисунок 2.7 – Візуалізація G-кодів в слайсері Repetier-Host v.2.1.6.

Варто відзначити, що для кращого прилипання друкованого зразка до стола він оброблявся клеєм-карандашом Glue stick PVP або Datum D1321. Після цього запускалася друк деталі. Процес друку еталонного зразка на 3Dпринтері DELTA показано на рис. 2.8.

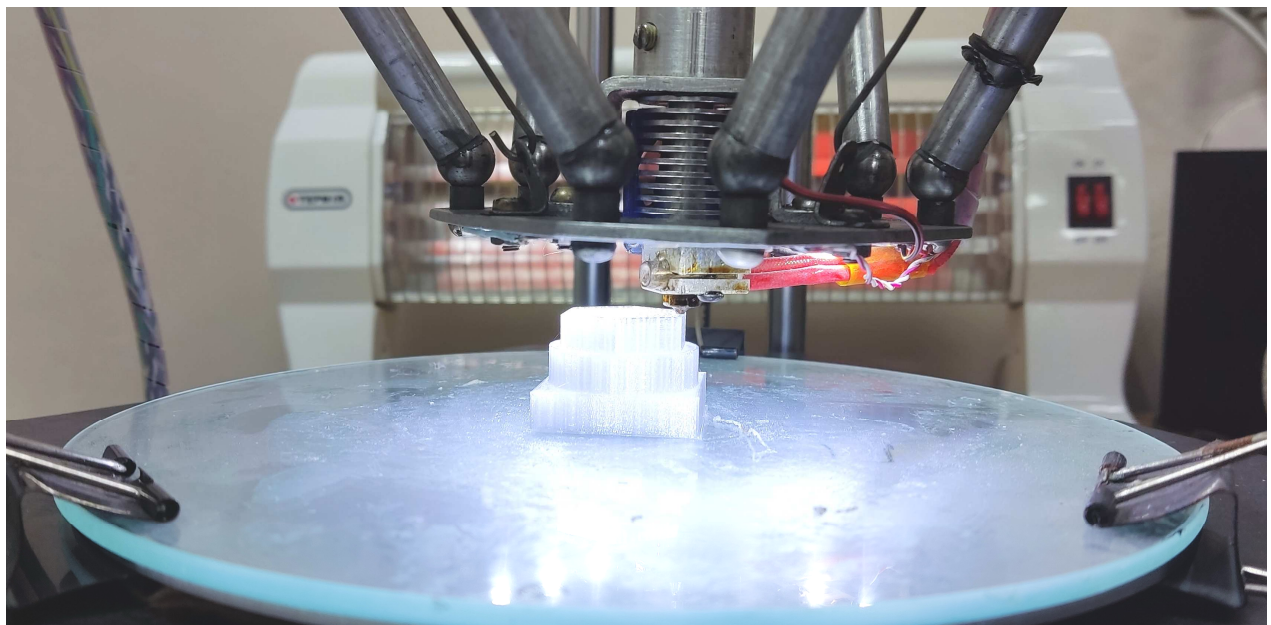


Рисунок 2.8 – Процес друку еталонного зразка на 3D принтері DELTA

Після закінчення друку та зняття еталонного зразка зі стола 3D принтера, було зроблено огляд та вимірювання надрукованих поверхонь (рис. 2.9). Перед вимірюванням за допомогою ножа із гострим лезом та наждачного паперу було видалено облії та невеликі нерівності друку.



Рис. 2.9 – Вимірювання надрукованого зразка за допомогою штангенциркуля

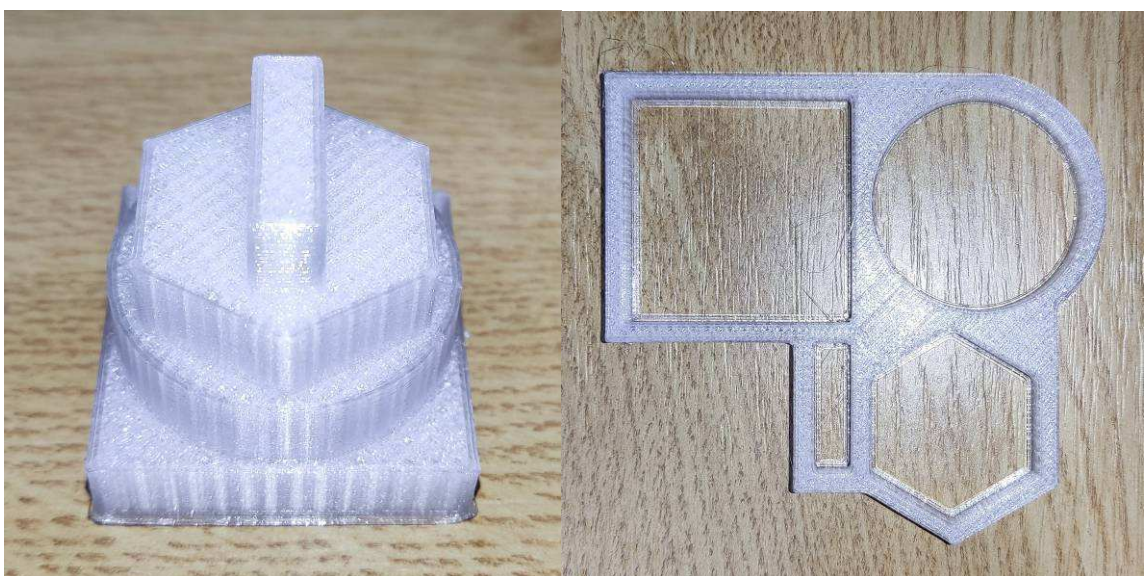
Друк дослідних зразків із інших видів пластика відбувався у такій же послідовності з урахування рекомендацій виробника по параметрам друку (температура екструдера, температура основи).

Результати вимірювань всіх досліджуваних поверхонь заносились у таблицю та були проаналізовані у розділі 3.

3. Аналіз результатів дослідження та розробка вдосконалених рекомендацій для 3D друку деталей із пластика.

3.1 Результати вимірювання лінійних розмірів контрольних зразків із досліджуваних матеріалів

Надруковані дослідні зразки з пластика PETG показано на рис. 3.1



а)

б)

Рисунок 3.1 – а) Деталь з поверхнями типу вал; б) Деталь із отворами

Результати вимірювань зведено у таблицю 3.1

Таблиця 3.1 – Задані та отримані розміри надрукованих зразків із різних видів пластика

№ п/п	Назва пластика	Задані розміри, мм				Отримані розміри, мм			
		Квадрат	Коло	Шести- кутник	Прямо- кутник	Квадрат	Коло	Шести- кутник	Прямо- кутник
1	PLA	h _{ст} =8	Ø=33	h=26	6x20	Деталь з валами			
		l ₁ =35				h _{ст} =7,8...8	Ø=32,5	h=25,7 ...25,8	5,9x19,9
		l ₂ =35							
		l ₁ =34,7							
		l ₂ =34,8							
Деталь з отворами									
h=5,0	Ø=32,6	h=25,5 ...25,6	5,9x19,7						
l ₁ =34,7									
l ₂ =34,7									
2	ABS	h=8	Ø=33	h=26	6x20	Деталь з валами			
		l ₁ =35				h=8,0	Ø=32,5	h=25,6 ...25,8	6,5x20,5
		l ₂ =35							
		l ₁ =34,8							
		l ₂ =34,8							
Деталь з отворами									
h=5,0	Ø=32,3	h=25,4 ...25,5	5,8x19,7						
l ₁ =34,8									
l ₂ =34,6									
3	PET-G	h=8	Ø=33	h=26	6x20	Деталь з валами			
		l ₁ =35				h=7,1	Ø=32,7	h=25,8 ...25,9	6,1x20
		l ₂ =35							
		l ₁ =34,8							
l ₂ =34,9	Деталь з отворами								

						h=5,0 l ₁ =34,6 l ₂ =34,7	Ø=32,6	h=25,5 ...25,6	5,9x19,7
4	Nylon	h=8 l ₁ =35 l ₂ =35	Ø=33	h=26	6x20	Деталь з валами			
						h=7,9 l ₁ =34,8 l ₂ =34,8	Ø=32,5	h=25,9 ...26,0	6,0x19,8
						Деталь з отворами			
						h=5,0 l ₁ =34,8 l ₂ =34,8	Ø=32,4	h=25,8 ...26,0	6,0x20,0
5	CoPET	h=8 l ₁ =35 l ₂ =35	Ø=33	h=26	6x20	Деталь з валами			
						h=8,0 l ₁ =34,9 l ₂ =34,9	Ø=32,7	h=25,9 ...26,0	6,1x20,1
						Деталь з отворами			
						h=5,0 l ₁ =34,8 l ₂ =34,8	Ø=32,6	h=25,8 ...25,9	5,8x19,8
6	PCTG	h=8 l ₁ =35 l ₂ =35	Ø=33	h=26	6x20	Деталь з валами			
						h=8 l ₁ =34,8 l ₂ =35	Ø=32,9	h=25,9 ...26,0	6,1x20,0
						Деталь з отворами			
						h=4,9 l ₁ =34,8 l ₂ =34,9	Ø=32,7	h=25,6 ...25,7	5,9x19,8

3.2 Порівняльний морфологічний аналіз моделей і оригіналів зразків

Порівняльний морфологічний аналіз полягав у порівнянні геометричних параметрів зразків, виготовлених за допомогою 3D принтера, з віртуальною моделлю.

Основними порівнюваними геометричними параметрами першого зразка були: розміри квадратного, круглого, шестикутного та прямокутного валів, а у другого зразка розміри отворів відповідної форми.

3.2.1 Результати вимірювання зразка із пластику ABS наведено на рис. 3.2.

