Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
(рівень вищої освіти)
Розробка системи програмного керування шнековим 3D-принтером для друку керамікою
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-22-1

Єгор ФЛОРУ
(прізвище, ініціали)
Спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)
Керівник доц. Дмитро НІКІТІН
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (прізвище, ініціали)

Харків 2026

Я, Флору Єгор Ігорович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

6 червня 2026 р.  Єгор ФЛОРУ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)
«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Флору Єгору Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи програмного керування шнековим 3D-принтером для друку керамікою
Затверджена наказом університету від 04.06.2026 р. №472 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 16.07.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи
3.1 Тип адитивної технології – шнекова екструзія керамічних паст DIW;
3.2 Тип системи керування – програмно-апаратний комплекс на базі контролера Geek 3D Z370 з прошивкою Marlin
3.3 Тип екструзійного механізму – шнековий екструдер з приводом NEMA 23 (редуктор 1:7);
3.4 Система позиціонування – дві осі X/Y на крокових двигунах NEMA 23, вісь Z – два посилені крокові двигуни NEMA 17;
3.5 Система переміщення друкуючої головки – рейкові напрямні MGN12 з лінійними каретками.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
4.1 Вступ;
4.2 Аналіз предметної області;
4.3 Апаратна частина екструзійного вузла;
4.4 Програмна реалізація та алгоритмічне керування системою;
4.5 Охорона праці;
4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації формату PowerPoint (*.ppt) – 12 с. формату А4

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір матеріалів для проведення розробки	06.04.2026 – 25.04.2026	виконано
2	Аналіз предметної області	27.04.2026 – 16.05.2026	виконано
3	Апаратна частина екструзійного вузла	19.05.2026 – 30.05.2026	виконано
4	Програмна реалізація та алгоритмічне керування системою	03.06.2026 – 28.06.2026	виконано
5	Оформлення кваліфікаційної роботи	29.06.2026 – 06.07.2026	виконано
6	Подання роботи на перевірку нормоконтролю	06.07.2026 – 08.07.2026	
6	Подання роботи на перевірку Інтернетсервісом StrikePlagiarism	09.07.2026 – 10.07.2026	
7	Подання роботи на рецензію	11.07.2026 – 12.07.2026	
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	13.07.2026 – 14.07.2026	
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	16.07.2026	

Дата видачі завдання 06 квітня 2026 р.

Здобувач _____ Єгор ФЛОРУ
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ доц. Дмитро НІКІТІН
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 76 с., 6 табл., 20 рис., 2 дод., 20 джерел.

3D-ДРУК, ШНЕКОВИЙ ЕКСТРУДЕР, КЕРАМІКА, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, MARLIN, АВТОМАТИЗАЦІЯ.

Об’єкт дослідження – процеси адитивного формування виробів з в’язкопластичних керамічних мас методом шнекової екструзії.

Предмет дослідження – апаратно-програмна архітектура системи керування шнековим 3D-принтером, алгоритми компенсації гідродинамічних характеристик матеріалу та налаштування прошивки Marlin.

Мета роботи – розробка системи програмного керування шнековим 3D-принтером для друку керамікою, що забезпечує стабільну подачу матеріалу, підвищення точності друку та покращення якості сформованих виробів.

У результаті роботи запропоновано архітектуру програмного керування, яка забезпечує коректну роботу шнекового механізму з урахуванням реологічних властивостей керамічної маси. Розроблені технічні рішення та конфігурації прошивки Marlin дозволяють нівелювати інерційність потоку матеріалу та підвищити якість друку. Результати роботи можуть бути використані під час створення та модернізації 3D-принтерів для роботи з керамічними та іншими в’язкими композитними матеріалами.

Отриманий результат кваліфікаційної роботи відноситься до цілей сталого розвитку № 9, а саме 9.4 «Підтримка досліджень: Інвестиції у науку та створення нових технологій».

ABSTRACT

The explanatory note contains: 76 p., 6 tabl., 20 fig., 2 app., 20 sources.

3D PRINTING, SCREW EXTRUDER, CERAMICS, SOFTWARE, MARLIN, AUTOMATION.

The object of research is the processes of additive manufacturing of ceramic products using screw extrusion technology.

The subject of research is the hardware-software architecture of the control system for a screw 3D printer, material hydrodynamic characteristic compensation algorithms, and Marlin firmware configuration.

The goal of the work is to ensure the stability and precision of the printing process with ceramic materials by developing and optimizing the screw extruder control system software.

As a result of the work, a software control architecture has been proposed that ensures the correct operation of the screw mechanism, taking into account the rheological properties of the ceramic mass. The developed technical solutions and Marlin firmware configurations allow for neutralizing material flow inertia and improving print quality. The results of the work can be used in the development and modernization of 3D printers for working with ceramics and other viscous composite materials.

The obtained results of the qualification work relate to Sustainable Development Goal No. 9, namely 9.4 "Support for research: Investment in science and creation of new technologies".

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....9
Вступ.....10
1 Аналіз предметної області.....12
1.1 Види технологій 3D – друку.....12
1.1.1 Друк полімерами……13
1.1.2 Друк металом……..17
1.2 Аналіз методів 3D-друку кераміки.....20
1.3 Струменеві технології 3D-друку……..21
1.4 Методи фотополімеризації SLA та DLP……..24
1.5 Технологія шнекової екструзії паст DIW……25
1.6 Порівняльний аналіз технологій 3D-друку кераміки……..…26
1.7 Керамічні пасти для шнекової екструзії…….….27
1.8 Аналіз шнекових екструдерів та систем керування……30
1.9 Технічне завдання та вимоги до системи керування…….…34
1.10 Аналіз існуючих слайсерів для 3D-друку керамікою……..36
1.11 Алгоритми Pressure Advance та розумного ретракту……37
1.12 Висновки до першого розділу……38
2 Апаратна частина екструзійного вузла.....39
2.1 Апаратна архітектура екструзійного вузла……..39
2.1.1 Обґрунтування конструкції шнекового механізму……..…39
2.1.2 Система автоматичної зміни інструментів Tool Changer……40
2.2. Система управління та енергетичне забезпечення комплексу……41
2.3 САУ для планетарного двигуна шнекового екструдера……43
2.4. Виконавчі механізми та приводи екструзійного вузла……46
2.5 Висновки до другого розділу……..…47
3 Програмна реалізація та алгоритмічне керування системою……..……48
3.1 Обґрунтування вибору програмно-апаратної платформи керування……....48
3.2 Адаптація прошивки Marlin під специфіку шнекової екструзії……48

3.3 Алгоритмізація процесу зміни інструментів Tool Changer……49
3.4 Конструктивні параметри шнекового екструдера……..49
3.5 Моделювання прискорень і швидкісних режимів друку……52
3.6 Розрахунок дозування та кроків двигуна……55
3.7 Алгоритм зміни інструментів……...56
3.8 Програмна адаптація алгоритму компенсації тиску Advance……57
3.9 Програмне налаштування апаратного відкату Firmware Retract……58
3.10 Висновки до третього розділу……60
4 Охорона праці…….....……..…...61
4.1 Опис лабораторного переміщення……...61
4.2 Небезпечні та шкідливі фактори FFF/FDM-технології……..62
4.3 Вентиляція та контроль повітряного середовища……..63
4.4 Висновки до четвертого розділу……...64
Висновки…….……..……...…65
Перелік джерел посилання.....66
Додаток А Код програми…….....……69
Додаток Б Демонстраційний матеріал.……...……71

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene (акрилонітрил-бутадієн-стирол);

CAD – Computer-Aided Design (система автоматизованого проєктування);

DIW – Direct Ink Writing (прямий друк чорнилами);

DLP – Digital Light Processing (цифрова обробка світла);

DMLS – Direct Metal Laser Sintering (пряме лазерне спікання металу);

FDM – Fused Deposition Modeling (моделювання методом пошарового наплавлення);

FFF – Fused Filament Fabrication (виготовлення методом пошарового наплавлення філаменту);

LCD – Liquid Crystal Display (рідкокристалічний дисплей);

MJ – Material Jetting (струменеве нанесення матеріалу);

MJP – MultiJet Printing (багатоструменевий друк);

PLA – Polylactic Acid (полілактидна кислота);

PolyJet – технологія струменевого нанесення фотополімеру;

RepRap – Replicating Rapid Prototyper (самовідтворюваний прототипувальник);

SLA – Stereolithography (стереолітографія);

SLM – Selective Laser Melting (селективне лазерне плавлення).

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток адитивних технологій сприяє їх активному впровадженню у промисловість, медицину, будівництво та наукові дослідження. Особливу увагу привертають технології тривимірного друку керамічними матеріалами, які дозволяють виготовляти вироби складної геометрії з високою точністю та мінімальними витратами матеріалу. На відміну від традиційних методів формування кераміки, адитивне виробництво забезпечує можливість створення індивідуалізованих виробів без використання складного технологічного оснащення.

Однією з найбільш перспективних технологій друку керамікою є шнекова екструзія (Direct Ink Writing), що забезпечує стабільну подачу високов'язких керамічних паст. Однак ефективність роботи таких систем значною мірою залежить від алгоритмів програмного керування, які повинні забезпечувати точне дозування матеріалу, синхронізацію руху координатної системи з роботою шнекового екструдера, компенсацію інерційних процесів під час друку та підтримання стабільних параметрів екструзії. Недостатня точність керування призводить до нерівномірної подачі матеріалу, погіршення якості поверхні виробів, виникнення дефектів шарів та зниження точності друку.

У зв'язку з цим розробка системи програмного керування шнековим 3D-принтером, яка поєднує сучасну апаратну платформу, ефективні алгоритми керування екструзією та оптимальні режими роботи, є актуальним науково-практичним завданням.

Об'єкт дослідження – процес програмного керування шнековим 3D-принтером під час друку керамічними матеріалами.

Предмет дослідження – апаратно-програмні засоби, алгоритми керування екструзією та програмне забезпечення системи керування шнековим 3D-принтером.

Мета роботи – розробка системи програмного керування шнековим 3D-принтером для друку керамікою, що забезпечує стабільну подачу матеріалу,

підвищення точності друку та покращення якості сформованих виробів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– провести аналіз сучасних технологій адитивного виробництва керамічних виробів;

– виконати порівняльний аналіз існуючих конструкцій шнекових екструдерів та систем програмного керування;

– обґрунтувати вибір апаратної платформи та компонентної бази системи керування;

– розробити конструкцію друкуючої головки та шнекового екструдера;

– провести моделювання навантажень, прискорень та визначити оптимальні швидкісні режими роботи друкуючої головки;

– розробити алгоритми дозування матеріалу, компенсації тиску (Pressure Advance), розумного ретракту та зміни інструментів;

– виконати програмну реалізацію системи керування на базі прошивки Marlin;

– оцінити працездатність запропонованих технічних рішень;

– оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з використанням навчально-методичних матеріалів [2-4].

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні системи програмного керування шнековим 3D-принтером для друку керамікою, яка може бути використана під час створення лабораторних, науково-дослідних та промислових адитивних установок. Запропоновані конструктивні рішення, алгоритми керування та результати моделювання можуть бути використані для підвищення точності дозування керамічних паст, стабільності процесу друку та покращення якості готових виробів.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Види технологій 3D-друку

Стрімкий розвиток сучасних інформаційних та виробничих систем у 21 столітті призвів до радикальних змін у підходах до проектування та виготовлення деталей. Одним із найперспективніших напрямків цієї технологічної революції стали адитивні технології (від англ. additive – той, що додається), які більш відомі в широких колах під загальним терміном «3D-друк». Вони являють собою високотехнологічний комплекс інноваційних методів та апаратних засобів, спрямованих на фізичне створення тривимірних об'єктів будь-якого рівня складності. Цей процес базується на використанні попередньо підготовлених комп'ютерних цифрових CAD-моделей (Computer-Aided Design) і здійснюється шляхом суворо дозованого та контрольованого пошарового додавання або нарощування робочого матеріалу.

Важливо відзначити принципову відмінність цього підходу від класичних, традиційних (віднімальних) методів промислового виробництва. У той час як історично сформовані механічні процеси, такі як фрезерування, точіння або свердління, базуються на цілеспрямованому видаленні зайвого матеріалу з початкової масивної заготовки для отримання потрібної форми, 3D-друк працює за діаметрально протилежним принципом. Ця особливість не тільки дозволяє створювати унікальні вироби з надзвичайно складними внутрішніми та зовнішніми геометричними формами, які неможливо або економічно недоцільно виготовляти традиційними методами, але й забезпечує значну економію ресурсів, максимально мінімізуючи виробничі відходи [5].

За останні десятиліття адитивне виробництво успішно подолало стадію, коли воно використовувалося виключно для цілей швидкого прототипування та створення попередніх концептуальних моделей. Сьогодні воно впевнено інтегрується в повноцінні технологічні цикли кінцевого виробництва готової продукції. Сфера застосування цих технологій постійно розширюється,

охоплюючи такі високотехнологічні та вимогливі до якості галузі, як аерокосмічна промисловість, передова медицина та біоінженерія, сучасна автомобільна промисловість, а також інноваційну архітектуру та будівництво.

Враховуючи постійне вдосконалення обладнання та розширення асортименту доступних матеріалів, на сучасному ринку існує величезна кількість різних технологій та специфікацій 3D-друку. Їх класифікація зазвичай здійснюється на основі низки критеріїв, серед яких ключовими є фізико-хімічний принцип формування кожного окремого шару виробу та агрегатний стан або тип основної сировини, що використовується в процесі екструзії або синтезу. Згідно з цим критерієм, в умовах сучасної світової промисловості доцільно умовно поділити всі існуючі технології адитивного виробництва на три великі, концептуально різні групи, залежно від основного робочого матеріалу, а саме полімери, метал, кераміка

1.1.1 Друк полімерами

Найпоширенішою та комерційно доступною групою адитивних технологій на сучасному етапі є методи, засновані на екструзії термопластичних полімерів [6]. Ключове місце серед них займає технологія моделювання наплавленим осадженням Fused Deposition Modeling (FDM), також відома як виготовлення наплавленим філаментом Fused Filament Fabrication (FFF), рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Приклад FDM друку

Історичне коріння цієї технології сягає 1989 року, коли Скотт Крамп подав

заявку на перший патент, що згодом призвело до заснування Stratasys. Однак справжній «вибух» популярності та вихід технології на споживчий ринок відбувся після 2009 року. Це стало можливим завдяки закінчення терміну дії основних патентів та активній діяльності спільноти RepRap (Replicating Rapid Prototyper), яка дала поштовх розвитку таких гігантів галузі, як MakerBot, Ultimaker та Prusa Research.

Процес FDM базується на відносно простій, але ефективній синергії двох ключових систем: системи екструзії та системи точного позиціонування. Процес формування об'єкта відбувається шляхом подачі полімерного матеріалу (филаменту) у вигляді нитки через нагріту насадку екструдера. Під впливом високої температури матеріал переходить у напіврідкий стан і шар за шаром наноситься на робочу платформу відповідно до заданої 2D-траєкторії, рис. 1.2.