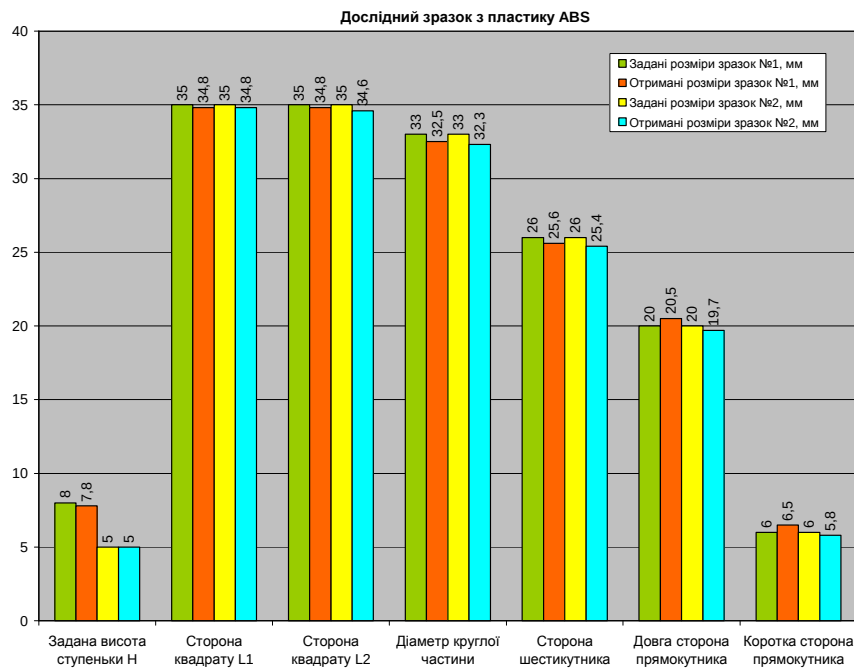


Рисунок 3.2 – Діаграма заданих та отриманих розмірів дослідного зразка з пластику ABS

Геометрична погрішність між заданими та отриманими розмірами склала порядку 1,5-2%, тобто надрукований зразок дещо менший ніж 3D модель. Це пов'язане з тим, що ABS пластик при охолодженні стискується. Також під час друку було виявлено деформацію зразка по кутам нижньої квадратної основи (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Деформація основи по кутам зразка з ABS пластика

Це явище має місце, якщо під час друку температура основи із підігрівом недостатня або є погане зчеплення матеріалу основи (зазвичай скло або полірована металева пластина) із розплавленою ниткою першого надрукованого шару ABS. Методами боротьби є підвищення температури основи до 100-110°C та використання основи з високим ступенем прилипання розігрітого пластику до її поверхні.

Звідси можна зробити висновок, що для максимальної збіжності геометричних параметрів оригіналу та прототипу деталі з ABS пластику необхідно друкувати трохи більше оригіналу, тобто для кожного окремого випадку дослідним шляхом підбирати масштаб, параметри друку, з урахуванням усадки пластику та післяобробки.

3.2.2 Пластики PETG, PCTG, CoPET

Різниця в розмірах спроектованого та надрукованих зразків коливалась у досить невеликих межах (0,5-1%) (рис. 3.4). Також слід відмітити, що зовнішня поверхня надрукованих зразків мала привабливий вигляд і практично не потребувала додаткової обробки. Практичний досвід свідчить, що ці технічні пластики найбільш придатні для виготовлення невеликих за розмірами деталей, для яких важливо мати гарний зовнішній вид разом із високою міцністю. Однак, дуже важливу роль буде грати напрямок прикладення зусиль до деталі, так як надруковані шари пластику мають меншу адгезію поміж собою, ніж у

литих виробів і можуть розшаруватись під час великих механічних навантажень вздовж них.

Усадка деталей пов'язана з фізичними властивостями пластику та швидкістю його затвердіння. А саме, якщо обдувати під час друку PETG із двох сторін деталі зовні, то це дозволить пластику затвердіти швидше, тобто даючи менший ступінь усадки. Із внутрішньої ж сторони, обдув повітрям не такий інтенсивний, тому розпливання пластику (усадка) буде вище. Ступінь усадки пластику конкретної марки та партії потрібно встановити дослідним шляхом.

Для зразка тип 1, усадка спостерігається на всіх зовнішніх поверхнях (реальні розміри на 0,1-0,3 мм менші, ніж задані). Для деталей, які працюють з певними зазорами або посадками, ми не можемо зневажати цією погрішністю при моделюванні (проектуванні) деталі. Ще одна причина звертати на це увагу тому, що шарувата структура (рис. 3.5) під час друку буде неминуче давати погрішність як у вимірах, так і в притиранні деталей друг до друга через ребристу структуру поверхні.

Для порожніх деталей з отворами усередині - усадка зовні складає до 0,1-0,15 мм (їй також потрібно врахувати, як і в прикладі вище). Усадка усередині – 0,1...0,2 мм (цю погрішність ми включаємо в розмір деталі при конструюванні).

У цілому це досить високий показник збіжності геометричних параметрів оригіналу із прототипом.

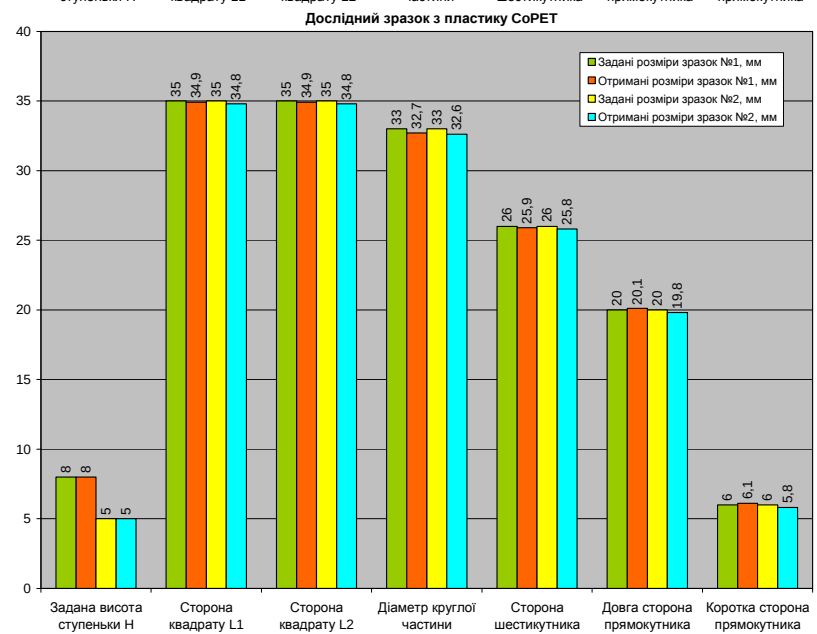
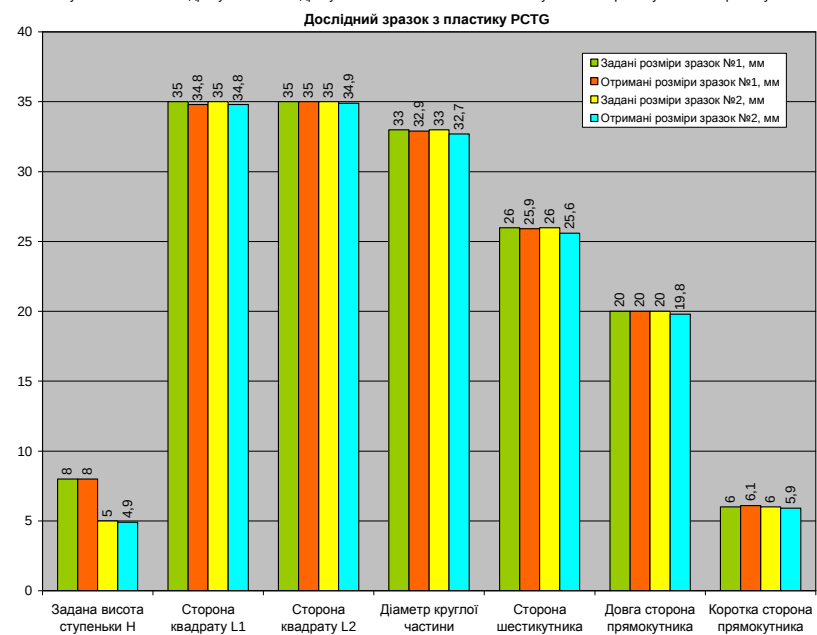
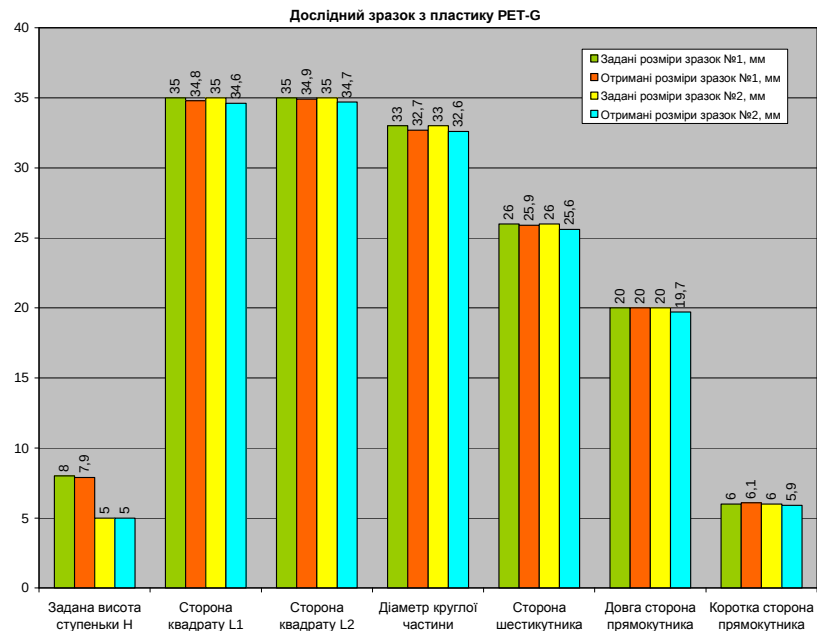


Рисунок 3.4 – Діаграми заданих та отриманих розмірів дослідних зразків з пластиків PETG, PCTG, CoPET

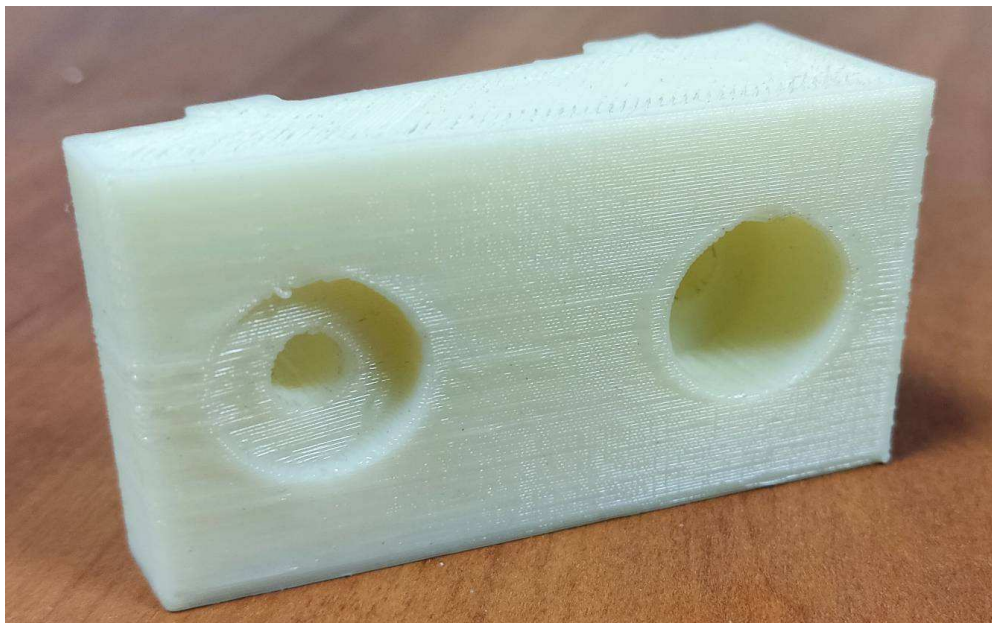


Рисунок 3.5 – Шарувата структура надрукованого зразка

3.2.3 Нейлон показав себе досить «клопітким» матеріалом. Його схильність до абсорбування вологи потребує ретельних умов зберігання та закритої камери друку. Окрім підвищеної температури екструдера також потрібно добре нагрівати опорний стіл (площадку для друку). Вироби із нейлону мають здатність до розшарування нанесеного матеріалу, тому друк з них завжди буде мати більш високу вартість у порівнянні з іншими видами пластику.

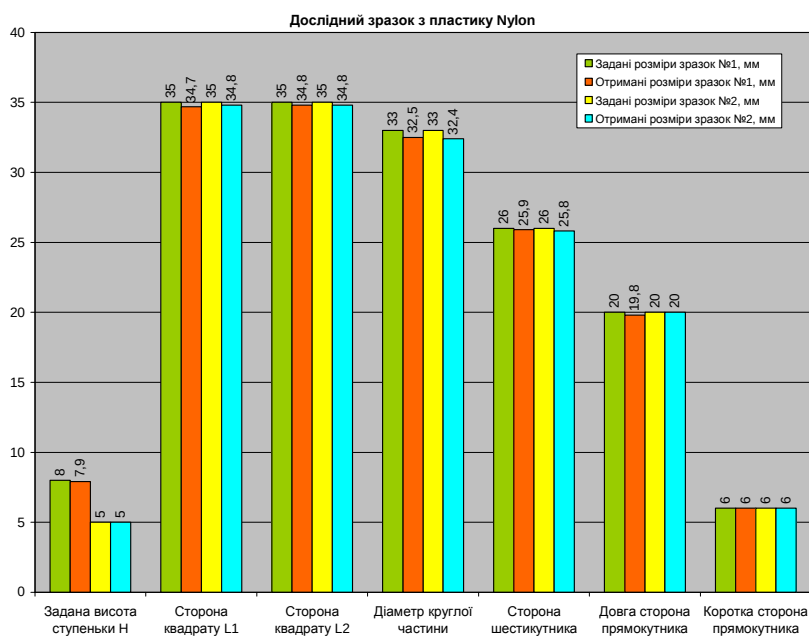


Рисунок 3.6 – Діаграма заданих та отриманих розмірів дослідного зразка з пластику Nylon

3.3 Рекомендації із застосування витратних матеріалів та вибір оптимальних параметрів друку

Для досягнення максимально ефективного 3D друку деталей із пластику потрібно підібрати такий витратний матеріал, якій буде максимально підходити під поставлені завдання і в той же час буде мати прийнятну ціну. Тобто нам потрібно знати, де буде працювати наша надрукована деталь, в яких умовах та з яким навантаженням. Така інформація дозволить обрати саме той вид пластика, якій буде потрібен.

3.3.1 Для пластику PLA суттєвими його перевагами є те, що він практично не дає усадки під час друку, що було також підтверджено нашими дослідженнями і дозволяє одержати високу відповідність розмірів надрукованого виробу змодельованому (рис. 3.7).

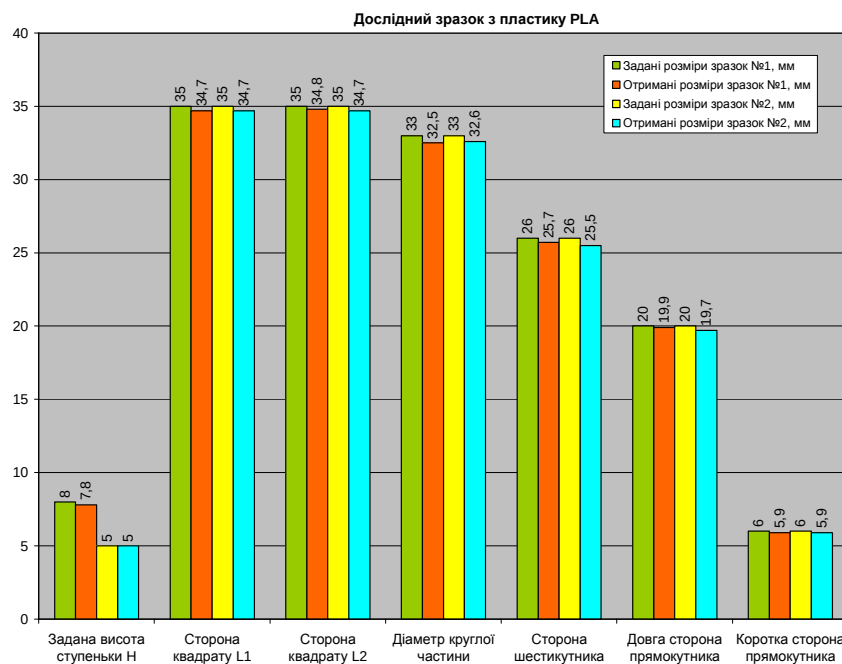


Рисунок 3.7 – Діаграма заданих та отриманих розмірів дослідного зразка з пластику PLA

Також він не потребує стола із підігрівом і не боїться протягів під час друку, а значить ми можемо використовувати відносно дешеві 3D принтери з відкритим корпусом. PLA нетоксичний, тому вимоги з техніки безпеки під час друку цим матеріалом можуть бути не такі суворі (див. розділ 5). Ще PLA твердий, міцний і «слизький» тому з нього ми можемо виготовляти широкий спектр виробів.

Але, суттєвим його недоліком є те, що цей натуральний матеріал під впливом повітря та ультрафіолетового випромінювання, згодом стає більше тендітним та крихким, тому деталі із нього непридатні для довгострокового застосування при більших фізичних навантаженнях або для використання без захисного покриття на відкритому повітрі.

PLA пластик не може використовуватися у місцях, де є високі температури, тому що при них він «пливе». Висока твердість пластику утрудняє його механічну обробку, і це теж є його недоліком. Якщо надрукована деталь потребує додаткової механічної обробки, наприклад свердління отворів, нарізання різьби в них та ін., то бажано обрати інший вид пластику.

Проаналізувавши переваги та недоліки PLA пластика, можемо визначити наступну сферу його застосування:

- 3D-друк великогабаритних виробів.
- 3D-друк виробів з точними розмірами.
- 3D-друк декоративних елементів та сувенірів, яким не потрібен тривалий життєвий цикл.

3.3.2 Пластик ABS

Через невисоку вартість сировини, є одним із самих доступних за ціною пластиків. Його перевагою є вдале поєднання параметрів міцності та пружності, що дозволяє використовувати його для виготовлення механічних виробів, розрахованих на тривалий строк експлуатації. Широкий діапазон використовуваних температур дозволяє експлуатувати вироби з нього в технічних цілях для побутових та промислових пристроїв.

Легкість механічної обробки, у комплексі з хімічним згладжуванням поверхні недорогими розчинниками типу ацетону, дозволяють робити з ABS декоративні вироби або корпуси з високою якістю поверхні.

Але цей вид пластику погано переносить вплив ультрафіолетового випромінювання, внаслідок чого він жовтіє на сонячному світлі, що обмежує застосування незабарвлених поверхонь на вулиці. ABS не любить протягів під час друку, що значно обмежує його застосування в дешевих «побутових» принтерах з відкритим корпусом.

Через відносно високу усадку ABS схильний до деламінації (розшарування), вимагає наявності стола, що підігрівається до температур 100-110°C. Без нього в більшості випадків при початку процесу друку виникають проблеми із прилипанню до стола першого шару виробу, внаслідок чого потрібно все починати знову.

У процесі друку ABS утворюються шкідливі випари складових компонентів пластику (див. розділ 5), тому друк повинен виконуватись у добре провітрюваному приміщенні, або робоче місце обов'язково оснащується

спеціальною системою витяжної вентиляції, з виходом вентиляційного каналу за межі приміщення (не в якому разі не в загальну систему вентиляції!).