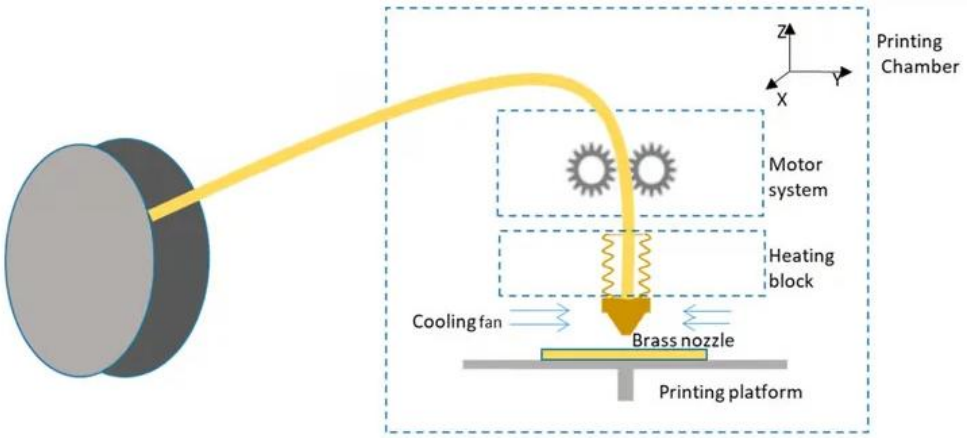


Рисунок 1.2 – Механізм роботи FDM друку

Система екструзії зазвичай поділяється на два функціональні блоки:

– холодний кінець: відповідає за подачу нитки з котушки та точне керування швидкістю її просування параметр «потоку»;

– гарячий кінець: складається з нагрівального картриджа, датчика температури, радіатора та самого насадки. Тут термопластик плавиться до в'язкотекучого стану, необхідного для належної адгезії (зчеплення) з попереднім шаром.

Основними перевагами FDM є його універсальність, відносно низька вартість обладнання та широкий спектр доступних матеріалів (від базових PLA

та ABS до інженерних нейлонів та вуглецевих композитів). Це робить технологію ідеальним вибором як для швидкого прототипування, так і для виробництва функціональних деталей у дрібносерійному виробництві [7].

Повноцінно розглянути тему адитивного виробництва без звернення до технології стереолітографії Stereolithography Apparatus (SLA) практично неможливо, рис. 1.3. Вона не просто з’явилася однією з перших - по суті, саме з неї почався той 3D-друк, який ми сьогодні сприймаємо як щось звичне. Цікаво, що на момент свого виникнення ця ідея виглядала досить незвично і навіть дещо футуристичною.

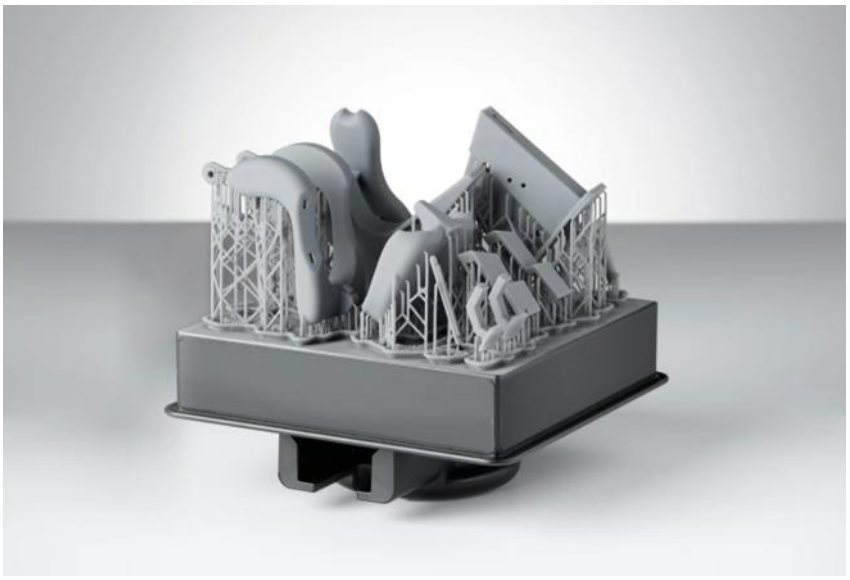


Рисунок 1.3 – Приклад SLA друку

Ще у 1984 році американський інженер Чак Халл запропонував підхід, який тоді виглядав революційним: створювати об’ємні об’єкти не шляхом механічної обробки чи складання, а за допомогою світла. Уже через кілька років ця ідея отримала практичне втілення, була заснована компанія 3D Systems, а в 1987 році з’явився перший комерційний принтер SLA. Фактично, це був момент, коли цифрові моделі перестали бути лише віртуальними і отримали реальний, матеріальний вимір.

Основою процесу є фотополімеризація, тобто перехід рідкого матеріалу в твердий стан під дією ультрафіолетового випромінювання. Як матеріал використовується спеціальна фотополімерна смола. Вона складається не з однієї

речовини, а з кількох компонентів, кожен з яких виконує свою функцію. У звичайних умовах ця суміш залишається рідкою, але під дією світла починає швидко змінювати свої властивості, рис. 1.4.

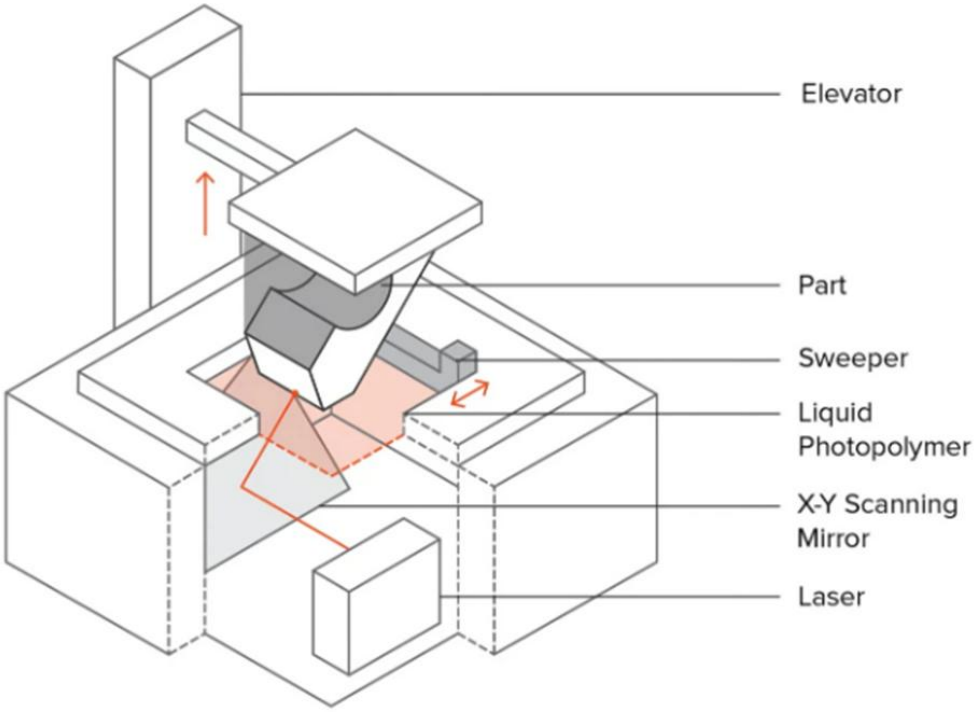


Рисунок 1.4 – Механізм роботи SLA друку

Сама смола знаходиться в резервуарі принтера, і процес побудови відбувається поступово, шар за шаром. У класичному варіанті використовується лазер, який дуже точно «промальовує» контур кожного шару. Його рух забезпечується системою дзеркал, що дозволяє досягати високої точності позиціонування.Коли ультрафіолетове світло потрапляє на певну ділянку смоли, запускається хімічна реакція: молекули починають з’єднуватися між собою, утворюючи тверду структуру. Після формування одного шару платформа зміщується на невелику відстань, і процес повторюється. На перший погляд це виглядає доволі простим циклом, але насправді він потребує дуже точного налаштування всіх параметрів [8].

З розвитком технології з’явилися і її варіації, зокрема Digital Light Processing (DLP) та Liquid Crystal Display (LCD). У цих випадках замість лазера використовується інший підхід: цілий шар засвічується одразу за допомогою проектора або екрана. Це дозволяє значно скоротити час друку, особливо коли

йдеться про великі або складні моделі. Окремо варто відзначити якість результату. SLA дозволяє отримувати деталі з дуже високою точністю і гладкою поверхнею. Шари практично не помітні, що вигідно відрізняє цю технологію від багатьох інших. Саме тому її часто використовують у тих сферах, де важлива деталізація, наприклад, у стоматології або ювелірній справі.

Разом з тим, не можна сказати, що ця технологія ідеальна. Вона має свої особливості, які потрібно враховувати. Зокрема, після друку деталь потребує додаткової обробки. Спочатку її очищають від залишків смоли, а потім додатково обробляють ультрафіолетом. Лише після цього матеріал набуває своїх кінцевих властивостей і стає повністю готовим до використання. Таким чином, SLA можна розглядати як одну з базових технологій, яка не тільки започаткувала розвиток 3D-друку, але й досі залишається актуальною завдяки своїй точності та якості результату.

1.1.2 Друк металом

Розглядаючи сучасні технології адитивного виробництва, особливу увагу слід приділити 3D-друку металами, який сьогодні активно впроваджується в різних галузях промисловості. На відміну від полімерних технологій, таких як SLA або FDM, друк металом з'явився дещо пізніше, що безпосередньо пов'язано з вищою складністю процесу, суворими вимогами до обладнання та високою вартістю витратних матеріалів. Активний розвиток цієї технології розпочався в 1990-х роках, коли в інженерному середовищі виникла гостра потреба створювати складні металеві деталі без використання традиційних методів обробки, таких як лиття або механічне фрезерування. Саме тоді були розроблені інноваційні підходи, які згодом отримали назву Direct Metal Laser Sintering (DMLS) та Selective Laser Melting (SLM). З плином часу ці методи стали беззаперечною основою сучасного промислового 3D-друку металом. Вони знайшли надзвичайно широке застосування в авіаційній та аерокосмічній промисловості, передовій медицині, автомобілебудуванні та багатьох інших суміжних галузях, де критично важливими є бездоганна точність, здатність витримувати екстремальні навантаження і максимально складна внутрішня

геометрія виробів, рис. 1.5.



Рисунок 1.5 – Приклади складних металевих деталей, виготовлених методом SLM та DMLS

Безпосередня суть технології полягає у послідовному формуванні монолітної деталі з дрібнодисперсного металевого порошку шар за шаром за допомогою високоточного лазерного випромінювання [9]. Процес розпочинається з підготовки цифрової 3D-моделі, яка за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (слайсера) розділяється на велику кількість надзвичайно тонких горизонтальних шарів. Сам етап фізичного виробництва відбувається в повністю герметичній робочій камері принтера, яка обов'язково заповнюється інертним газом, найчастіше аргоном або азотом. Це створює захисне середовище і дозволяє уникнути небажаного окислення металевого порошку під час впливу екстремально високих температур. На робочу платформу за допомогою спеціальної каретки подачі (рекоутера) наноситься дуже тонкий шар металевого порошку, товщина якого зазвичай варіюється від 20 мікрон до 50 мікрон. Після цього в дію вступає скануюча система з лазером. Промінь швидко рухається по заданій траєкторії та вибірково впливає на матеріал, плавлячи або спікаючи його частинки в точно визначених координатах. В результаті цього високоенергетичного впливу формується один твердий шар майбутньої деталі. Після завершення поточного кроку поршень платформи побудови автоматично опускається на невелику відстань, яка точно відповідає товщині наступного шару. Паралельно піднімається поршень подачі

порошку, на поверхню знову наноситься нова порція матеріалу, і лазерний цикл повторюється. Таким чином, крок за кроком, з порошкової маси формується повноцінний тривимірний об'єкт, рис. 1.6.

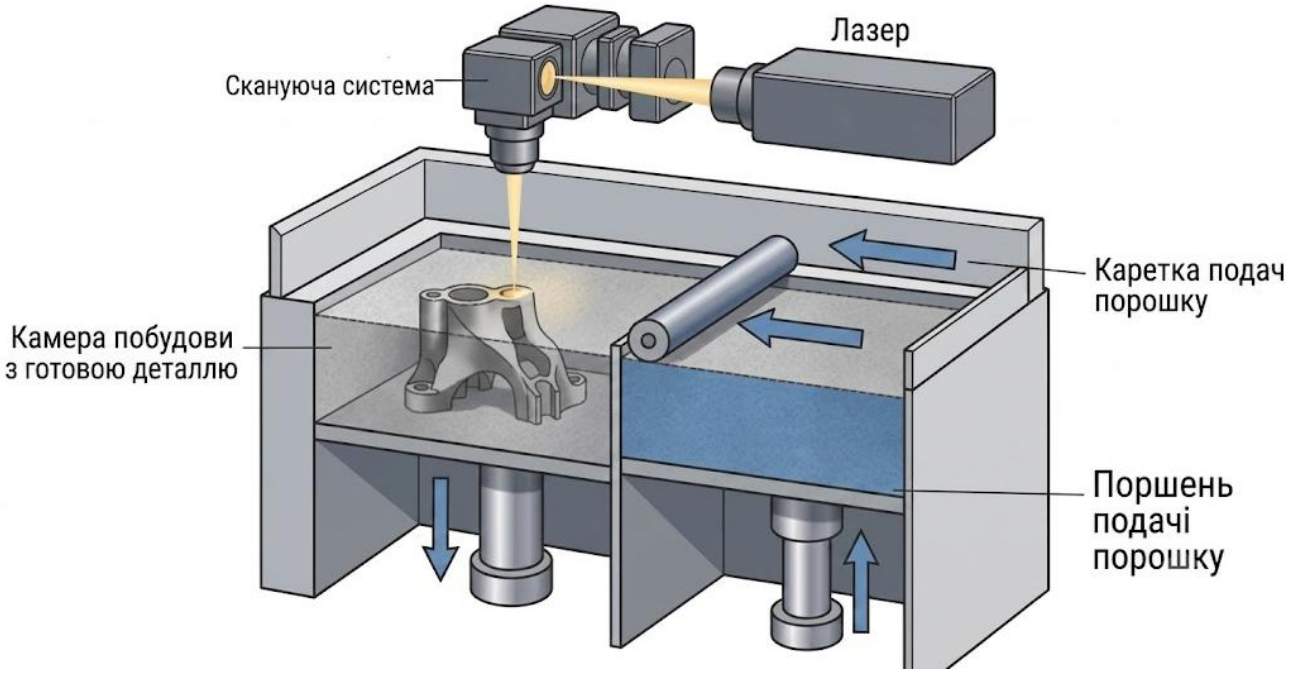


Рисунок 1.6 – Механізм роботи та будова 3D-принтера технології SLM та DMLS

Незважаючи на значну візуальну та механічну схожість, методи SLM та DMLS мають фундаментальну відмінність у фізиці взаємодії лазера з матеріалом. У процесі SLM лазерний промінь повністю розплавляє частинки металевого порошку, завдяки чому після кристалізації утворюється абсолютно монолітна структура з мізерною внутрішньою пористістю, яка зазвичай становить менше 0,5%. У технології DMLS порошок нагрівається лише до температури спікання, не переходячи в повністю рідку фазу. Таке технологічне рішення має вагому перевагу, оскільки воно дозволяє звести до мінімуму залишкові внутрішні напруження в матеріалі, що є вкрай поширеною проблемою при литті та повному плавленні. Водночас, деталі, виготовлені методом SLM, демонструють дещо вищі показники загальної міцності на розтяг та твердості, часто перевершуючи навіть класичні литі аналоги.