Ці властивості на нашу думку обумовлюють наступну сферу застосування даного пластику:

- друк декоративних виробів із наступною обробкою;
- друк технічних виробів типу кронштейнів, втулок, тяг, валів із невеликою кількістю гострих кутів;
- дрібносерійний друк корпусів і комплектуючих;
- друк виробів, розрахованих на довгий термін служби під час відсутності впливу прямого сонячного світла.

3.3.3 Пластики PETG, PCTG та CoPET

Важливо те, що за асортиментом доступних кольорів та по своїм споживчим якостям популярні пластики PETG, PCTG та CoPET практично не поступаються ABS.

Завдяки тому, що PETG, PCTG та CoPET значно менш токсичні, ніж ABS, то заходи з техніки безпеки для них менш суворі. Невеликий відсоток усадки дозволяє друкувати деталі із високим ступенем точності, а гарні механічні характеристики дозволяють застосовувати PETG, PCTG та CoPET для друку таких деталей, як корпуси та вали редукторів, працюючих із помірними навантаженнями, зубчасті шестерні та колеса, кронштейни, тяги, опори та кришки. Завдяки дуже щільному спіканню між друкованими шарами, гарному ковзанню та удароміцності PETG, PCTG та CoPET дуже гарно піддаються механічний після обробці свердлінням, точінням, фрезеруванням, нарізанню різьби та ін., тому вони є дуже перспективними пластиками для застосування у промисловості при виробництві одиничних та дрібносерійних виробів.

Ще однією перевагою цих пластиків є висока стійкість до ультрафіолету, тому вироби із них можна використовувати поза приміщеннями.

Недоліком матеріалів цього типу є висока плинність під час друку, що вимагає ретельного настроювання ретрактів у 3D принтері та контролю налаштування під час друку. Висока температура друку здатна досить швидко вивести із ладу фторопластові вставки в хотенді, та вимагає застосування суцільнометалевих термічних бар'єрів, які коштують дещо дорожче, ніж традиційні. Міцність і температура розм'якшення PETG, PCTG та CoPET нижче, ніж в ABS.

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що з урахуванням широкого температурного діапазону експлуатації, а також те, що під час друку не потрібна закрита камера, можна рекомендувати пластики PETG, PC/PTG та CoPET для друку масштабних прототипів перспективних технічних виробів, наприклад для корпусів редукторів гідропідсилювачів рульового керування, друку помірно навантажених кінематичних пар, елементів меблевого та інтер'єрного декору, а також виробів, що експлуатуються у вуличних умовах.

3.3.4 Nylon

Висока стійкість нейлону, його міцність до високих температур, пружність, термостійкість, хімічна стійкість, гарне ковзання та стійкість до стирання роблять цей матеріал незамінним для різноманітних шестірень і конструкційних деталей. Однак, ці переваги значною мірою нівелюються дуже високою усадкою, необхідністю використання закритої камери для друку та неможливістю створення великих за розмірами виробів. Внаслідок цього, окрім застосування принтера, який налаштований саме під використання нейлону в якості витратного матеріалу, потрібно ще ретельно зберігати та підготовлювати філамент (нейлонову нитку). Також потрібно буде обов'язково враховувати високу ступінь усадки нейлону та під час моделювання віртуальної моделі необхідно обов'язково корегувати розміри з урахуванням коефіцієнту усадки. Сфера застосування нейлону лежить у виготовленні втулок ковзання, опорних підшипників, вкладишів та напрямних елементів для технічних виробів, які працюють в умовах підвищених температур та дії хімічних речовин.

3.4 Рекомендації щодо вибору обладнання для 3D друку

3.4.1 Характеристики FDM принтерів

Більшість FDM-систем дозволяють регулювати кілька параметрів процесу печатки, наприклад такі як температура сопла, платформи, швидкість друку, висота друкованих шарів та кількість обертів вентиляторів охолодження. Ці параметри, зазвичай, встановлюються оператором принтера, і не повинні враховуватись конструктором 3D моделі. Але, якщо з самого початку планується виготовлювати певну деталь методом 3D друку, то можливо прийдеться враховувати розмір стола принтера та висоту шарів самої деталі.

Стандартний розмір друкованої області найбільш розповсюджених 3D-принтерів зазвичай складає біля 200x 200x200 мм, у той час як для промислових моделей він може сягати 1000x1000x1000 мм. Якщо доступний тільки настільний 3D принтер, то виходом із положення може бути розбиття моделі на декілька складових, більш дрібних частин, які потім з'єднуються поміж собою за допомогою спеціальних високоміцних клеїв (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – Корпус прототипу електропідсилювача, надрукований із декількох частин, які потім були з'єднані поміж собою за допомогою високоміцного клею

Типова висота шарів, використовувана в FDM-технології, варіюється від 50 до 400 мкм і може бути визначена на етапі програмного слайсінгу. Менша висота шару забезпечить більше гладку деталь і більш точно відобразить складну геометрію, у той час як більша висота шару, дає можливість роздрукувати деталь швидше та з меншими витратами. Висота шару 150...200 мкм є оптимальною по співвідношенню часу друку і його якості.

3.4.2 Деформація деталі

Деформація деталей є одним з найпоширеніших дефектів у процесі FDM друку. У деяких видів пластику під час охолодження після екструзії, відбувається доволі значна усадка. Оскільки різні ділянки деталі охолоджуються з різною швидкістю, їхні розміри також можуть бути різними. Диференціальне охолодження викликає нагромадження внутрішніх напружень, які деформують нижній шар, деформуючи його, як показано на рис. 3.3. З технічної точки зору, деформації можна запобігти шляхом більш ретельного контролю температури платформи та камери друку в цілому.

Оператор також може знизити ймовірність відклеювання та інших дефектів, пов'язаних з деформацією за рахунок збільшення адгезії між деталлю

та платформою. Більші плоскі області (наприклад, прямокутний корпус) більше схильні до деформації, тому за можливості треба уникати такого профілю.

Тонкі виступаючі елементи (наприклад - зубці, ребра) також схильні до деформації. У цьому випадку її можна уникнути, додавши небагато матеріалу підтримки по краї тонких елементів (наприклад, прямокутник товщиною 200 мікронів), щоб збільшити площу контакту із основою.

Гострі кути моделей деформуються частіше, ніж закруглені форми, тому трохи згладив кути моделі, можна досягти непоганого результату.

Різні пластики по різному сприйнятливі до деформації: Пластик ABS, як правило, більше чутливий до даного фактора, ніж PLA або PETG, внаслідок більш високої температури стеклування та високого коефіцієнта теплового розширення.

3.4.3 Адгезія між шарами пластику

Висока адгезія (зчеплення) між шарами дуже важлива для деталей, надрукованих за технологією FDM. Коли розплавлений пластик видавлюється через сопло, він з певною силою притискається до попереднього шару. Висока температура та тиск знову розплавляють поверхню попереднього шару та дозволяють зв'язати новий шар зі попереднім. Саме тому міцність зв'язку між різними шарами завжди нижча, ніж базова міцність матеріалу. Це означає, що деталі зроблені за технологією FDM, по своїй природі анізотропні – їх міцність по вертикальній вісі Z завжди буде менше їх міцності по вісях X та Y. Із цієї причини важливо пам'ятати про правильну орієнтацію деталей при проектуванні та яким чином вона буде працювати після встановлення її в механізм.

Більше того, оскільки розплавлений матеріал притискається до попереднього шару, його форма деформується до овалу. Це означає, що деталі навіть при невеликій висоті нанесеного шару завжди будуть мати дещо хвилясту поверхню, і тому дрібні елементи типу невеликих отворів, можуть мати неправильну форму та потребують додаткової обробки після друку.

3.4.4 Використання підтримок

Структура підтримки має важливе значення для створення геометрії деталей з виступами. Оскільки пластик фізично не може бути нанесений «на повітря» і йому потрібна опора, для деяких деталей потрібна додаткова опорна конструкція.

Поверхні, надруковані з підтримками, звичайно мають більше низьку якість, ніж інші частина деталі. Це можна пояснити тим, що навіть якщо

виставити в налаштуваннях друку деяку відстань між підтримками та основним поверхнями деталі, то все рівно буде відбуватись деяке зплавлення шарів пластику поміж собою. Після видалення підтримок на основній поверхні все рівно остаються невеликі заусенці, які потребують додаткової обробки наждачним папером або лезвійним інструментом. Із цієї причини рекомендується, щоб деталь була змодельована таким чином, щоб мінімізувати потребу в підтримці.

Опори звичайно друкуються з того ж матеріалу, що й основна деталь. Існують також спеціальні матеріали, які розчиняються в рідині, але в основному вони використовуються в настільні або промислових 3D-принтерах високого класу. Друк на розчинних підтримках значно поліпшує якість поверхні деталі, але збільшує загальну вартість друку, тому що потрібен спеціальний принтер із двома друкуючими голівками і до того додається відносно висока вартість розчинного матеріалу (наприклад, лімонелу).

3.4.5 Заповнення та товщина оболонок

Деталі за технологією FDM зазвичай не друкуються повністю заповненими, щоб скоротити час печатки та заощадити матеріал. Замість цього зовнішній периметр виробу робиться за допомогою декількох проходів, він називається оболонкою, а внутрішня частина заповнюється структурою низької щільності, називаної заповненням.

Заповнення та товщина корпусу дуже сильно впливають на міцність деталі. Для настільних FDM 3D-принтерів в основному підходить щільність заповнення біля 25...30% і товщина корпусу 1...1,5 мм. Звичайно, це стандартні налаштування для швидкого друку та гарний компроміс між міцністю і швидкістю.