Невід'ємною та критично важливою складовою обох процесів є використання підтримуючих структур, які друкуються паралельно з основним виробом з того ж самого металу. Через надзвичайно високі температури обробки ці структури виконують відразу кілька життєво необхідних функцій. Вони забезпечують надійний фундамент для нависаючих елементів складної геометрії, жорстко фіксують деталь на платформі побудови для запобігання тепловим деформаціям та викривленням, а також слугують своєрідними радіаторами, ефективно відводячи надлишкове тепло від зони безпосереднього плавлення. Після завершення процесу друку готовий виріб залишається повністю зануреним у масив невитраченого порошку. Цей порошок обережно видаляється, просіюється і може бути використаний повторно у наступних виробничих циклах, що суттєво підвищує економічну ефективність методу. Однак на цьому етапі виробництво не закінчується. Усі металеві деталі, надруковані за адитивними технологіями, потребують обов'язкової комплексної постобробки. Вона включає термічний відпал у спеціальних печах для остаточного зняття залишкових напружень, механічне відокремлення деталей від масивної робочої платформи, зрізання підтримуючої сітки, а також фінішну обробку поверхонь за допомогою фрезерування на станках з ЧПУ або полірування для досягнення ідеальної розмірної точності.

1.2 Аналіз методів 3D-друку кераміки

Сучасний стан глобального промислового виробництва характеризується стрімкою парадигмальною зміною, що полягає у переході від традиційних субтрактивних методів обробки матеріалів до інноваційних концепцій пошарового формування складних геометричних структур [10].

В аспекті цього переходу, процес інтеграції та всебічного практичного впровадження високотехнологічних адитивних методів у стратегічну сферу виготовлення спеціалізованих виробів із технічної, високоміцної біосумісної та естетично значущої художньої кераміки відзначається винятково високим рівнем технологічної та інженерної складності. Дана проблематика значною

мірою детермінована специфічними, часто виражено нелінійними та стохастичними фізико-хімічними властивостями використовуваної вихідної сировини, які суттєво обмежують застосування стандартних виробничих протоколів.

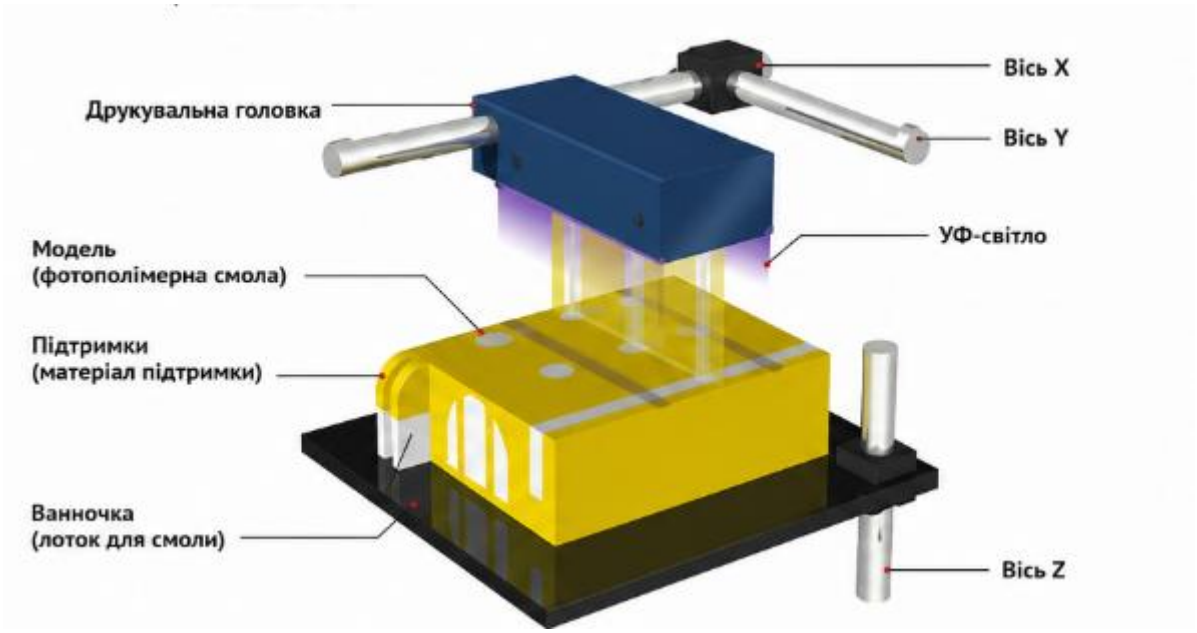
На відміну від широко вживаних у промисловості термопластичних полімерних сполук, процеси формоутворення яких базуються на відносно простих та прогнозованих оборотних фазових переходах першого роду, технічна кераміка безальтернативно вимагає впровадження цілісного, науково обґрунтованого багатостадійного технологічного підходу. У межах такої концепції етап безпосередньої тривимірної комп'ютерно-керованої побудови об'єкта розглядається науковою спільнотою виключно як початкова стадія формування так званої «зеленої» макроструктури, що володіє лише мінімально необхідним рівнем механічної цілісності.

Ця первинна ланка є лише фундаментом, після якого неминуче слідують критично важливі та енергоємні етапи селективного дебіндингу, термічного видалення зв’язуючих компонентів та фінального високотемпературного спікання (синтеризації). Дані постпроцеси супроводжуються складними дифузійними явищами, значною об’ємною усадкою та структурною перебудовою матеріалу на мікро- та макрорівнях, що потребує прецизійного контролю на кожному кроці.

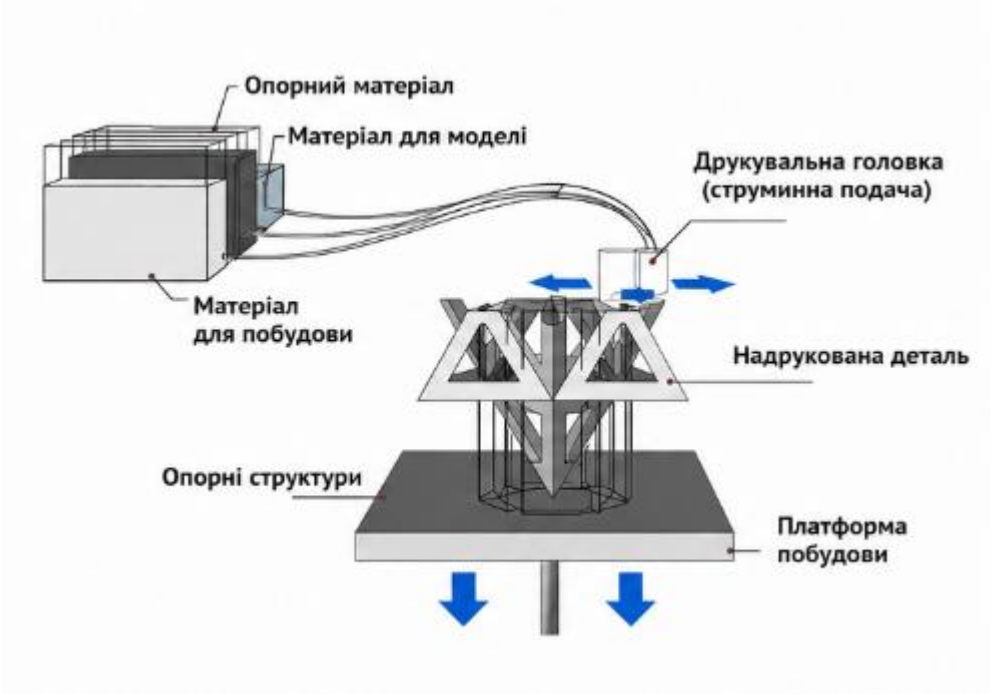
1.3 Струменеві технології 3D-друку

Методи, що концептуально базуються на принципі Material Jetting (MJ), зокрема комерційні рішення PolyJet та MultiJet Printing (MJP), використовують складні масиви п’єзоелектричних друкуючих головок для високоточного селективного осадження мікрокрапель матеріалу. Робоче середовище в даному випадку являє собою багатокомпонентну колоїдну систему, в якій нанорозмірні частинки керамічного порошку максимально рівномірно розподілені в об’ємі рідкої фоточутливої смоли (матриці). Процес просторового формування кожного окремого шару завершується практично миттєвим твердненням

(полімеризацією) під інтенсивним впливом інтегрованого джерела ультрафіолетового випромінювання, що рухається синхронно з екструзійним блоком, рис. 1.7.



а)



б)

а – PolyJet технологія; б – MJP та MGP технологія

Рисунок 1.7 – Принципи роботи PolyJet, MJP та MGP технологій

Ключовою та найбільш вагомою перевагою даного методу є його здатність забезпечувати екстремально високу просторову роздільну здатність (до 15-30 мікрон) та виняткову якість і гладкість поверхні. Це практично повністю нівелює потребу в подальшій прецизійній механічній постобробці. Крім того, архітектура друкуючих головок дозволяє реалізовувати мультиматеріальний друк, створюючи інноваційні об’єкти з градієнтними фізико-механічними властивостями в єдиному технологічному циклі. Водночас, основним стримуючим фактором для широкого промислового впровадження є надзвичайно висока абразивність керамічних частинок, що неминуче призводить до швидкого механічного зносу мікродюз.

Для запобігання засміченню виникає необхідність використання суспензій із дуже низькою концентрацією твердої (керамічної) фази. Це, в свою чергу, провокує надмірну лінійну та об'ємну усадку виробу (іноді до 30-35%) під час подальшого високотемпературного випалювання, що безальтернативно вимагає впровадження складних математичних алгоритмів компенсації об’єму ще на етапі підготовки керуючої програми (G-коду)

Даний адитивний метод фундаментально ґрунтується на вибірковому просторовому нанесенні рідкого сполучного агента (біндера) на попередньо розрівняний мікрошар сухого керамічного порошку. Механізм пошарової побудови є унікальним тим, що він не передбачає жодного термічного впливу безпосередньо в процесі самого друку. Це дозволяє повністю уникнути виникнення руйнівних залишкових термічних напружень у так званій «зеленій» (сирій) моделі. Розглянута технологія характеризується надзвичайно високою продуктивністю та гнучкою масштабованістю процесу для створення великогабаритних деталей, рис. 1.8.

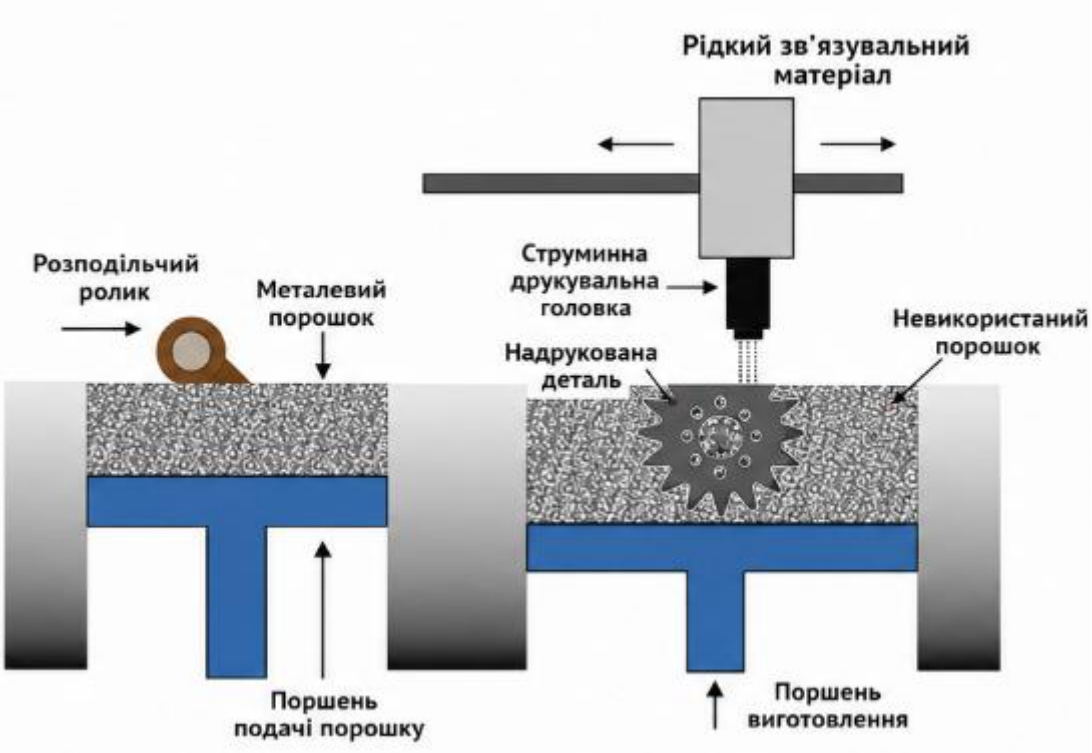


Рисунок 1.8 – Принципи роботи Binder Jetting технологій

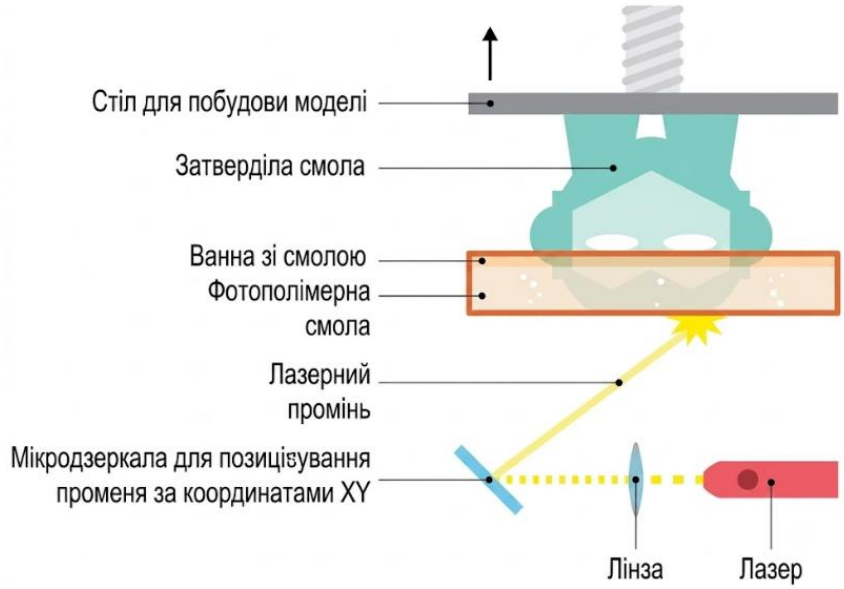
Повна відсутність потреби у генеруванні додаткових підтримуючих структур є суттєвим технологічним плюсом, оскільки незв’язаний сипкий порошок у робочій зоні камери виконує роль природного підтримуючого середовища, надійно фіксуючи нависаючі та геометрично складні елементи конструкції [11].