3.4.6 Основні витратні матеріали FDM

Однієї із сильних сторін технології FDM-друку є різноманітний асортимент доступних матеріалів. Вони можуть варіюватися від звичайних пластиків (таких як PLA і ABS) до інженерних (таких CoPET або PETG) і високоміцних матеріалів (таких як нейлон). Деталі, отримані за технологією FDM можуть бути оброблені відповідно до наявних стандартів. При використанні різних методів, таких як: шліфування, полірування, ґрунтовка, фарбування, холодне зварювання, ацетонова лазня (для згладжування поверхні та створення глянцевої поверхні), епоксидне покриття та металізація.

3.5 Алгоритм 3D друку за технологією FDM

За результатами досліджень нами було розроблено вдосконалений алгоритм 3D друку за технологією FDM деталей із технічних пластиків при одиничному та дрібносерійному виробництві.

Алгоритм 3D друку за технологією FDM показано на рис. 3.9

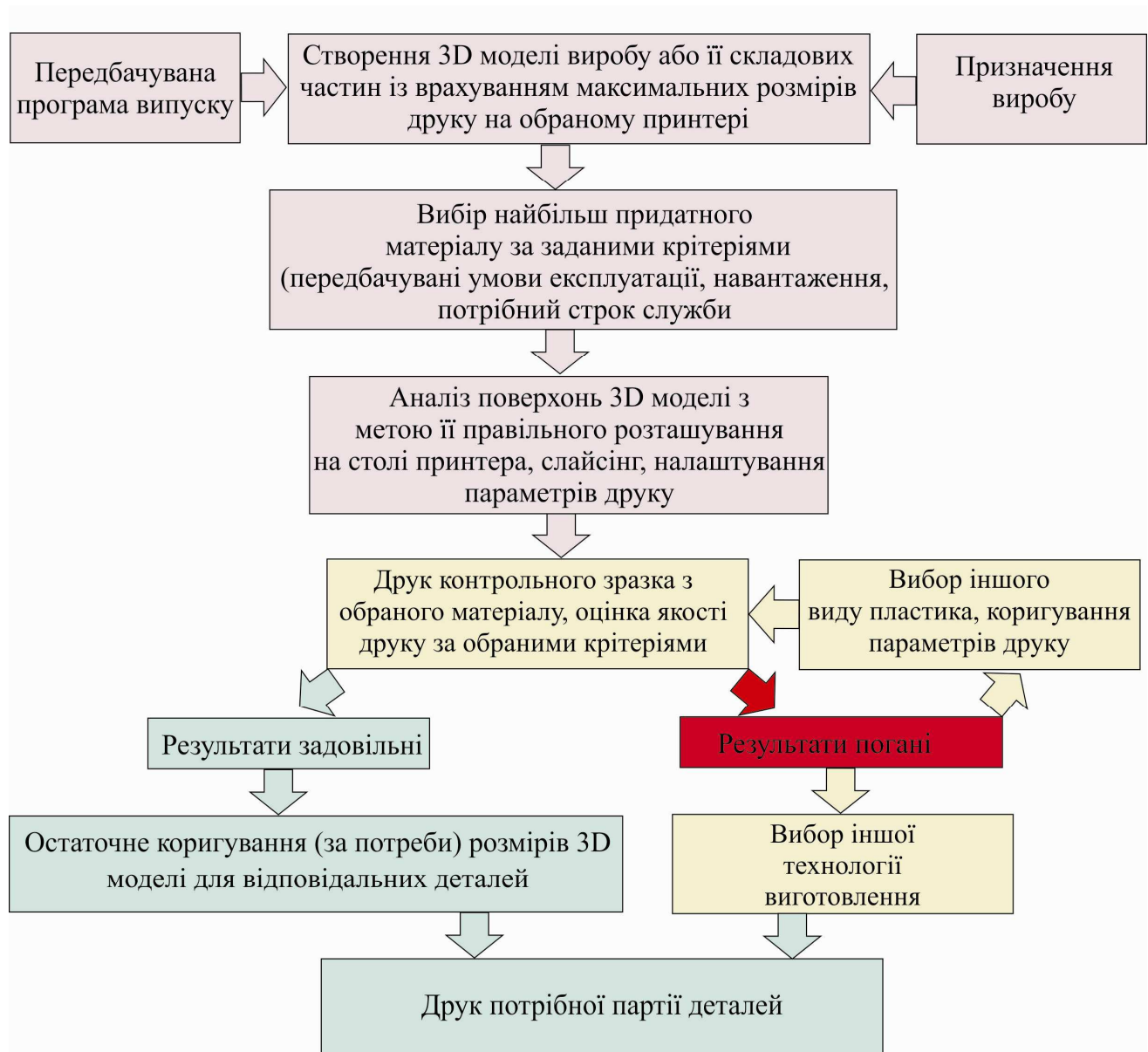


Рисунок 3.9 – Алгоритм 3D друку за технологією FDM

3.6 Висновки по розділу

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити наступні висновки по розділу:

1) FDM 3D-друк є найбільш економічним способом виробництва нестандартних та одиничних термопластичних деталей або прототипів.

2) Час виконання FDM-друку прийнятний для одиничного та дрібносерійного виробництва, а існуюча технологія досить доступна та відпрацьована.

3) Існує різноманітний асортимент матеріалів, що підходять як для прототипування, так і для деяких комерційних функціональних застосувань.

4) FDM 3D-друк має найнижчу розмірну точність і роздільну здатність у порівнянні з іншими технологіями 3D-друку, тому він не дуже підходить для моделей зі складною геометрією та дрібними деталями.

5) Кінцевий продукт внаслідок особливостей технології друку буде мати видимі лінії шарів, тому якщо потрібен гарний зовнішній вид то потрібна додаткова обробка.

6) Механізм адгезії шаруючи робить деталі отримані за допомогою FDM 3D-друку анізотропними

7) За допомогою FDM 3D-друку, можна досить швидко та за низькою ціною робити прототипи та функціональні деталі. Типовий розмір платформи настільних FDM 3D-принтерів становить 200x 200x200 мм. Промислові зразки мають значно більший розміри друкованого об'єму (від 1000x1000x1000 мм).

8) Для запобігання деформації деталі, загинання кутів і т.д., на пластиках, що мають значний відсоток усадки, уникайте більших плоских ділянок і додавайте підтримки в гострі кути (величина яких $>45^\circ$).

9) Деталь, отримана за допомогою FDM 3D-друку по своїй природі є анізотропною, тому не рекомендується використання таких деталей для механічно важливих компонентів, які є відповідальними.

10) При усадці отвору його розміри завжди «уходять» в мінус. Це пов'язане з розподілом напружень у деталі.

Усадка по осях не лінійна. По вісі Z вона менше ніж по X и Y. Це можна пояснити тим, що шар пластику по вісі Z опускається на опорний столик поза залежністю від усадки. Особливо це помітно на матеріалі PLA із столиком, температура якого становить не більш ніж 50...55°C.

При друк пластиком у закритій камері, із температурою столика 100-110°C, усадка по осях не так сильно відрізняється. Можна використовувати один коефіцієнт по всіх осях (об'ємна усадка).

Але все рівно відсоток усадки для одного й того-ж пластику потрібно підбирати практичним шляхом. В основному усадка буде залежати від

температури екструзії. Чим вище температура, тим вище усадка. В цьому випадку потрібно знайти розумний компроміс між адгезією між шарами та усадкою. Саме для цього була розроблена тестова модель «температурний стовпчик». Так само на усадку впливають: товщина шару пластика, діаметр сопла, вид і відсоток заповнення, товщина стінок, габарити деталі, швидкість друку, характер обдува деталі тощо.

Розділ 4

Економічне обґрунтування ефективності виготовлення деталей із пластика методом 3D-друку

4.1 Загальні вихідні дані

Для вирішення питання щодо ефективності використання 3D-принтера для виготовлення деталей типу корпус або шестерня із технічних пластиків в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва, у якості бази для порівняння ми обрали промисловий термопластавтомат (ТМА) українського виробництва моделі ДЕ 3132-250Ц1. За допомогою даного інжекційно-ливарного обладнання, призначеного для створення виробів методом литва під тиском, виготовляється велика кількість різноманітної продукції.

Не зважаючи на доволі прийнятну вартість термопластавтоматів і переваги технології литва під тиском, вона виправдовує себе лише в умовах масового та великосерійного виробництва. Це пов'язано, насамперед, із тим, що крім основного обладнання (ТМА) необхідне використання додаткового: чиллера (для охолодження прес-форм), сушильного бункера (для підготовки гранул до завантаження в автомат), міксеру (для змішування сировини), завантажувача (для забезпечення безперервної подачі гранул у ТМА), транспортеру (для автоматизації виробничого процесу). Зрозуміло, що використання трудомісткої технології литва під тиском потребує залучення відповідної кількості персоналу: проектувальника прес-форми, робітника для її виготовлення, оператора ТПА, наладчика, підсобного робітника.

Застосування для виготовлення даних деталей 3D-принтера моделі DELTA передбачає залучення для роботи одного висококваліфікованого інженера-конструктора, який, за сумісництвом, також виконуватиме функцію запуску деталі у друк, тобто функцію оператора принтеру.