Незважаючи на такі вагомі переваги, головною інженерною проблемою, що обмежує функціональне застосування, залишається висока залишкова макро- та мікропористість надрукованих об’єктів, що вкрай негативно впливає на кінцеву механічну міцність.

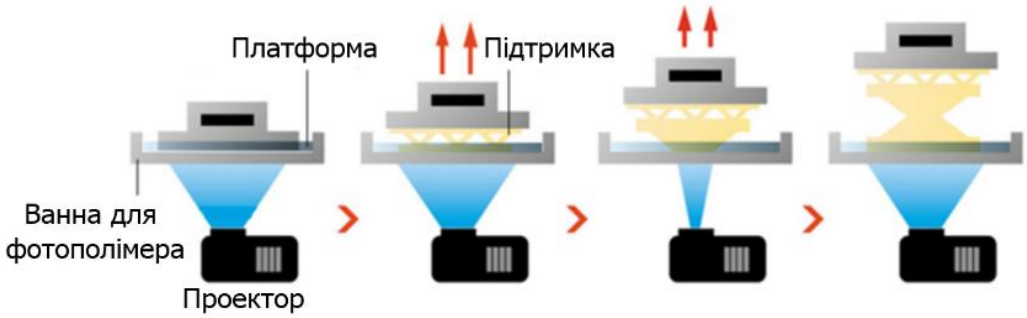
Отримані таким чином вироби потребують обов’язкового етапу рідинної інфільтрації іншими матеріалами або надзвичайно тривалого спікання при екстремальних температурах, що суттєво подовжує та ускладнює загальний виробничий цикл.

1.4 Методи фотополімеризації SLA та DLP

Технології стереолітографії SLA та цифрової обробки світлом DLP використовують принцип пошарового затвердіння висококонцентрованої фоточутливої суспензії. Як переконливо демонструють результати останніх профільних досліджень із використанням вітчизняного українського каоліну, саме DLP-друк здатний забезпечити найвищу геометричну точність при виготовленні специфічних мембранних матриць та фільтрувальних елементів, рис. 1.9.



а)



б)

а – SLA технологія; б – DLP технологія

Рисунок 1.9 – Принципи роботи SLA та DLP технологій

Цей процес вимагає надзвичайно ретельного балансування реологічних характеристик: підвищення об'ємної частки каоліну понад 50% призводить до експоненціального та критичного зростання динамічної в’язкості, що робить практично неможливим рівномірне нанесення нових шарів без попереднього термічного кондиціювання (нагрівання) матеріалу. Безперечною перевагою даного методу є забезпечення надзвичайно високої структурної щільності, ізотропності властивостей та бездоганної стабільності розмірів. Технологія відкриває широкі можливості для прецизійного виготовлення тонкостінних елементів з жорстко контрольованою внутрішньою пористістю.

Проте головним викликом є виняткова складність процесу дебіндингу (випалювання полімеру). Наявність значної кількості органічної полімерної зв’язки в структурі вимагає використання надзвичайно повільного підйому температури у вакуумних або муфельних печах (іноді градієнт становить менше 1°C/хв). Будь-яке відхилення від термопрофілю призводить до інтенсивного газоутворення, що неминуче викликає внутрішні дефекти і незворотне руйнування виробу.

1.5 Технологія шнекової екструзії паст DIW

Direct Ink Writing (DIW), також відома в науковій літературі як Robocasting, це прогресивний метод безперервного об'ємного витискання в’язкопластичної керамічної пасти через каліброване екструзійне сопло за заданою програмною траєкторією (рис. 1.10). У контексті даної дипломної роботи особливий науково-практичний інтерес представляє використання та вдосконалення саме шнекового (гвинтового) механізму екструдера.

На відміну від традиційних пневматичних чи шприцевих систем, шнекова подача дозволяє генерувати стабільний робочий тиск і одночасно забезпечує додаткову механічну гомогенізацію високонаповнених сумішей безпосередньо в зоні екструзії. Цей аспект є критично важливим для ефективного усунення мікроскопічних повітряних включень, які статистично є головною причиною структурних дефектів у керамічних виробах. До суттєвих переваг шнекової

екструзії слід віднести радикально нижчу вартість апаратної частини у порівнянні з лазерними системами та унікальну можливість роботи з екологічно безпечними керамічними пастами на водній основі [12].

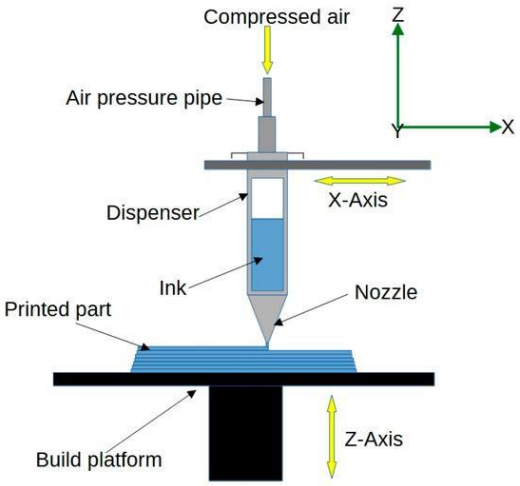


Рисунок 1.10 – Принципи роботи DIW технологія

Шнековий механізм дозволяє екструдувати пасти з мінімальним масовим вмістом органічних добавок та пластифікаторів, що значно спрощує подальший етап спікання, мінімізує виділення токсичних газів та суттєво зменшує загальну усадку готової деталі. Однак головний і найбільш складний технологічний виклик полягає у необхідності прецизійного керування потоком матеріалу.

Робоча керамічна паста має яскраво виражені тиксотропні (неньютонівські) властивості, що вимагає відмови від стандартних слайсерів та зумовлює гостру необхідність розробки принципово нових, спеціалізованих програмних алгоритмів. Ці алгоритми повинні в реальному часі контролювати швидкість обертання крокового двигуна шнека, реалізовувати логіку інтелектуального ретракту для запобігання підтіканню та математично компенсувати динамічні зміни в’язкості матеріалу під час прискорень та гальмувань друкуючої головки.

1.6 Порівняльний аналіз технологій 3D-друку кераміки

Для всебічної систематизації результатів проведеного теоретичного аналізу та наукового обґрунтування вибору технології шнекової екструзії як головного об’єкта програмної розробки, у таблиці 1.1 наведено розширене порівняння ключових техніко-технологічних параметрів розглянутих методів.

Глибокий порівняльний аналіз переконливо продемонстрував, що технологія шнекової екструзії DIW є найбільш доступним, гнучким і перспективним методом для широкого впровадження у дослідницькі та виробничі процеси. Проте її головним недоліком та стримуючим фактором на сучасному етапі є повна відсутність досконалого, вузькоспеціалізованого програмного забезпечення, здатного адекватно інтерпретувати фізику поведінки в’язкопластичних мас під час екструзії. Більшість існуючих на ринку комерційних та відкритих слайсерів алгоритмічно розраховані виключно на роботу з ньютонівськими розплавами термопластів, що фізично не дозволяє повною мірою розкрити та реалізувати виробничий потенціал шнекових керамічних систем.

Таблиця 1.1 – Технологічні показники методів 3D-друку керамікою

Метод друку	Тип сировини	Точність виготовлення	Основна перевага	Основний виклик для ПЗ
PolyJet / MJP	Колоїдна суспензія	Висока (15-30 мкм)	Бездоганна якість поверхні	Компенсація значної об'ємної усадки
Binder Jetting	Сухий мікропорошок	Середня (100-150 мкм)	Висока виробнича продуктивність	Оптимізація траєкторії для міцності
SLA / DLP	Фотополімерна паста	Висока (40-70 мкм)	Висока структурна цілісність	Точне керування експозицією шарів
Шнековий DIW	В'язкопластична паста	Нижча (300-800 мкм)	Економічність, простота, екологічність	Керування складною реологією та потоком

1.7 Керамічні пасти для шнекової екструзії

У контексті технології прямої екструзії фундаментальну та визначальну роль відіграє прецизійно підібраний хімічний, фазовий та дисперсний склад робочого матеріалу. Це пояснюється тим, що успішність пошарового формоутворення безпосередньо та нелінійно залежить від здатності багатокомпонентної маси стабільно екструдуватися під дією механічного тиску та миттєво утримувати задану просторову геометрію після зняття напруження.

Використання природних глин, таких як монофракційний каолініт чи бентоніт, які відносно легко піддаються традиційному пластичному формуванню у гідратованому стані, є вкрай обмеженим у сфері високоточного адитивного виробництва. Така обмеженість аргументується їхньою вираженою схильністю до значної, часто анізотропної об'ємної усадки та неконтрольованого макро- і мікророзтріскування під час дегідратації (сушіння), що особливо критично проявляється при екструзії через калібровані мікросопла. З огляду на ці об'єктивні фактори, сучасний вектор розвитку адитивних технологій безальтернативно зміщений у бік розробки спеціалізованих інженерних керамічних паст (шлікерів), які є надзвичайно складними дисперсними колоїдними системами, оптимізованими для забезпечення строго визначеного балансу пластичності, динамічної в'язкості та структурної когезії.

Типова високотехнологічна керамічна паста для шнекової екструзії концептуально складається з трьох основних функціональних груп: базового керамічного порошку, комплексу реологічних модифікаторів та спеціальних цільових добавок. Базовий компонент, який формує фізичну основу майбутнього виробу, зазвичай подається у вигляді дрібнодисперсного порошку (наприклад, оксид алюмінію, діоксид цирконію, карбід кремнію або спеціально очищені мінеральні суміші).

При цьому гранулометричний склад є критично важливим: розмір найбільших частинок має бути щонайменше вдесятеро меншим за внутрішній діаметр екструзійного сопла для беззаперечного запобігання механічному

блокуванню (забиванню) каналу та забезпечення ламінарного потоку. Комплекс реологічних модифікаторів відіграє роль сполучного середовища і зазвичай включає: біндери (полімерні зв'язуючі) для створення когезійних містків між керамічними частинками, дисперсанти для рівномірного просторового розподілу твердої фази, пластифікатори для надання масі необхідної гнучкості, а також розчинники (найчастіше деіонізовану воду) для тонкого налаштування початкової в'язкості системи. Для мінімізації подальшої термічної усадки та уникнення деформацій об'ємна частка твердої фази в таких пастах має бути екстремально високою і зазвичай знаходиться в межах від 40 % до 60 %.

Згідно з сучасними матеріалознавчими класифікаціями, залежно від сформованої мікроструктури та домінуючого механізму реологічного контролю, керамічні пасти для 3D-друку поділяються на три великі родини: колоїдні, гелеві та гібридні. Колоїдні пасти являють собою висококонцентровані суспензії у рідині з низькою в'язкістю, де структурна стабільність та утримання форми базуються виключно на межі плинності матеріалу (Yield Stress).

Гелеві системи використовують термічно індуковані гідрогелі або складні полімерні сітки, що значно покращує стабільність форми і дозволяє друкувати складні просторові архітектури з великими кутами нахилу, але ціною суттєвого збільшення масової частки органіки [13].

Гібридні пасти намагаються інтегрувати переваги обох підходів, забезпечуючи як високу щільність упакування частинок, так і надійне утримання геометрії екструдованого філамента. Для систематизації властивостей різних родин керамічних паст та розуміння їхнього впливу на алгоритми керування екструдером, у таблиці 1.2 наведено порівняльний аналіз їхніх характеристик.

Таблиця 1.2 – Класифікація та реологічні особливості керамічних паст для технології DIW

Тип пасти	Механізм утримання форми	Типові реологічні модифікатори	Основні переваги	Недоліки та виклики для ПЗ
Колоїдні	Висока межа плинності (Yield Stress) твердої фази	Вода, поліакрилова кислота, водні розчини силікатів	Мінімальна усадка при спіканні, висока кінцева щільність	Схильність до провисання нависаючих елементів, складність контролю потоку

Продовження таблиці 1.2

Тип пасти	Механізм утримання форми	Типові реологічні модифікатори	Основні переваги	Недоліки та виклики для ПЗ
Гелеві	Формування внутрішньої полімерної або гідрогелевої сітки	Pluronic F-127, целюлоза, желатин, альгінат натрію	Висока стабільність форми, можливість друку складних геометрій	Високий вміст органіки, складна оптимізація ретракту, висока усадка
Гібридні	Комбінація щільного пакування та полімерної матриці	Полівініловий спирт (PVA), фотозатверджувані смоли	Оптимальний баланс між міцністю та збереженням геометрії	між міцністю та збереженням геометріїВисока складність підготовки, нелінійна зміна в'язкості під час екструзії

З точки зору фізики неідеальних рідин та континуальної механіки, оптимальні керамічні пасти є складними неньютонівськими рідинами з яскраво вираженою тиксотропією та псевдопластичною поведінкою (зсувним розрідженням). Здатність матеріалу до друку визначається співвідношенням модуля накопичення (пружності) G' та модуля втрат (в'язкості) G". У стані спокою всередині екструдера паста має надзвичайно високу в'язкість і поводиться як квазітверде тіло (G' > G"). Проте під інтенсивною дією напруження зсуву (Shear Stress), що створюється безперервним механічним обертанням шнека, полімерні ланцюги вишиковуються вздовж напрямку гідродинамічного потоку, і динамічна в'язкість матеріалу різко знижується на кілька порядків. Це явище зсувного розрідження дозволяє пасті вільно і рівномірно продавлюватися крізь каліброване сопло з мінімальним опором. Як тільки напруження зсуву зникає після виходу матеріалу з екструзійного тракту, паста повинна миттєво відновити свою початкову високу в'язкість та структурну когезію (явище тиксотропного відновлення). Таке швидке відновлення модуля пружності G' у поєднанні з високою межею плинності (Yield Stress) дозволяє нанесеному філаменту не лише зберігати свій циліндричний або еліптичний переріз, але й успішно витримувати гідростатичний тиск усіх наступних шарів без розтікання чи колапсу конструкції. Саме ці глибокі та нелінійні реологічні трансформації роблять використання стандартних G-кодів, згенерованих для ньютонівських розплавів пластику, абсолютно неефективними, що підтверджує

критичну необхідність розробки принципово нової архітектури програмного керування для систем шнекової подачі.

1.8 Аналіз шнекових екструдерів та систем керування

Для всебічної та об’єктивної оцінки науково-практичного контексту розробки, а також для формування фундаментально обґрунтованого технічного завдання, виникає гостра необхідність у проведенні глибокого ретроспективного та порівняльного аналізу існуючих технологічних рішень, що наразі представлені на глобальному ринку адитивного обладнання для формування керамічних виробів. Сучасний сегмент кінематичних систем прямого просторового друку в'язкопластичними масами (Direct Ink Writing) характеризується надзвичайною диференціацією за цілою низкою критеріїв: від загальної вартості та конструктивної складності до, що є найбільш критичним і визначальним для даного дослідження, закритості чи відкритості архітектури керуючого програмного забезпечення. В межах даного аналітичного огляду є доцільним розглянути декілька полярних стратегічних напрямків апаратного конструювання: високобюджетні промислові установки еталонної точності, компромісні напівпромислові рішення та ультра-кастомні платформи з нетрадиційною кінематикою, які кидають найбільший виклик існуючим базовим алгоритмам мікропроцесорного керування.

Як еталонний представник комерційних систем безкомпромісного професійного рівня традиційно розглядається лінійка апаратно-програмних комплексів 3D PotterBot. Дані установки демонструють виняткову стабільність гідродинамічного потоку за рахунок використання прецизійних механічних актуаторів та масивних лінійних напрямних, що в сукупності дозволяють досягати екстремальних для даної галузі швидкостей друку (до 130 мм/с) при збереженні бездоганної якості поверхні та мінімальних відхиленнях від заданої математичної CAD-моделі. Механізм дозованої подачі у цих системах фундаментально базується на принципі прямої поршневої екструзії (RAM extrusion). Цей підхід фізично та механічно виключає проблему

неконтрольованої пульсації матеріалу, яка часто є іманентною властивістю недорогих шнекових систем. Проте програмна складова таких установок є жорстко пропрієтарною (закритою), а оперативне управління здійснюється виключно через інтегровані веб-інтерфейси. Це створює штучний технологічний бар'єр та повністю унеможливлює інтеграцію дослідницьких алгоритмів нелінійної компенсації тиску. Крім того, надмірна вартість базових комплектацій (понад 3500 доларів) та жорстке технологічне обмеження фізичним об’ємом робочого картриджа роблять їх економічно та логістично недоцільними для розгортання на базі гнучких дослідницьких лабораторій.

Як своєрідне компромісне рішення на стику промислового та аматорського сегментів на ринку представлені напівпромислові шнекові системи типу Eazao Potter X-1. Дана кінематична система базується на інноваційному гібридному методі подачі матеріалу, де первинний гідростатичний тиск створюється потужним лінійним штовхачем, а фінальне високоточне дозування виконується мініатюрним шнековим механізмом безпосередньо у робочому соплі. Апаратна частина комплексу побудована на базі сучасної 32-бітної платформи MKS Robin Nano V3.1, що гарантує необхідну обчислювальну потужність для забезпечення плавної та безперервної кінематики.

Однак, критичний аналіз робочого циклу переконливо засвідчує, що пристрій і досі функціонує на базі стандартних G-код інструкцій, згенерованих універсальними відкритими слайсерами (наприклад, Cura). Такий підхід неминуче призводить до виникнення інерційних дефектів (переекструзії на кутах) при роботі з пастами, що мають складну тиксотропну реологію, оскільки стандартний софт не здатен прогнозувати поведінку неньютонівських рідин [14].

Абсолютною парадигмальною протилежністю детермінованим промисловим рішенням є прогресивний клас ультра-кастомних експериментальних систем повністю відкритої архітектури. Найяскравішим представником цього напрямку є інженерний проект Hangprinter, концептуально адаптований ентузіастами для безперервної екструзії керамічних паст. На відміну від класичної і передбачуваної декартової кінематики, дана система концептуально позбавлена жорсткої несучої рами. Просторове позиціонування

масивного екструдера здійснюється за рахунок складної, нелінійної системи натяжних тросів, що закріплюються безпосередньо за елементи несучих конструкцій приміщення. Безперечною перевагою такого інноваційного підходу є екстремально низька вартість апаратної бази (близько $300) та практично необмежений фізичний робочий об'єм. Однак, повна відсутність жорсткості конструкції зумовлює критично низьку просторову точність відтворення геометрії (стохастична похибка може перевищувати 2–5 мм). Система постійно піддається нелінійним маятниковим коливанням та пружному розтягуванню тросів під впливом динамічної зміни маси шнекового екструдера з вологою глиною, що перетворює процес керування на надзвичайно складну математичну задачу.

Для систематизації отриманих аналітичних даних та забезпечення наочного порівняння базових тактико-технічних характеристик (ТТХ) розглянутих полярних аналогів, у таблиці 1.3 наведено їхні зведені показники, які мають безпосередній вплив на вибір оптимальної стратегії програмного керування.

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика ТТХ промислових та кастомних систем 3D-друку керамікою

Параметр порівняння	Промисловий еталон (3D PotterBot)	Гібридний аналог (Eazao Potter X-1)	Ультра-кастом (Hangprinter Ceramic)
Кінематика позиціонування	Жорстка декартова	Жорстка декартова	Кабельна (безрамна, нелінійна)
Тип робочої екструзії	Поршневий (RAM)	Гібридний (Шнек+Поршень)	Шнековий (Auger)
Внутрішній діаметр сопел, мм	1,0 – 10,0	1,6 – 3,3	2,0 – 6,0
Ефективна робоча швидкість, мм/с	30 – 130	10 – 40	5 – 20
Просторова точність (похибка), мм	± 0,1 – 0,2	± 0,3 – 0,5	± 2,0 – 5,0
Архітектура ПЗ	Жорстко закрита (Пропрієтарна)	Відкрита базова (Marlin / Cura)	Повністю відкрита експериментальна

Продовження таблиці 1.3

Параметр порівняння	Промисловий еталон (3D PotterBot)	Гібридний аналог (Eazao Potter X-1)	Ультра-кастом (Hangprinter Ceramic)
Орієнтовна ринкова вартість, $	~ 3500	~ 1300	~ 300 (за набір компонентів)

Підсумовуючи результати проведеного глибокого порівняльного аналізу технічних характеристик та функціональних можливостей програмного забезпечення, можна зробити однозначний висновок про існування жорсткої прямої кореляції між кінцевою вартістю апаратної платформи та її фактичною просторовою точністю. Промислові установки компенсують очевидні недоліки універсального програмного забезпечення за рахунок масивної, безкомпромісної і надзвичайно дорогої механіки. Натомість, бюджетні кастомні шнекові системи перманентно страждають від низької точності, деформації шарів та інерційності екструзійного потоку виключно через використання примітивного керуючого софту, який математично не адаптований під складну реологічну фізику в'язких рідин. З огляду на це, розробка і впровадження спеціалізованих, інтелектуальних програмно-алгоритмічних рішень вбачається єдиним економічно обґрунтованим шляхом, що дозволить ефективно компенсувати апаратні недоліки доступних шнекових систем та підвищити їхню точність позиціонування до рівня комерційних промислових аналогів.

1.9 Технічне завдання та вимоги до системи керування

На основі проведеного комплексного аналізу технологій адитивного формоутворення, реологічних особливостей робочих мас та недоліків існуючих технічних аналогів, виникає об'єктивна необхідність у формалізації технічного завдання на розробку спеціалізованого програмно-алгоритмічного комплексу. Головною метою розробки є створення адаптивної системи керування для шнекового 3D-принтера, яка здатна нівелювати апаратні недоліки екструдера шляхом предиктивного математичного моделювання поведінки в'язкопластичних керамічних паст у реальному часі. Виходячи з цього, технічне

завдання детермінує низку критичних вимог до архітектури та функціоналу майбутнього програмного забезпечення [15].

1. Вимога до нелінійної кінематичної синхронізації Першочерговим завданням системи керування є забезпечення прецизійної синхронізації кутової швидкості обертання крокового двигуна шнекового екструдера з векторами лінійного переміщення друкуючої головки в декартовій системі координат. Враховуючи яскраво виражену тиксотропію та псевдопластичність керамічних паст, класична лінійна залежність між пройденим шляхом та об'ємом екструзії (яка використовується в стандартних FDM-слайсерах) є категорично неприйнятною. Програмний комплекс повинен включати алгоритми нелінійної інтерполяції, які динамічно коригуватимуть швидкість обертання шнека залежно від поточного прискорення (Acceleration) та ривка (Jerk) кінематики принтера, забезпечуючи стабільний об'ємний розхід (Volumetric Flow Rate) матеріалу на ділянках розгону та гальмування.

2. Вимога до предиктивної компенсації внутрішнього тиску (Pressure Advance) Другим критичним алгоритмічним завданням є програмна компенсація гідродинамічної інерційності потоку. Оскільки керамічна паста піддається стисненню всередині камери екструдера, виникає ефект запізнення екструзії на початку лінії та неконтрольованого витікання (оозінгу) на етапі зупинки механізму. Технічне завдання вимагає імплементації математичної моделі випереджаючого керування тиском. Програмний модуль повинен превентивно збільшувати швидкість шнека перед початком друку сегмента для швидкого набору робочого тиску, та ініціювати алгоритми гальмування шнека ще до фактичного завершення лінійного переміщення, використовуючи залишковий тиск у камері для додруковування кінця лінії [16].

3. Вимога до інтелектуального керування ретрактом Зважаючи на високу в'язкість та адгезію керамічних паст, стандартні процедури лінійного зворотного втягування матеріалу (Retraction) є неефективними і часто призводять до утворення повітряних каверн у шнеку. Програмне забезпечення повинно підтримувати багатопрофільні циклограми ретракту, які включатимуть швидке короткочасне реверсування шнека для скидання тиску, з подальшою

синхронізацією переміщення головки по осі Z (Z-Hop), що мінімізує ризик механічного пошкодження надрукованих шарів «зеленого» виробу під час холостих переїздів (Travel moves).

4. Вимога до обробки та парсингу керуючих команд (G-code) Розроблюваний програмний комплекс повинен виступати ефективною проміжною ланкою (або модифікованою прошивкою мікроконтролера), здатною в режимі реального часу інтерпретувати стандартний G-код, згенерований існуючими відкритими CAM-системами (слайсерами). Алгоритм парсингу має виявляти проблемні ділянки траєкторії (гострі кути, малі радіуси, ділянки з високою частотою ретрактів) та «на льоту» модифікувати параметри подачі екструдера (вісь E), адаптуючи їх під фізичні обмеження шнекової системи подачі кераміки.

1.10 Аналіз існуючих слайсерів для 3D-друку керамікою

На сучасному ринку адитивного обладнання спеціалізоване програмне забезпечення (слайсери) для підготовки до друку в'язкопластичних керамічних мас практично відсутнє. Здебільшого використовуються адаптації популярних відкритих CAM-систем, таких як Ultimaker Cura або PrusaSlicer.

Головний недолік такого підходу полягає в тому, що ці програми алгоритмічно розраховані на екструзію ньютонівських розплавів термопластиків. Вони генерують G-код, базований на лінійній залежності між переміщенням друкуючої головки та об'ємом екструзії. Однак, керамічні пасти є складними неньютонівськими рідинами з яскраво вираженою тиксотропією.

Під час друку кутів або зміни напрямку руху, кінематика 3D-принтера змушена знижувати швидкість (гальмувати). У цей час стандартний слайсер не враховує залишковий гідростатичний тиск усередині камери шнекового екструдера. Це призводить до інерційного витікання матеріалу, неконтрольованої переекструзії на кутах та суттєвого спотворення загальної геометрії «зеленого» виробу. Таким чином, стандартний G-код потребує

глибокої постобробки або перехоплення команд на рівні мікроконтролера принтера [17].

На відміну від термопластів, які мають низьку в'язкість у розплавленому стані та майже миттєво тверднуть при виході з сопла, керамічні пасти характеризуються високою інерційністю потоку. Головна проблема адаптації слайсерів типу Cura полягає у відсутності врахування реологічного профілю матеріалу.

Ключові дефекти при використанні стандартного G-коду: «Ефект роздування» на кутах – через гальмування каретки та надлишковий тиск у шнеку, на поворотах накопичується зайвий матеріал; запізнення старту – на початку лінії пасті потрібен час, щоб заповнити внутрішній об'єм сопла та почати екструзію.

1.11 Алгоритми Pressure Advance та розумного ретракту

Для компенсації гідродинамічної інерційності потоку керамічної пасти класичного лінійного алгоритму недостатньо. Оскільки паста піддається стисненню всередині камери екструдера, виникає ефект запізнення екструзії на початку лінії та неконтрольованого витікання (оозінгу) на етапах гальмування каретки.

Програмний комплекс повинен імплементувати математичну модель випереджаючого керування тиском (Pressure Advance). Алгоритм має превентивно ініціювати гальмування або короткочасний реверс шнека (ретракт) ще до фактичного завершення лінійного переміщення, використовуючи залишковий тиск у камері для додруковування кінця лінії.

Крім того, стандартні процедури лінійного зворотного втягування матеріалу є неефективними через високу в'язкість та адгезію кераміки. Система повинна підтримувати багатопрофільні циклограми ретракту: швидке короткочасне реверсування шнека для скидання тиску з обов'язковою синхронізацією переміщення головки по осі Z (Z-Hop). Це зводить до мінімуму

ризик механічного пошкодження надрукованих шарів виробу під час холостих переїздів.

Для вирішення описаних проблем система керування повинна реалізувати алгоритм Pressure Advance (або Linear Advance), адаптований для неньютонівських рідин.

Логіка роботи алгоритму:

– предиктивний розгін: шнек починає обертатися з підвищеною швидкістю за частки секунди до початку руху каретки, щоб миттєво створити робочий тиск;

– предиктивне гальмування: шнек зупиняється або сповільнюється ще до того, як головка принтера досягне кінця траєкторії, використовуючи інерцію пасти для додруковування лінії;

– Z-Hop ретракт: оскільки кераміка залишається вологою, при переїзді сопло має підніматися по осі Z, щоб не «змазати» вже надруковані стінки.

1.12 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено аналіз сучасних технологій адитивного виробництва та визначено їх придатність для виготовлення керамічних виробів. Розглянуто особливості полімерних, металевих та керамічних технологій 3D-друку, зокрема FDM/FFF, SLA, DLP, PolyJet, MJP, Binder Jetting і DIW, а також проаналізовано їх переваги, недоліки та сфери застосування.

Встановлено, що найбільш перспективною технологією для друку керамічними пастами є Direct Ink Writing із використанням шнекового екструдера, який забезпечує стабільну подачу високов'язких матеріалів, точніше дозування та кращий контроль процесу екструзії. Також досліджено склад і реологічні властивості керамічних паст, що мають визначальний вплив на якість друку та стабільність формування виробів.

На основі проведеного аналізу сформовано основні вимоги до системи програмного керування шнековим 3D-принтером, зокрема щодо забезпечення стабільної екструзії, компенсації тиску матеріалу, синхронізації роботи виконавчих механізмів та реалізації алгоритмів керування процесом друку.