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ з/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1	2	3	4	5
1.	Програма випуску деталей	шт./рік	200	200
2.	Потреба в обладнанні: – 3D-принтер DELTA; – термопластавтомат ДЕ3132-250Ц1; – чиллер ТСН-42; – сушильний бункер; – міксер; – вакуумний завантажувач	од.	1 1 1 1 1	1
3.	Штучний час виготовлення деталі на основному обладнанні	год.	0,8	8
4.	Питомий час роботи допоміжного обладнання в розрахунку на одну деталь: – чиллер ТСН-42; – сушильний бункер; – міксер; – вакуумний завантажувач	хв.	15,0 7,2 0,3 2,3	
4.	Площа, яку займає обладнання: – 3D-принтер DELTA; – термопластавтомат ДЕ3132-250Ц1; – чиллер ТСН-42; – сушильний бункер; – міксер – вакуумний завантажувач	м ²	5,63 1,35 3,75 0,75 1,81	2,0

5.	Потужність електродвигунів / група ремонтної складності механічної частини – 3D-принтер DELTA; – термопластавтомат ДЕ3132-250Ц1; – чиллер ТСН-42; – сушильний бункер; – міксер – вакуумний завантажувач	кВт/УРО	20/40 14,2/22 2,2/8 1,8/2 1,5/8,5	0,45/4,0
6.	Потужність електронагрівачів: – основного обладнання; – допоміжного обладнання	кВт	9,5 1,7	1,0
7.	Ціна витратного матеріалу: - полімерного прутка - пластикових гранул	грн./кг	- 155	240 -

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4	5
8.	Оптова ціна: – 3D-принтера DELTA; – термопластавтомату ДЕ3132-250Ц1; – чиллера ТСН-42; – сушильного бункера; – міксера; – вакуумного завантажувача; – транспортер	грн.	420000 120000 22700 4800 24000 12000	13050

4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва деталі

Підготовка виробництва деталі в базовому варіанті включає проектування і виготовлення пресформи, а також організаційну підготовку

виробництва, що в цілому займає 150-200 год. Витрати на таку підготовку, за даними підприємства, становлять близько 50000 грн.

Підготовка виробництва деталі на 3D-принтері передбачає розробку 3D-моделі, яка включає її проектування (40 год.), пробний друк (8 год.) та виправлення моделі (8 год.). Витрати на підготовку виробництва деталі визначаємо за формулою:

$$B_{nv} = T_{nv} \cdot Z_{cz} \cdot \left(1 + \frac{\kappa_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_e, \quad (4)$$

.1)

де T_{nv} – сумарна трудомісткість підготовки виробництва деталі, год.;

Z_{cz}^k – середньогодинна заробітна плата інженера-проектувальника, грн./год.;

κ_d – додаткова заробітна плата інженера-проектувальника, %;

B_c – єдиний соціальний внесок, %;

H_e – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати).

$$B_{nv} = 56 \cdot 68,18 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 56 \cdot 68,18 \cdot \frac{45}{100} = 6842,0 \text{ грн.}$$

У процесі проектування в базовому і проектному варіантах використовуються ідентичні ліцензійні програми, тому їх вартістю можна знехтувати.

4.3. Розрахунок експлуатаційних витрат у розрахунку на одиницю продукції в базовому та проектному варіантах

Визначення експлуатаційних витрат виконано за методикою, викладеною в [1, с. 18]. Розрахунок виконуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (4.2)$$

де B_m – витрати на основні матеріали, грн.;

B_3 – витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями у соціальні фонди персоналу, зайнятого виробництвом деталі грн.;

B_{ec} – витрати на силову електроенергію, грн.;

B_{em} – витрати на електроенергію технологічну (для нагріву), грн.;

B_{md} – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

B_n – витрати на утримання приміщення, грн.;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн.;

B_{in} – витрати на налагодження обладнання, грн.;

B_{in} – інші витрати (на утримання, ремонт та амортизацію транспортеру, які розраховуються укрупнено через відсутність даних про час його роботи), грн.

Витрати на основні матеріали:

$$M_o = a_p \cdot C_m \cdot K_{mp} - a_s \cdot C_s, \quad (4.3)$$

де a_p - норма витрат матеріалу на деталь, кг.;

C_m - ціна матеріалу, грн./кг.;

K_{mp} - коефіцієнт, який враховує транспортно-заготівельні витрати, витрати на зберігання матеріалів (приймається у розмірі 1,05...1,08);

a_s, C_s – відповідно маса та ціна відходів (через можливість повторного використання відходів у виробництві в базовому та проектному варіантах їх вартістю можна знехтувати).

В базовому варіанті:

$$M_{o.b} = 0,5 \cdot 155,0 \cdot 1,05 = 81,38 \text{ грн.};$$

В проектному варіанті:

$$M_{o.np} = 0,5 \cdot 240,0 \cdot 1,05 = 126,00 \text{ грн.}$$

Витрати на заробітну плату основну, додаткову з відрахуваннями на соціальні потреби:

$$B_3 = C_r \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (4.4)$$

де $T_{\text{нор}}$ – час виготовлення деталі, хв.;

K_d, K_c – відповідно коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальні потреби.

Витрати за даною статтею визначаються з урахуванням того, що в базовому варіанті для виконання основних операцій потрібні 2 робітника (оператор 5-го розряду та підсобний робітник 2-го розряду). В проектному варіанті друк на 3D-принтері виконує інженер-проектувальник, який витрачає на друк однієї деталі 42 хв. або 0,7 год. (10 хв. на налаштування та запуск друку і 32 хв. на його періодичний контроль). Решту часу під час роботи принтера він може займатися іншою роботою.

$$B_{зб} = (54,454 \cdot 0,8 + 35,429 \cdot 0,87) \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 99,83 \text{ грн.};$$

$$B_{з.пр} = 68,18 \cdot 0,7 \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 64,04 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$P_e = \frac{N_b \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \frac{T_{нор}}{60} \cdot C_{ел}, \quad (4.5)$$

де N_b – встановлена потужність електродвигунів обладнання, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи моторів ($K_o=0,65\dots0,8$);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю;

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за часом ($K_d=0,3\dots0,5$);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів ($\eta_c=0,86\dots0,9$);

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства ($\eta_m=0,92\dots0,96$);

$C_{ел}$ – ціна 1 кВт-год силовій електроенергії, грн.

$$B_{ел}^{баз} = \frac{(20 \cdot 48 + 14,2 \cdot 15 + 2,2 \cdot 7,2 + 1,8 \cdot 0,3 + 1,5 \cdot 2,3) \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,88 \cdot 0,95 \cdot 60} \cdot 4,21 = 16,82 \text{ грн.};$$

$$B_{ел}^{пр} = \frac{0,45 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 0,4 \cdot 8,0}{0,88 \cdot 0,95} \cdot 4,21 = 3,05 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію технологічну (для нагрівання матеріалу):

$$B_{em} = N_n \cdot K_N \cdot K_q \cdot T_n \cdot C_{el}, \quad (4.)$$

6)

де N_n – потужність електронагрівача, кВт;

K_N, K_q – коефіцієнти завантаження електронагрівача відповідно за потужністю та за часом ($K_N=0,55-0,7$; $K_q=0,4-0,7$);

T_n – час нагрівання, год.;

C_{el} – ціна 1 кВт-год електроенергії, грн.

$$B_{em.б} = (9,5 + 1,7) \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 4,21 = 9,60 \text{ грн.};$$

$$B_{em.пр} = 1,0 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0,25 \cdot 4,21 = 0,31 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{mb} = \frac{M_{гв} \cdot R_m \cdot T_{нор}}{60 \cdot 100} \cdot K_{п}, \quad (4.7)$$

де $M_{гв}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини всіх типів обладнання, коп.;

R_m – категорія складності ремонту механічної частини обладнання, УРО;

$K_{п}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для одиничного $K_{п} = 0,85$).

$$B_{ом.б} = \frac{29,5 \cdot (40 \cdot 48 + 22 \cdot 15 + 8 \cdot 7,2 + 2 \cdot 0,3 + 8,5 \cdot 2,3)}{100 \cdot 60} \cdot 0,85 = 9,73 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_p = \frac{R_m \cdot \Gamma_{вм} \cdot K_{ве} \cdot T_{нор}}{F_{дрм} \cdot 60}, \quad (4.8)$$

де $\Gamma_{вм}$ – річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної частини обладнання, грн./рік;

$K_{ве}$ – коефіцієнт, який враховує витрати на ремонт електричної частини обладнання;

$F_{дрм}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання (при однозмінному режимі роботи для одиничного виробництва – 2010 год.).

$$B_{p.б} = \frac{(40 \cdot 48 + 22 \cdot 15 + 8 \cdot 7,2 + 2 \cdot 0,3 + 8,5 \cdot 2,3) \cdot 680 \cdot 1,3}{2010 \cdot 60} = 17,06 \text{ грн.};$$

$$B_{p.нр} = \frac{4,0 \cdot 680 \cdot 1,3 \cdot 8,0}{2010} = 14,07 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{yn} = \frac{F_o \cdot K_d \cdot C \cdot T_{нор}}{F_{дрм} \cdot 60}, \quad (4.9)$$

де F_o – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, m^2 ;

K_d – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення) [1];

C – річні витрати, пов'язані з використанням $1 m^2$ виробничого приміщення, грн./ m^2 .

$$B_{yn.б} = \frac{(5,63 \cdot 3 \cdot 48 + 1,35 \cdot 4 \cdot 15 + 3,75 \cdot 3,5 \cdot 7,2 + 0,75 \cdot 4 \cdot 0,3 + 1,81 \cdot 4 \cdot 2,3) \cdot 450}{2010 \cdot 60} = 3,75 \text{ грн.};$$

$$B_{yn.нр} = \frac{2,0 \cdot 3,5 \cdot 450 \cdot 8,0}{2010} = 12,54 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію обладнання:

$$B_a = \frac{\Phi_{бал} \cdot H_a \cdot T_{нор}}{F_{дрм} \cdot 100 \cdot 60}, \quad (4.10)$$

де $\Phi_{бал}$ – балансова вартість одиниці обладнання, грн.;

H_a – норма амортизації, %;

Балансову вартість одиниці обладнання знайдемо за формулою:

$$\Phi_{бал} = \Pi_{опт} \cdot (1 + K_{тр} + K_m + K_{\Phi}), \quad (4.11)$$

де $\Pi_{опт}$ – оптова ціна одиниці обладнання, грн.;

$K_{тр}$, K_m , K_{Φ} – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) обладнання та його встановлення на місці використання (0,02...0,08).