Отримані результати є теоретичною основою для подальшої розробки апаратної та програмної частин системи керування, що розглядаються у наступному розділі роботи.

2 АПАРАТНА ЧАСТИНА ЕКСТРУЗІЙНОГО ВУЗЛА

2.1 Апаратна архітектура екструзійного вузла

Проектування програмного забезпечення для адитивного виробництва керамічних виробів неможливе без глибокого розуміння фізичної архітектури принтера. В межах даної роботи було розроблено та проаналізовано унікальну апаратну базу, що складається з прецизійного шнекового екструдера та інтелектуальної системи автоматичної зміни інструментів (Tool Changer).

2.1.1 Обґрунтування конструкції шнекового механізму

Вибір геометричних параметрів шнекового вузла є критично важливим етапом проектування, що визначає реологічну стабільність процесу екструзії в'язкопластичних керамічних мас. В рамках цієї роботи, виходячи з аналізу гідродинамічних опорів в каналі шнека, було прийнято рішення про використання одношнекового механізму зі змінною глибиною нарізки. Використання стандартного шнека типу ПП 20×8 обумовлене необхідністю досягнення компромісу між продуктивністю екструдера та його масогабаритними показниками, що впливає на інерційні характеристики всієї кінематичної системи принтера. Геометричні параметри конструкції включають зовнішній діаметр, що становить 20 мм, і загальну робочу довжину 160 мм, що є оптимальним для інтеграції в модуль 3D-друку.

Конструкція шнека передбачає розподіл робочого об'єму на три функціональні зони, що забезпечують поетапну підготовку матеріалу. Перша зона, або зона живлення довжиною 40 мм, призначена для захоплення керамічної пастоподібної маси і її подачі в робочу область без значного підвищення тиску. Далі матеріал переходить у зону пластикації довжиною 56 мм, де відбувається створення необхідного робочого тиску та гомогенізація маси, що критично важливо для запобігання неоднорідності структури виробу. Завершальним

етапом є зона дозування довжиною 64 мм, яка відповідає за стабілізацію потоку та рівномірну подачу матеріалу через сопло діаметром від 1 мм до 5 мм. Застосування такої конфігурації дозволяє досягати швидкості екструзії до 50 мм/с, забезпечуючи при цьому стабільну геометрію шару, що формується, і мінімізацію пульсацій тиску, що підтверджує коректність обраних параметрів для реалізації технічних вимог роботи.

2.1.2 Система автоматичної зміни інструментів Tool Changer

Інтелектуальна система автоматичної зміни інструментів, впроваджена в апаратну архітектуру принтера, є програмно-апаратним комплексом, що дозволяє виконувати адитивне виробництво виробів з використанням до п'яти різних матеріалів у рамках єдиного технологічного циклу. Унікальність даної системи полягає в інтеграції прецизійної механіки та методу електромагнітної фіксації, що значно підвищує гнучкість виробничих процесів, рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – 3D-принтер з технологією Tool Changer

Основою рухомої частини системи є блок каретки, що базується на прецизійних рейкових направляючих Hiwin MGN12H, використання яких продиктоване необхідністю забезпечення високої жорсткості при мінімальному

коефіцієнті тертя. Як виконавчий механізм захоплення застосований електромагніт LS-P30/22 із силою відриву до 10 кг, що гарантує надійне утримання екструдера навіть при значних динамічних навантаженнях, що виникають під час високошвидкісного позиціонування. Фіксація самого блоку екструдера на каретці здійснюється контактом зі сталевим феромагнітним диском товщиною 3 мм. Для забезпечення високоточного вертикального позиціонування та компенсації похибок виготовлення конструкції застосовуються латунні конічні напрямні, що реалізують принцип пасивного самоцентрування. Дане технічне рішення забезпечує повторюваність установки інструменту з точністю до ±0,05 мм, що унеможливлює процедури перекалібрування після кожної зміни робочого органу. Стаціонарна частина системи представлена паркувальною станцією, оснащеною неодимовими магнітами для надійного утримання неактивних екструдерів у вихідному стані. Перехід від використання механічних захватів до електромагнітної фіксації дозволив суттєво оптимізувати масу рухомих вузлів, знизити моменти інерції каретки та спростити процедуру автоматизації зміни інструментів через інтерпретацію G-коду. Запропонована архітектура вигідно відрізняється від класичних пневматичних або сервоприводних аналогів підвищеною експлуатаційною надійністю і відсутністю механічних пар тертя, що швидко зношуються, що підтверджує доцільність даного рішення для завдань автоматизованого адитивного виробництва.

2.2. Система управління та енергетичне забезпечення комплексу

Функціонування програмно-апаратного комплексу базується на використанні високопродуктивного контролера Geek 3D Z370, який виступає центральним вузлом обробки даних та генерації керуючих сигналів. Вибір даної плати обумовлений її здатністю забезпечувати високу частоту опитування периферійних датчиків та стабільність формування імпульсних послідовностей для драйверів TMC2209, що є важливим для реалізації мікрокрокового режиму роботи приводів.

Виконавчі механізми системи представлені п'ятьма кроковими двигунами, підібраними відповідно до функціонального навантаження окремих вузлів принтера. Для переміщення друкувальної головки по осі Z застосовано два посилені крокові двигуни NEMA 17, які забезпечують синхронний підйом порталу та високу точність позиціонування. Переміщення по координатних осях X та Y реалізовано за допомогою двох крокових двигунів NEMA 23, що характеризуються підвищеним крутним моментом і дозволяють забезпечити стабільний рух конструкції навіть за значних інерційних навантажень. Для приводу шнекового екструдера використовується окремий кроковий двигун NEMA 23, оснащений планетарним редуктором із передавальним числом 1:7, що дозволяє суттєво збільшити вихідний крутний момент та забезпечити плавну, рівномірну подачу високов'язкої керамічної пасти. Таке конструктивне рішення сприяє підвищенню стабільності екструзії, зменшенню пульсацій потоку матеріалу та покращенню якості формування шарів виробу.

Людсько-машинний інтерфейс системи реалізований на базі графічного дисплея MKS mini12864 v3.0. Дане рішення забезпечує високу інформативність візуалізації технологічних процесів, дозволяючи оператору в режимі реального часу здійснювати моніторинг температурних градієнтів, координатних переміщень та коригувати параметри екструзії без зупинки циклу друку, що значно підвищує ергономіку керування адитивною установкою.

Енергетична підсистема комплексу спроєктована з урахуванням необхідності забезпечення стабільного живлення потужних силових навантажень, до яких належать нагрівальні елементи екструзійної групи, силіконовий нагрівальний стіл та приводи системи позиціонування. Використання блока живлення номінальною потужністю 360 Вт дозволяє підтримувати стабільну напругу 12 В навіть при пікових струмових навантаженнях, що виникають у моменти одночасного включення всіх зон нагріву та роботи кількох приводів.

Для забезпечення надійної комутації потужних кіл нагрівального столу застосовано твердотільне реле SSR-25DA, яке забезпечує гальванічну розв'язку між логічними ланцюгами керування контролера та силовим контуром нагрівача.

Таке схемотехнічне рішення виключає протікання високих струмів через доріжки основної плати, підвищує загальну надійність системи та захищає електроніку від можливих стрибків напруги під час комутації потужних навантажень.

2.3 САУ для планетарного двигуна шнекового екструдера

Згідно із технічним завданням на розробку програмного забезпечення шнекового 3D-принтера, система керування повинна забезпечувати плавне та точне регулювання швидкості кроковим двигуном шнека з постійного струму в умовах змінного навантаження (подачі матеріала) [18]. Заносимо початкові розрахункові дані до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення параметрів САК тягового приводу

Найменування	Позначення	Значення
Коефіцієнт підсилення контролера	$K_{ПП}$	100
Коефіцієнт підсилення драйвера	$K_{Д}$	20
Стала часу драйвера	$T_{Д}$	0,005 с
Коефіцієнт моменту планетарного редуктора двигуна	$K_{М}$	0,8 Н·м/А
Електрична стала часу двигуна	$T_{е}$	0,002 с
Зведений момент інерції (шнека)	J	≈ 0,4 кг·м²
Стала часу датчика зворотного зв'язку	$T_{дат}$	0,02 с

До табл. 2.2 заносимо вимоги, яким повинна задовольняти вихідна система автоматичного керування (САК) для забезпечення стабільного руху платформи.

Таблиця 2.2 – Вимоги щодо якості процесу управління

Найменування	Позначення	Значення
Максимальний час встановлення швидкості	t_c	≤0,5 с
Допустиме перерегулювання	σ	≤ 10 %
Статична похибка	$\varepsilon_{ст}$	≤ 1 %

Лінійна неперервна САК швидкістю двигуна містить: потужний колекторний двигун постійного струму як об'єкт регулювання, модуль зворотного зв'язку (датчик струму/швидкості), елемент порівняння, головний контролер керування (ПП) та драйвер двигуна (ДД), рис. 2.2 [9].

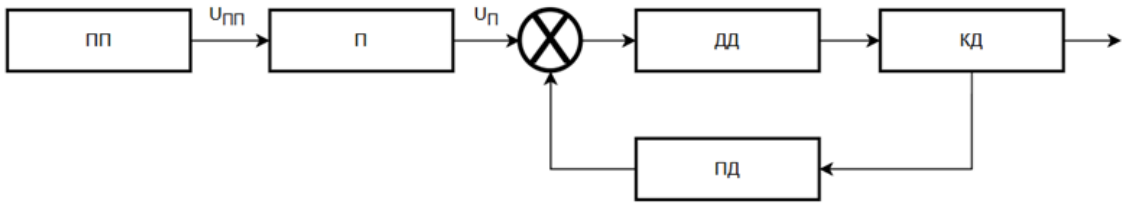


Рисунок 2.2 – Функціональна блок-схема САК

Математичний опис ланок системи в операторній формі Лапласа. Рівняння елемента порівняння:

$$e(t) = \theta зад(t) - \theta вих(t)\,, \qquad (2.1)$$

де $e(t)$ – сигнал помилки (різниця між заданою і фактичною швидкістю двигуна);

$\theta зад(t)$ – задане значення швтдкості;

$\theta вих(t)$ – фактичне значення швидкості.

Формула плати керування (ПП):

$$U_{\text{ПП}}(s) = \text{К}_{\text{ПП}} \cdot E(s)\,, \tag{2.2}$$

де $U_{ПП}(s)$ – вихідна напруга/ШІМ контролера;

$K_{ПП}$ – коефіцієнт підсилення;

$E(s)$ – сигнал помилки в образі Лапласа.

Передавальна функція силового драйвера:

$$W_{\text{Д}}(s) = \frac{\text{К}_{\text{Д}}}{\text{Т}_{\text{Д}}s + 1}\,, \tag{2.3}$$

де $W_Д(s)$ – передавальна функція драйвера;

$K_Д$ – коефіцієнт підсилення драйвера;

$T_Д$ – стала часу драйвера.

Передавальна функція виконавчого колекторного двигуна:

$$W_{\text{двиг}}(s) = \frac{\text{К}_{\text{М}}}{J_{S^2} + T_e s + \text{К}_{\text{М}}}\,, \tag{2.4}$$

де K_M – коефіцієнт моменту двигуна;

J – зведений момент інерції платформи;

T_e – електрична стала часу;

s – комплексна змінна Лапласа.

Формула датчика зворотного зв'язку:

$$W_{\text{дат}}(s) = \frac{1}{\text{Т}_{\text{дат}}s + 1}. \quad (2.5)$$

Передавальна функція всієї замкненої системи керування бортом:

$$W_{CAK}(s) = \frac{\text{К}_{\text{ПП}} \cdot \text{К}_{\text{Д}} \cdot \text{К}_{\text{М}}}{(\text{Т}_{\text{д}}s + 1)(J_{S^2} + T_e s + \text{К}_{\text{М}})(\text{Т}_{\text{дат}}s + 1)}, \quad (2.6)$$

де $W_{CAK}(s)$ – передавальна функція всієї системи автоматичного керування;

$\text{К}_{\text{ПП}}$ – коефіцієнт підсилення ПП;

$\text{К}_{\text{Д}}$ – коефіцієнт підсилення драйвера;

$\text{К}_{\text{М}}$ – коефіцієнт моменту двигуна;

$\text{Т}_{\text{Д}}s$ – стала часу драйвера;

J – момент інерції ротора;

T_e – електрична стала часу двигуна;

$\text{Т}_{\text{дат}}s$– стала часу датчика;

s – комплексна змінна Лапласа.

Підставимо реальні розрахункові параметри нашої системи (при $K_{ПП}$ = 100, $K_Д$ = 20):

$$W_{CAK}(s) = \frac{100 \cdot 20 \cdot 0.8}{(0{,}005s + 1)(0{,}4s^2 + 0{,}002s + 0{,}8)(0{,}02s + 1)},$$

$$W_{CAK}(s) = \frac{1600}{(0{,}005s + 1)(0{,}4s^2 + 0{,}002s + 0{,}8)(0{,}02s + 1)}.$$

Дана математична модель дозволяє на етапі програмного налаштування

драйверу оптимізувати коефіцієнти для уникнення автоколивань шнеку під час подачі матеріалу [9, 10].

2.4. Виконавчі механізми та приводи екструзійного вузла

Реалізація процесу екструзії в'язких керамічних мас вимагає докладання значних зусиль, що зумовлює особливі вимоги до підсистеми приводів. Як силовий агрегат шнекового вузла був обраний посилений крокoвий двигун типорозміру NEMA 23. Вибір даного типу приводу продиктований його високою енергетичною ефективністю та здатністю зберігати стабільний крутний момент в широкому діапазоні частот обертання, що необхідно для подолання гідродинамічного опору керамічної пасти всередині дозування камери. Інтеграція даного двигуна у складі механіки принтера дозволила реалізувати прецизійну подачу матеріалу, забезпечуючи плавність ходу шнека і виключаючи пропуски кроків при роботі з пастами високої щільності, що є необхідною умовою для отримання виробів із заданою геометричною точністю. Вся силова зв'язка приводів і електроніки, що управляє, утворює закінчений контур автоматизації, що забезпечує високу повторюваність процесу друку в умовах дослідницьких і виробничих завдань.

2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі розроблено апаратну частину системи програмного керування шнековим 3D-принтером для друку керамічними матеріалами. На основі аналізу вимог до процесу екструзії обґрунтовано вибір основних компонентів системи, що забезпечують необхідну точність позиціонування, стабільність подачі матеріалу та надійність функціонування обладнання.

Як центральний елемент системи обрано контролер Geek 3D Z370, який забезпечує керування виконавчими механізмами, обробку сигналів від датчиків та взаємодію з периферійними пристроями. Для керування крокoвими двигунами використано драйвери TMC2209, що підтримують мікрокрокoвий режим роботи та забезпечують плавність переміщення координатних осей і стабільність роботи

шнекового екструдера.

Обґрунтовано вибір приводів системи, що включають два посилені крокові двигуни NEMA 17 для осі Z, два двигуни NEMA 23 для координатних осей X та Y, а також окремий двигун NEMA 23 з планетарним редуктором 1:7 для приводу шнекового екструдера. Таке технічне рішення забезпечує необхідний крутний момент, високу точність позиціонування та рівномірну подачу високов'язкої керамічної пасти.

Також розглянуто енергетичну підсистему комплексу, до складу якої входять імпульсний блок живлення потужністю 360 Вт, графічний дисплей MKS mini12864 v3.0 та твердотільне реле SSR-25DA, що забезпечують стабільне електроживлення, безпечну комутацію силових навантажень і зручний моніторинг технологічних параметрів процесу друку.

Результати другого розділу сформували апаратну основу шнекового 3D-принтера, створивши передумови для подальшої розробки друкованої плати, схемотехнічної реалізації та інтеграції програмного забезпечення системи керування у наступному розділі кваліфікаційної роботи.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АЛГОРИТМІЧНЕ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ

3.1 Обґрунтування вибору програмно-апаратної платформи керування

Проектування інтелектуальної системи керування для шнекового 3D-принтера вимагає реалізації комплексних алгоритмів предиктивного моделювання та динамічної компенсації потоку в’язких середовищ у реальному часі. Як центральний обчислювальний вузол була обрана 32-бітна плата керування Geek 3D Z370. Вибір даної платформи зумовлений її високою обчислювальною потужністю та архітектурною здатністю забезпечувати прецизійну синхронізацію крокових двигунів із мінімальними часовими затримками. На відміну від застарілих 8-бітних контролерів, використання архітектури даного мікроконтролера дозволяє виконувати паралельну обробку G-коду, моніторинг температурних датчиків та реалізацію складних математичних моделей компенсації тиску без ризику виникнення «тремтіння» (jitter) під час руху каретки, що є критично важливим для забезпечення якості друку керамікою.

3.2 Адаптація прошивки Marlin під специфіку шнекової екструзії

Базовим програмним каркасом системи було обрано прошивку Marlin через її модульність, відкриту архітектуру та підтримку кастомних кінематичних схем. Процес адаптації прошивки включав глибоку модифікацію ядра системи для забезпечення коректної роботи з неньютонівськими тиксотропними середовищами. В рамках даної роботи було переконфігуровано алгоритми парсингу команд та методики розрахунку кроків двигунів (steps per unit), оскільки стандартна математична модель (орієнтована на філамент) не враховує об’ємну продуктивність шнекового вузла. Модифікація коду дозволила впровадити спеціалізовані коефіцієнти, що враховують передавальне число

планетарного редуктора 1:7 та геометричні параметри робочої камери, забезпечуючи стабільну екструзію матеріалу навіть при високих опорах у зоні дозування.

3.3 Алгоритмізація процесу зміни інструментів Tool Changer

Програмний модуль керування системою Changing Tool реалізовано на основі логіки конечного автомата (finite-state machine), що забезпечує чітку послідовність дій для надійної зміни робочих органів. Алгоритм синхронізує фізичне переміщення каретки із сигналами керування електромагнітним захватом LS-P30/22. Важливою складовою є підсистема діагностики, що опитує датчики стану на паркувальній станції перед кожною зміною та після неї. У випадку невідповідності сигналів від кінцевих вимикачів, програмний комплекс автоматично ініціює команду аварійної зупинки (M112), що виключає ризик механічного зіткнення каретки з іншими елементами конструкції. Така архітектура забезпечує високу функціональну стійкість (fault tolerance) системи, що є визначальною умовою для автоматизованих адитивних комплексів промислового рівня.

3.4 Конструктивні параметри шнекового екструдера

У даній роботі як виконавчий механізм подачі керамічної пасти використовується одношнековий екструдер, параметри якого визначають стабільність процесу екструзії та безпосередньо впливають на точність формування виробу. На відміну від класичних FDM-принтерів, де використовується подача полімерного філаменту, у запропонованій конструкції здійснюється транспортування високов'язкої керамічної пасти, що потребує підвищеного крутного моменту та стабільної швидкості обертання шнека, рис. 3.1.

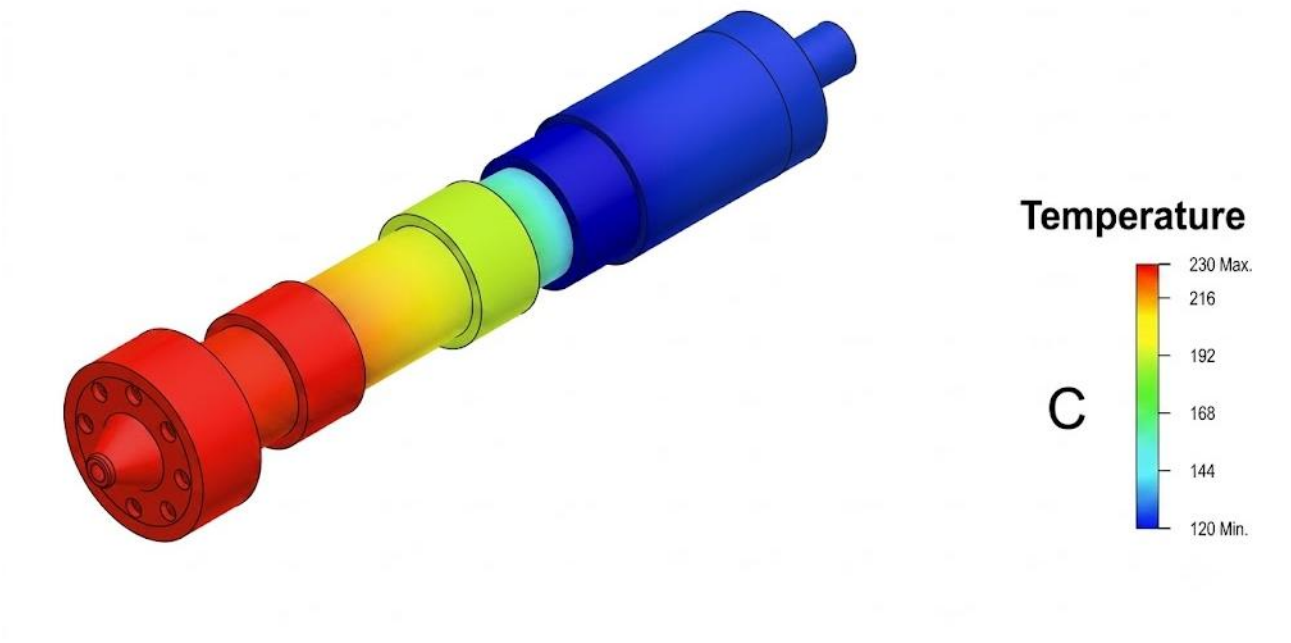


Рисунок 3.1 – Параметри шнекового екструдера

Під час вибору геометричних параметрів екструдера враховувалися такі основні вимоги:

– забезпечення рівномірної подачі матеріалу;

– мінімізація пульсацій потоку;

– зменшення масогабаритних характеристик друкувальної головки;

– забезпечення продуктивності, достатньої для реалізації заданої швидкості друку.

Для екструдера прийнято стандартний одношнековий гвинт діаметром 20 мм із співвідношенням L/D дорівнює 8, що забезпечує компактність конструкції та достатню продуктивність при роботі з в'язкопластичними матеріалами. Шнек має постійний крок нарізки та змінну глибину каналу, що відповідає класичній конструкції екструдерів і забезпечує поступове ущільнення матеріалу під час його транспортування.

Відповідно до рекомендацій для одношнекових екструдерів конструкцію поділено на три функціональні зони:

– зона подачі;

– зона пластифікації;

– зона дозування.

Для обраної довжини шнека 160 мм довжина зони подачі становить 40 мм, зони пластифікації 56 мм, а зони дозування 64 мм. Такий розподіл забезпечує рівномірне ущільнення матеріалу та стабільне формування тиску перед соплом.

Основні геометричні параметри шнека визначено відповідно до стандартних методик розрахунку одношнекових екструдерів. Крок нарізки прийнято рівним діаметру шнека (t дорівнює D, що в свою чергу 20 мм), що забезпечує оптимальне співвідношення між продуктивністю та стабільністю транспортування матеріалу. Глибина гвинтового каналу в зоні подачі становить 2,8 мм, у зоні дозування 0,62 мм, а в зоні пластифікації змінюється поступово, забезпечуючи необхідний ступінь ущільнення матеріалу.

Для зменшення внутрішніх витоків пасти та підвищення ефективності роботи екструдера ширину гребеня витка прийнято 2 мм, а радіальний зазор між шнеком та внутрішньою поверхнею циліндра 0,04 мм. Такі параметри дозволяють мінімізувати втрати продуктивності та забезпечити стабільний режим роботи екструдера, рис. 3.2.

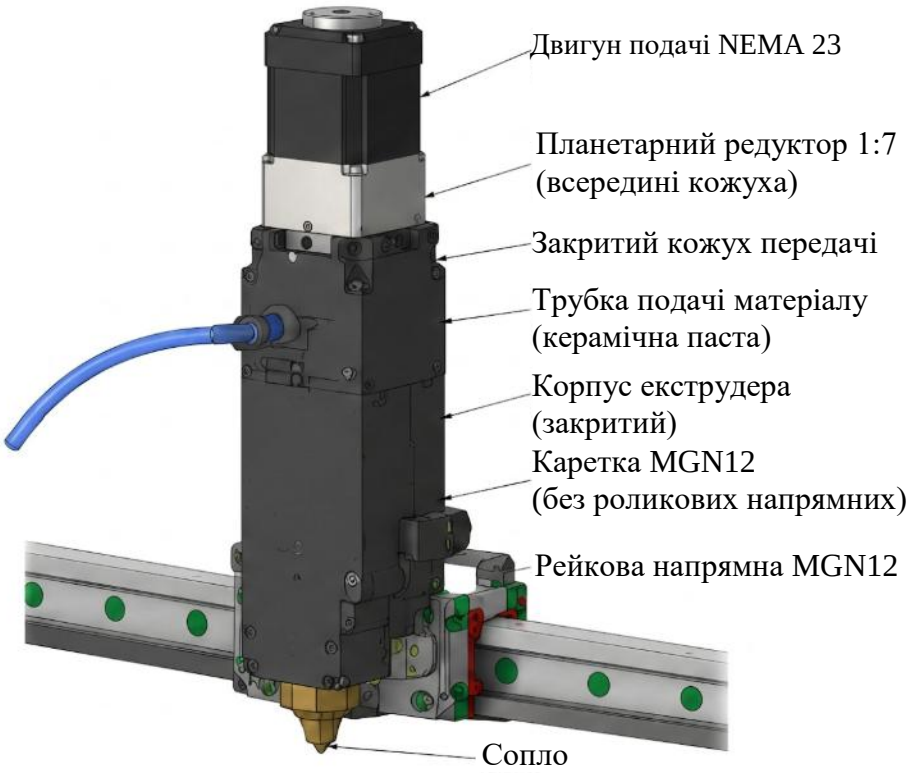


Рисунок 3.2 – Шнековий екструдер у збірці

Отримані геометричні параметри екструзійного вузла використовуються під час подальшого налаштування системи програмного керування, визначення швидкості обертання шнека та параметрів подачі матеріалу, що забезпечує стабільність процесу друку керамічними пастами.

3.5 Моделювання прискорень і швидкісних режимів друку

Для оцінювання динамічних параметрів системи переміщення друкуючої головки необхідно врахувати масу екструзійного вузла, оскільки саме вона визначає інерційне навантаження на приводи осей X та Y. У роботі використовується шнековий екструдер, тому маса друкуючої головки є більшою, ніж у класичних FDM-принтерах. З урахуванням маси шнекового вузла, двигуна NEMA 23 з планетарним редуктором 1:7, сопла, кріплення та з'єднувальних елементів приймаємо розрахункову масу друкуючої головки, m дорівнює 2,5 кг.

Таке припущення є достатньо реалістичним для компактного шнекового екструдера, оскільки у вихідному розрахунку наголошується на необхідності мінімізації масогабаритних параметрів екструдера для зменшення інерційності каретки та підвищення швидкості друку.

Для переміщення по осях X та Y використовуються два крокові двигуни NEMA 23, які мають підвищений крутний момент. Для попереднього інженерного розрахунку приймаємо, що корисне тягове зусилля одного приводу з урахуванням втрат у ремінній передачі становить 35 Н.

Максимальне теоретичне прискорення друкуючої головки визначається за другим законом Ньютона:

$$\mathrm{a} = \frac{F}{m}, \tag{3.1}$$

де a – прискорення друкуючої головки, м/с²;

F – тягове зусилля приводу, Н;

m – маса друкуючої головки, кг.

Таким чином отжимаемо:

$$a = \frac{35}{2{,}5} = 14\frac{м}{с^2} = 14000\ мм/с^2\ .$$

Однак для реальної роботи 3D-принтера використовувати граничне теоретичне прискорення недоцільно, оскільки це може викликати вібрації, пропуски кроків, нерівномірність подачі керамічної пасти та погіршення якості поверхні виробу. Тому доцільно прийняти робоче прискорення з коефіцієнтом запасу від 4 до 5 раз, таким чином $a_{роб}$ лежить в межах від 2500 мм/с^2 до 3500 мм/с^2.

Для друку керамічними пастами основним обмеженням є не лише динаміка координатної системи, а й стабільність екструзії. Згідно з розрахунками продуктивності шнекового екструдера, максимальна швидкість переміщення екструдера в робочому режимі приймається на рівні 50 мм/с, при цьому продуктивність екструдера повинна перевищувати цю швидкість, рис. 3.3.