Балансова вартість:

$$\Phi_{бал(ТМА)} = 420000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 499800 \text{ грн.};$$

$$\Phi_{бал(TCH-42)} = 120000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 142800 \text{ грн.};$$

$$\Phi_{бал(суш.бункер)} = 22700 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,02) = 26332 \text{ грн.};$$

$$\Phi_{бал(міксер)} = 4800 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,02) = 5568 \text{ грн.};$$

$$\Phi_{бал(зав-ч)} = 24000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,02) = 27840 \text{ грн.};$$

$$\Phi_{бал(тр-р)} = 12000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,02) = 13920 \text{ грн.}$$

Сумарна балансова вартість базового обладнання:

$$\Phi_{бал.б} = 716260 \text{ грн.}$$

$$\Phi_{бал(3D-принтер)} = 13050 \cdot (1 + 0,06 + 0,05 + 0,02) = 14355 \text{ грн.}$$

$$B_{a.б} = \frac{(499800 \cdot 48 + 142800 \cdot 15 + 26332 \cdot 7,2 + 5568 \cdot 0,3 + 27840 \cdot 2,3) \cdot 15}{2010 \cdot 100 \cdot 60} = 32,82 \text{ грн.};$$

$$B_{a.пр} = \frac{14355 \cdot 15 \cdot 8}{2010 \cdot 100} = 8,57 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження обладнання:

$$P_n = C_{гн} \cdot (1 + K_{\partial}) \cdot (1 + K_c) \cdot \frac{T_{нал} \cdot A}{60 \cdot N_{\partial}}, \quad (4.12)$$

де $C_{гн}$ – годинна тарифна ставка наладчика, грн./год.;

A – кількість налагоджень за рік;

$T_{нал}$ – час налагодження, хв.;

N_{∂} – річна програма випуску деталей, шт./рік.

$$B_{н.б} = (64,417 \cdot 64,8 + 54,754 \cdot 45) \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) \cdot \frac{1}{60 \cdot 200} = 0,28 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження 3D-принтера увійшли у вартість підготовки виробництва.

Інші витрати, які зокрема враховують витрати на утримання, ремонт і амортизацію транспортера (% від загальних витрат на утримання та експлуатацію обладнання).

$$B_{ін} = 90,06 \times 0,1 = 9,01 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Експлуатаційні витрати (собівартість виготовлення деталі)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Матеріали основні	M_o	81,38	126,00
2	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями на соціальні потреби	B_z	99,83	64,04
3.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	16,82	3,05
4.	Технологічна електроенергія	$B_{ет}$	9,60	0,31
5.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	9,73	-
6.	Ремонт обладнання	B_p	17,06	14,07
7.	Утримання приміщення	$B_{ун}$	3,75	12,54
8.	Амортизація обладнання	B_a	32,82	8,57
9.	Налагодження обладнання	B_n	0,28	-
10.	Інші витрати	$B_{ін}$	9,01	-
Загальна сума		B_e	280,28	228,58

4.4. Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект від впровадження технології 3D-друку для виробництва деталі типу шестерня розрахуємо на основі [1, с. 23] за формулою:

$$E_p = (B_{e.б} - B_{e.пр}) \cdot N_p - E_n \cdot K, \quad (4.13)$$

де $B_{e.б}$, $B_{e.пр}$ - експлуатаційні витрати в розрахунку на одну деталь відповідно в базовому та проектному варіантах, грн.;

N_p - річний обсяг виготовлення деталей, шт.;

K - додаткові капітальні витрати, грн.

$$K = (B_{пв.пр} + \Phi_{бал.пр} \cdot Q_{пр}) - (B_{пв.б} + \Phi_{бал.б} \cdot Q_{баз}), \quad (4.14)$$

де $B_{пв.пр}$, $B_{пв.б}$ - відповідно витрати на підготовку виробництва деталі в проектному і базовому варіантах, грн.;

$\Phi_{бал.пр}$, $\Phi_{бал.б}$ – відповідно балансова вартість обладнання в проектному і базовому варіантах, грн.;

$Q_{пр}$, $Q_{баз}$ – потреба в обладнанні відповідно в проектному і базовому варіантах;

$$K = (6842 + 13920 \cdot 1) - (50000 + 716260) = -745500 \text{ грн.}$$

$$E_p = (280,28 - 228,58) \cdot 200 - 0,16 \cdot (-745500) = 130000 \text{ грн.}$$

Висновок: Виконані розрахунки доводять ефективність виготовлення деталей із пластику методом 3D-друку в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва. Так в процесі порівняння даної технології виготовлення деталі типу шестерня з базовою технологією її виробництва із застосуванням промислового термопластавтомату визначено, що впровадження проектного варіанту дозволить досягти економії виробничих площ і чисельності працівників, знизити експлуатаційні витрати (собівартість виготовлення деталі) більше, ніж на 18%, отримати економію капітальних витрат у 745,5 тис. грн. та отримати річний економічний ефект у розмірі 130 тис. грн.

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 - Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Оди- ниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1.	Потреба в технологічному обладнанні	од./рік	6	1	-83,3
2.	Річний обсяг виробництва деталі типу шестерня	кг/рік	200	200	–
3.	Штучний час виробництва на основному обладнанні	год.	0,8	8,0	+99,9
4.	Питомий час роботи допоміжного обладнання в розрахунку на одну деталь	хв.	24,8	–	–
5.	Ціна витратного матеріалу	грн./кг	155	240	+35,4
6.	Експлуатаційні витрати (собівартість виготовлення деталі)	грн.	280,28	228,58	-18,4

7.	Балансова вартість обладнання	грн.	716260	13920	-98,1
8.	Капітальні витрати на підготовку виробництва деталі	грн.	50000	6842	-86,3
9.	Річний економічний ефект	грн.	—	130000	—

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 У чому суть топографічних, монографічних, економічних та ергономічних методів аналізу травматизму.

Проведення аналізу травматизму та захворювань на сучасному виробництві дозволяє виявляти несприятливі фактори умов і безпеки праці та вчасно вживати заходів по його усуненню [17].

Застосовуються кілька методів аналізу, у тому числі такі, як монографічний, топографічний, ергономічний та економічний.

Травми можуть групуватися по однорідних ознаках, тобто часу травмування, віку, кваліфікації та спеціальності потерпілих, причинам нещасних випадків. Цей метод називається груповим як різновид статистичного методу.

При топографічному методі всі нещасні випадки систематично наносять умовними знаками на план розташування встаткування в цеху, на ділянці. Концентрація таких знаків на якому-небудь устаткуванні або робочому місці характеризує його підвищену травмонебезпечність і сприяє прийняттю відповідних профілактичних мір.

Монографічний метод аналізу травматизму по суті являє собою аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, властивих тому або інший одному (моно) ділянці виробництва, устаткуванню, технологічному процесу. Цей метод застосуємо не тільки для аналізу вже відбулися нещасних випадків, але й для виявлення потенційних небезпек на досліджуваній ділянці.

Ергономічний метод заснований на комплексному вивченні системи «людина - машина - виробниче середовище».

Ергономіка вивчає та розробляє рекомендації з гармонічного пристосування конструкції технічних пристроїв до психофізіологічних можливостей людини з урахуванням впливу навколишнього середовища.

Інакше кажучи, кожному виду трудової діяльності повинні відповідати певної фізіологічної, психофізіологічної та психологічні (або особистісні) якості людини, а також його антропометричні дані.

Необхідно досягати комплексної відповідності зазначених властивостей людини особливостям конкретної трудової діяльності, що підвищить ефективність і безпека роботи.

Економічний метод полягає у визначенні економічного збитку від травматизму для з'ясування економічної ефективності витрат на розробку та впровадження заходів щодо охорони праці. Цей метод є додатковим, тому що не дозволяє виявити причини травматизму.

Крім названих вище методів відомий метод психофізіологічного аналізу виробничого травматизму окремих категорій робітників. Цей метод враховує особисті якості працівників, дозволяє виявити ряд істотних соціально-психологічних факторів, що впливають на виникнення нещасних випадків, а також причини порушення правил і інструкцій з охорони праці.

Для підвищення якості та строків аналізу травматизму доцільне використання можливості сучасної обчислювальної техніки, тобто системи автоматизованого обліку та аналізу виробничого травматизму.

5.2 Вимоги безпеки під час виготовлення деталей із пластика

Робота з 3D принтером, як і з будь-яким іншим складним пристроєм, вимагає дотримання техніки безпеки.

До того ж, що друкуюча голівка та термостіл розігріваються до температури вище 100 градусів і дотик до них може залишити опік.

1. Категорично забороняється під час роботи 3D принтера торкатися до чогось, окрім кнопок керування. Порушуючи це правило, у кращому випадку, можна одержати синці від деталей, що рухаються, а в гіршому - серйозний опік. Якщо ваш 3D принтер відкритого типу, то варто працювати з ним у припасованому одязі, щоб мінімізувати ризик намотування тканини на деталі, що рухаються. Перевіряти нагрівання принтера можна тільки орієнтуючись на показання термічного датчика самого пристрою, які відображаються на дисплеї або в програмі друку.

2. Котушка із пластиком установлюється таким чином, щоб були виключені її перекиди і затримки в подачі нитки. Іноді, для більше рівномірного розмотування

бобіни, перекидають нитку через підручні предмети типу спинки стільця або поперечини - у цьому випадку оставлена без нагляду пластикова нитка може замотатися або зачепитися за сторонні предмети. Результати цього будуть непередбачені - принтер може впасти зі стола, або, навпаки, зависнути в повітрі, що, у свою чергу, може привести до його поломки або пожежі (не забуваємо про нагріті частини 3D принтера).

3. Допускати дітей, підлітків та студентів до роботи на 3D принтері можна тільки тоді, коли вони здатні повністю усвідомлено підійти до процесу та ознайомлені з правилами техніки безпеки. Перші роботи повинні проводитися під наглядом дорослого або керівника.

4. При нагріванні пластику ABS утворюється певна кількість парів акрилонітрила. 3D принтер у середньому викидає до 200 млн. ультрадрібних часток цієї речовини в хвилину. При використанні пластику PLA викидається до 20 млн. часток в хвилину, він більше безпечний, але все-таки теж може завдати шкоди здоров'ю. Осідаючи на легенях, частки пластику можуть привести до найважчих наслідків - раку легенів, астмі і т. ін. Тому місце проведення робіт на 3D принтері повинне добре вентилюватися.

Під час роботи пристрою людині краще вийти з кімнати. Якщо це з якоїсь причини неможливо, бажано скористатися респіратором з вугільним фільтром. Закриті принтери із системою фільтрації вже є на ринку, але вони поки не занадто часто зустрічаються в продажі, до того ж коштують досить дорого. Вони більше безпечні, але властивості використовуваних матеріалів повністю не вивчені, тому не варто зневажати додатковими заходами безпеки та у роботі з ними.

5. Перш ніж вийти з кімнати із працюючим принтером, потрібно переконатися, що перший шар рівно ліг і ніде не відстає від поверхні - адже від його якості залежить 50% якості готового виробу.

6. Для спостереження за 3D принтером бажано встановити камеру відеоспостереження, це дозволить залишатися в курсі поточного стану друку та за потреби оперативно відреагувати на позаштатну ситуацію.

7. Перед початком друку необхідно переконатись в справності 3D принтера та кінцевих датчиків. Тоді при можливому збої принтер сам припинить процес друку.

8. Забороняється друкувати на 3D принтері предмети, які будуть контактувати з гарячою їжею або напоями.

9. Перед зніманням надрукованої деталі необхідно дочекатися остигання термостола, почекавши 10-15 хвилин, це унеможливить отримання опіків.

5.3 Пожежна сигналізація. Засоби виявлення пожежі та сповіщення про пожежу.

Протипожежна сигналізація являє собою сукупність технічних засобів, призначених для раннього виявлення місць загоряння, підвищеної температури або задимлення в будинках і спорудженнях [18]. У випадку ідентифікації надзвичайної ситуації ці засоби включають систему оповіщення, пожежегасіння та димовидалення, виключають припливну вентиляцію та кондиціювання для запобігання поширення вогню.

Світлозвукові оповісники залежно від масштабів використання сигналізації діляться на неадресні, адресні, адресно-аналогові.

Неадресні найчастіше встановлюються на маленьких об'єктах. Ці технічні засоби у випадку ідентифікації вогнища загоряння подають оповіщення про тривогу, що не дозволяє точно ідентифікувати місце виникнення позаштатної ситуації. Вони відрізняються низькою вартістю та високою ймовірністю надходження помилкових сигналів. Адресні встановлюються на середніх і більших об'єктах і, на відміну від неадресних, дозволяють точно ідентифікувати місце виникнення загоряння або задимлення. Адресно-аналогові комплекси є найдорожчими та самими надійними видами протипожежної сигналізації. Вони мають у своєму складі велику кількість різноманітних технічних інструментів, що дозволяють точно визначити місце виникнення позаштатного положення, ідентифікувати його характер і мінімізувати ймовірність помилкових сигналів.

Протипожежна сигналізація містить у собі датчики, приймально-контрольні пристрої, системи оповіщення, канали зв'язку, джерела резервного електроживлення, спеціалізоване ПО та інші комплектуючі. Крім того вони можуть містити в собі ідентифікатори проникнення, вологості та витоків води.

Пожежні датчики діляться на чотири основних види:

- 1) теплові датчики
- 2) димові датчики
- 3) датчики полум'я

4) комбіновані датчики

1) Тепловий датчик пожежної сигналізації (тепловий пожежний оповісник) реагує на наявність перепадів температури. За принципом дії теплові датчики поділяються на:

а) граничні - із заданою межею температури, після чого спрацюють датчики.

б) інтегральні - реагують на різку швидкість зміни температури.

Граничні датчики (пожежні оповісники) - мають порівняно низьку ефективність, що обумовлено порогом температури, на якому датчик спрацьовує (зазвичай порядку 70°C). Непоганий попит на цей вид датчиків обумовлюється їх невисокою ціною. Інтегральні пожежні оповісники здатні зареєструвати пожежу на її ранніх стадіях. Однак, оскільки в них застосовуються два термоелементи (один у самій конструкції датчика, а іншої виноситься за межі датчика), а в сам датчик вбудовується система обробки сигналу, ціна таких пожежних оповісників буде відчутною.

Використовувати тепловий датчики пожежної сигналізації треба тільки тоді, коли основна ознака пожежі – це тепло.

2) Димові датчики пожежної сигналізації визначають наявність у повітрі диму. Майже всі вироблені димові датчики працюють відповідно до принципу розсіювання на частках диму інфрачервоного випромінювання. Мінус такого датчика - він може хибно спрацювати при певній кількості пилу або пари в приміщенні, де він встановлений. Однак димовий датчик також надзвичайно розповсюджений, хоча, зрозуміло, не використовується в запилених кімнатах і приміщеннях для паління.

3) Датчик полум'я сконструйований таким чином, щоб він надійно спрацьовував на наявність відкритого полум'я або тліючого вогнища. Оповісники полум'я зазвичай встановлюються в таких приміщеннях, де найбільш ймовірна поява швидко пожежі, що швидко розповсюджується без попереднього виділення диму. Вони набагато ефективніше двох попередніх типів датчиків, оскільки виявлення пожежі здійснюється на початковому етапі, коли відсутні такі фактори як дим і значний перепад температури. А в багатьох виробничих приміщеннях, які характеризуються більшим теплообміном або високим рівнем запиленості, використовуються тільки пожежні оповісники полум'я.

4) Комбіновані датчики пожежної сигналізації сполучають у собі кілька способів визначення ознак пожежі. У більшості випадків комбіновані датчики сполучають у собі димовий оповісник разом з тепловим. Це дозволяє точніше

визначити присутність ознак пожежі, щоб подати на пульт сигнал тривоги. Вартість даних датчиків пропорційна складності технологій, які використані при його створенні та виробництві.

Загальна ефективність системи пожежегасіння прямо залежить від правильно сконфігурованої системи пожежної сигналізації, що опирається на дані, одержувані від пожежного оповісника. Саме тому правильне розташування, застосування для певних приміщень підходящого виду датчика, а так само якості пожежних оповісників дозволяє визначити ефективність протипожежної системи будинку в цілому.

Залежно від виду контролюваного показника в комплексах, що захищаються від пожеж, використовуються датчики диму, температури, відкритого вогню, газу.

Звукові оповісники – це системи оповіщення мешканців, відвідувачів або персоналу будинків і споруджень при пожежах, вони служать для своєчасної евакуації людей при надзвичайних ситуаціях.

При надходженні сигналу тривоги використовуються наступні способи попередження:

- голосове (текстове);
- світлове (знаки й пробліскові маячки);
- звукове (сирени);
- зональне (територія приміщення ділиться на зони, кожна з яких має свої характеристики сигналів).

На практиці такі комплекси звичайно використовують комбінацію різних способів залежно від характеру об'єкта та кількості мешканців, відвідувачів або персоналу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. История развития 3D-печати [Електронний ресурс] / Все о 3D принтерах и 3D печати: <http://pechat-3d.ru/>.
2. Лысыч М.Н. Области применения технологий 3D печати [Текст] / М.Н. Лысыч, М.Л. Шабанов, В.В. Романов // Современные наукоемкие технологии. Вып. 1. – 2014. - № 12. - С. 165-169.

3. Аддитивная технология: описание, определение, особенности применения и отзывы. Аддитивные технологии в промышленности [Электронный ресурс] / Хорошие советы. Техника и технологии: <http://alkerz.ru/>.
4. Аддитивные технологии и аддитивное производство [Электронный ресурс] / GLOBATEK 3D. 3D оборудование для профессионалов: <http://3d.globatek.ru/>.
5. Mind-point [Электронный ресурс] / Аддитивные технологии - рывок в будущее: <http://mind-point.ru/>.
6. Баева Л.С. Современные технологии аддитивного изготовления объектов [Текст] / Л.С. Баева, А.А. Маринин // Вестник МГТУ. Т. 17. – 2014. - № 1. – С. 7-12.
7. 3D Today. Энциклопедия 3D печати [Электронный ресурс] / Всё о 3D печати. Аддитивное производство. Основные понятия: <http://3dtoday.ru/>.
8. 3D Daily [Электронный ресурс] / Как устроен FFF/FDM 3D принтер?: <http://3d-daily.ru/>.
9. Романова Е.Б. Применение RP-технологий при прототипировании электронных средств [Текст] / Е.Б. Романова, Т.И. Веселова // Изв. вузов. Приборостроение. Т. 58. № 5. - 2015. - С. 401-405.
10. Мигущенко Р.П. Перспективность FDM технологий в 3D печати [Текст] / Р.П. Мигущенко, М.И. Опрышкина, К.Ю. Куштым // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 148-152.
11. Интернет магазин 3D оборудования [Электронный ресурс] / Свойства, различия и области применения PLA и ABS пластика: <http://mnogochernil.ru>.
12. Техно 3D. Магазин 3D принтеров [Электронный ресурс] / <https://3dpt.ru/blogs/support/petg>
13. FDM-технология. Как это работает [Электронный ресурс] / <https://3dtool.ru/stati/fdm-tekhnologiya-kak-eto-rabotaet/>
14. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів // Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 40 с.
15. Економічні розрахунки організаційно-планові розрахунки при розробці нових виробів. – Кіровоград: КДТУ, 2001. – 36 с.

16. Прогресивні технології 3D друку. Конспект лекцій з елементами кредитно-трансферної системи організації навчального процесу з курсу «Прогресивні технології 3D друку» для студентів спец. 131 «Прикладна механіка», спеціалізація «Мехатроніка, обладнання та процеси 3D друку» /Укл.: П.М. Єрємін. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 83 с.

17. [Електронний ресурс] / URL:

https://vuzlit.ru/135275/metody_analiza_proizvodstvennogo_travmatizma (дата звернення 15.11.2021)

18. [Електронний ресурс] / URL: <https://euroservis.com.ua/i-sistemy-oproveshcheniya/> (дата звернення 15.11.2021)