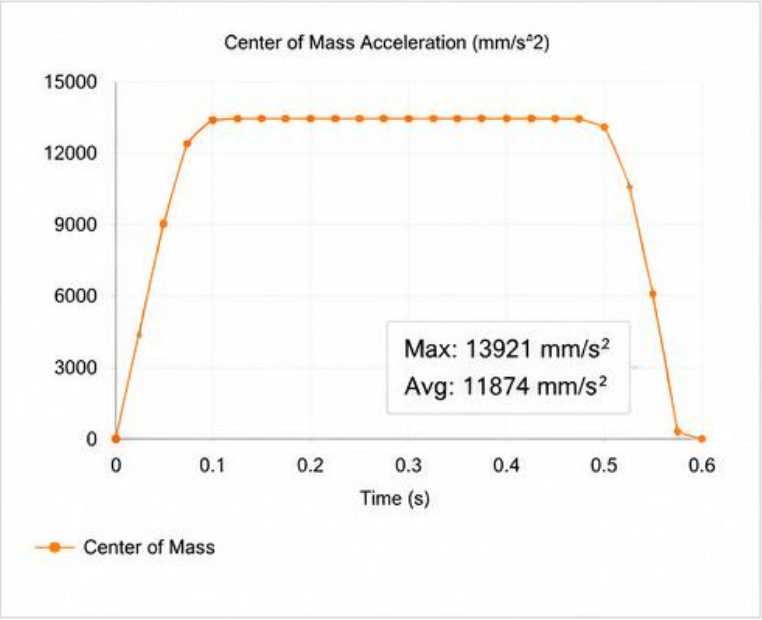


Рисунок 3.3 – Прискорення екструдера під час розгону та гальмуванні (вісь X)

З урахуванням високої в’язкості керамічної пасти, інерційності шнекового механізму та необхідності стабільного формування шару доцільно прийняти такі режими, табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Рекомендовані швидкісні режими друку

Режим роботи	Швидкість, мм/с	Прискорення, мм/с²
Початковий тестовий друк	10–15	800–1200
Стабільний робочий режим	20–35	1500–2500
Максимальний робочий режим	40–50	2500–3500
Холості переміщення	80–120	3000–5000

Таким чином, для системи з друкуючою головкою масою близько 2,5 кг та приводами NEMA 23 по осях X і Y теоретично можливе прискорення до 14000 мм/с². Проте для забезпечення стабільного друку керамічними пастами раціональним є обмеження робочого прискорення до 2500–3500 мм/с², а швидкості друку до 20–50 мм/с. Такий режим забезпечує баланс між продуктивністю, точністю позиціонування та стабільністю подачі матеріалу через шнековий екструдер, рис. 3.4.

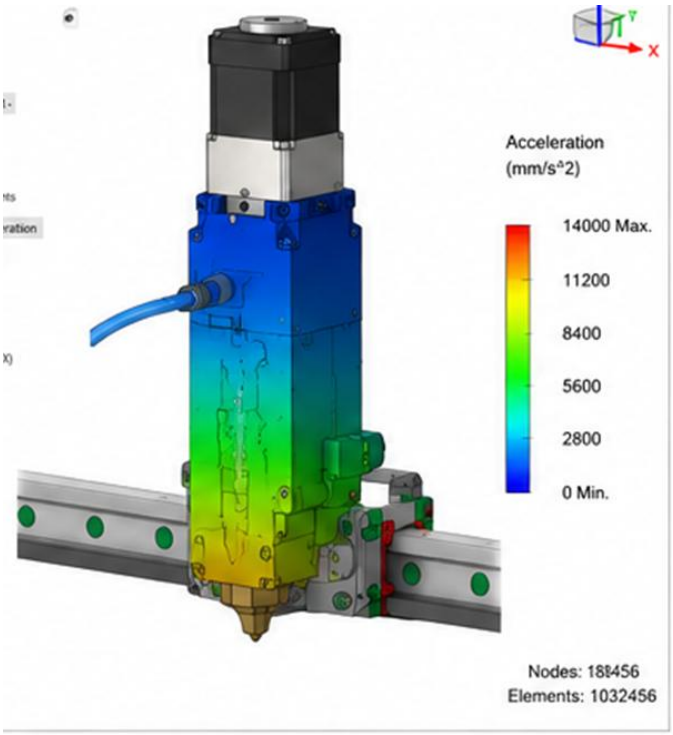


Рисунок 3.4 – Розподіл прискорень друкуючої головки при максимальному навантажені (вісь X)

3.6 Розрахунок дозування та кроків двигуна

Для забезпечення прецизійного керування процесом друку ми повинні встановити жорстку математичну залежність між швидкістю переміщення каретки та кутовою швидкістю обертання шнека. У стандартних FDM-принтерах цей зв'язок є лінійним, проте для шнекової екструзії кераміки необхідно враховувати об'ємну продуктивність. Об'єм матеріалу, що витікає з сопла за одиницю часу, залежить від площі перерізу сопла та швидкості друку:

$$V_{line} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v, \tag{3.2}$$

де V_{line} – об'єм матеріалу, що витікає з сопла за одиницю часу;

d – діаметр сопла;

v – швидкість друку.

Оскільки шнек за один повний оберт видавлює фіксований об'єм пасти V_{screw}, що дорівнює об'єму його гвинтової канавки, ми можемо розрахувати необхідну кількість обертів. Проте в реальних умовах виникає проблема зворотного потоку (backflow). Через високий тиск у зоні дозування частина в'язкої пасти «просочується» назад крізь технологічний зазор між гребенем шнека та стінкою циліндра.

Це створює нелінійну похибку, яку ми маємо компенсувати програмно через зміну значення steps_per_mm у прошивці Marlin. Для цього використовується формула:

$$Steps_per_mm = \frac{Stepsperrev \cdot Microstepping}{V_{screw}/A_{nozzle}}, \tag{3.3}$$

де Steps_per_mm – необхідна кількість кроків двигуна для екструзії 1 мм матеріалу;

Stepsperrev – базова кількість кроків крокового двигуна на один повний оберт;

Microstepping – встановлений мікрокроковий режим роботи драйвера двигуна;

V_{screw} – об'єм керамічної пасти, що видавлюється за один повний оберт шнека;

A_{nozzle} – площа поперечного перерізу вихідного отвору сопла.

Ці параметри вносяться безпосередньо у файл конфігурації прошивки (рис.3.5).

```
/**
 * Default Axis Steps Per Unit (linear=steps/mm, rotational=steps/°)
 * Override with M92
 *                                      X, Y, Z [, I [, J [, K...]]], E0 [, E1[, E2...]]
 */
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT   { 78.7402, 78.7402, 200.0*8/3, 850.5 }
```

Рисунок 3.5 – Налаштування параметрів екструзії у файлі Configuration.h

3.7 Алгоритм зміни інструментів

Розробка програмного забезпечення для системи Changing Tool вимагає створення чіткої логічної послідовності дій, що забезпечує надійну фіксацію та безперебійну роботу принтера. Головною складністю є необхідність синхронізації механічних переміщень каретки з електричними сигналами керування електромагнітом та опитуванням датчиків стану.

Послідовність роботи алгоритму зміни інструмента:

– завершення поточної операції (M400): очікування повної зупинки всіх двигунів для уникнення динамічних ударів;

– паркування активного екструдера: переміщення каретки в зону «докінгу» за заданими координатами X, Y;

– деактивація фіксації: подача сигналу на вимкнення електромагніту LS-P30/22;

– діагностична перевірка: зчитування сигналу з кінцевого вимикача в гнізді паркування.

Важливо: якщо після вимкнення магніту сенсор не фіксує наявність головки в гнізді, програма ініціює команду Emergency Stop (M112). Це запобігає можливому зіткненню каретки з іншими елементами конструкції (рис. 3.6).

```
void tool_change_safety_check() {
  st_synchronize(); // Чекаємо завершення рухів (M400)

  WRITE(MAGNET_PIN, LOW); // Деактивація електромагніту
  delay(100); // Коротка пауза для спрацювання механіки

  if (READ(DOCK_SENSOR_PIN) == HIGH) {
    SERIAL_PROTOCOLLN("Tool successfully docked.");
  } else {
    // Якщо датчик не бачить інструмент у гнізді - зупиняємо принтер
    kill("ERROR: Tool not docked! System halted.");
  }
}
```

Рисунок 3.6 – Програмна реалізація перевірки фіксації інструмента

3.8 Програмна адаптація алгоритму компенсації тиску Advance

Для роботи з в'язкими керамічними масами в прошивці Marlin було активовано та модифіковано модуль ADVANCE. У стандартних системах цей алгоритм розраховує пружну деформацію пластикової нитки. В нашій розробці роль філаменту виконує стовп пасти всередині екструдера, тому параметр D_FILAMENT було переосмислено як внутрішній діаметр циліндра дозування.

Математична логіка.

Прошивка використовує значення діаметра для розрахунку площі перерізу:

$$A = 0{,}25 \cdot \pi \cdot D_{cylinder}^2, \tag{3.4}$$

де A – площа перерізу стовпа пасти

$D_{cylinder}^2$ – внутрішній діаметр циліндра дозування екструдера.

Це значення є критичним для визначення об'єму матеріалу на одиницю кроку шнека. Модифікація дозволяє алгоритму коректно прогнозувати інерцію маси та знижувати швидкість обертання шнека до моменту зупинки каретки, що запобігає появі напливів на кутах моделі (рис. 3.7).

```
#ifdef ADVANCE
  #define EXTRUDER_ADVANCE_K 0.45 // Коефіцієнт компенсації
  #define D_FILAMENT 20.0         // Внутрішній діаметр циліндра дозування
  #define STEPS_MM_E 850.5        // Наші розрахункові кроки для шнека

  // Розрахунок площі перерізу для шнекової подачі
  #define EXTRUTION_AREA (0.25 * D_FILAMENT * D_FILAMENT * 3.14159)
  #define STEPS_PER_CUBIC_MM_E (axis_steps_per_unit[E_AXIS]/ EXTRUTION_AREA)
#endif
```

Рисунок 3.7 – Модифікація параметрів у Configuration_adv.h

3.9 Програмне налаштування апаратного відкату Firmware Retract

У класичному FDM-друці ретракт фізично втягує твердий пластиковий пруток, створюючи вакуум. Для шнекового екструдера з керамічною масою механіка процесу кардинально відрізняється. Через наявність технологічного зазору та ефект зворотного потоку, реверс шнека не здатний ефективно втягнути в'язку масу назад.

Головна мета відкату в нашій системі – це миттєве скидання надлишкового тиску (Pressure Relief) у робочій камері сопла. Це запобігає мимовільному витіканню пасти під час холостих переміщень каретки. Для цього в прошивці активується функція FWRETRACT, яка дозволяє налаштувати короткий, але швидкий реверс.

Для компенсації втрати об'єму в робочій зоні після скидання тиску, параметр RETRACT_RECOVER_LENGTH встановлюється вище нуля (наприклад, 0,2 мм). Це створює так званий "екстра-праймінг" (Extra Priming) – попереднє заповнення сопла перед початком нової екструзії, що гарантує відсутність пропусків на старті лінії (рис. 3.8).

```
#define FWRETRACT // Активація апаратного відкату
#if ENABLED(FWRETRACT)
  #define FWRETRACT_AUTORETRACT             // Перехоплення ретрактів слайсера
  #if ENABLED(FWRETRACT_AUTORETRACT)
    #define MIN_AUTORETRACT            0.1 // (мм) Не конвертувати рухи осі E коротші за це значення
    #define MAX_AUTORETRACT           10.0 // (мм) Не конвертувати рухи осі E довші за це значення
  #endif
  #define RETRACT_LENGTH               2.0 // Дуже короткий відкат для скидання тиску
  #define RETRACT_LENGTH_SWAP          13   // (мм) Довжина відкату за замовчуванням при зміні інструмента (додатне значення)
  #define RETRACT_FEEDRATE             45   // Висока швидкість для різкого реверсу
  #define RETRACT_ZRAISE               0    // (мм) Підняття по осі Z за замовчуванням під час відкату
  #define RETRACT_RECOVER_LENGTH       0.2 // Екстра-праймінг після відкату
  #define RETRACT_RECOVER_LENGTH_SWAP  0    // (мм) Додаткова довжина відновлення при зміні інструмента (додається до базового відкату)
  #define RETRACT_RECOVER_FEEDRATE     8    // (мм/с) Швидкість повернення після відкату за замовчуванням
  #define RETRACT_RECOVER_FEEDRATE_SWAP 8   // (мм/с) Швидкість повернення після відкату при зміні інструмента
  #if ENABLED(MIXING_EXTRUDER)
    //#define RETRACT_SYNC_MIXING           // Одночасний відкат та відновлення для всіх крокових двигунів змішування
```

Рисунок 3.8 – Налаштування відкату у Configuration_adv.h

3.10 Висновки до третього розділу

У третьому розділі розроблено конструкцію друкуючої головки шнекового 3D-принтера та обґрунтовано вибір її основних конструктивних параметрів. Запропоновано екструзійний вузол із вертикальним розташуванням шнека, приводом на базі крокового двигуна NEMA 23 з планетарним редуктором 1:7 та системою кріплення на рейковій напрямній MGN12, що забезпечує високу жорсткість і точність позиціонування.

Проведено моделювання динамічних навантажень друкуючої головки та визначено, що найбільші напруження і деформації виникають у зоні кріплення каретки до екструдера. На основі розрахунків визначено раціональні режими роботи системи: швидкість друку 20–50 мм/с та робоче прискорення 2500 - 3500 мм/с², що забезпечують стабільну подачу керамічної пасти та високу якість друку.

Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої конструкції та можуть бути використані під час подальшої розробки системи програмного керування і практичної реалізації шнекового 3D-принтера.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Опис лабораторного переміщення

Лабораторний простір оснащений вхідними дверима, вікнами та штучним освітленням, яке забезпечує комфортні умови для роботи. У приміщенні розташовано 9 розеток із напругою 220 В та 2 розетки із напругою 380 В. Дотримані вимоги пожежної безпеки – в приміщенні встановлені вогнегасник, пісок та пожежна ковдра [19].

Схема лабораторного приміщення 3D прототипування зображена на рис. 4.1.

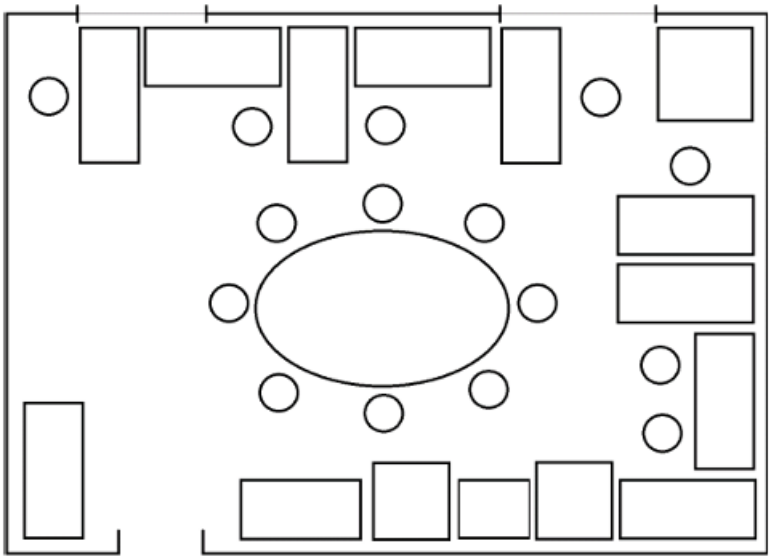


Рисунок 4.1 – Схема лабораторного приміщення 3D прототипування

Виконаємо розрахунок параметрів вентиляції, які є обов'язковими для вказаного приміщення. У механічній майстерні, де проводиться опалення, вентиляція та кондиціонування, необхідна швидкість повітрообміну становить 3-5 $м^3$/год. Скористаємося формулою для визначення мінімально необхідного повітрообміну для механічної майстерні, враховуючи коефіцієнт – 3, об’єм приміщення 130 $м^3$:

$$L = n \cdot V, \quad (4.1)$$

де L – необхідний обіг повітря у приміщенні;

V – об’єм приміщення;

n – кратність обігу повітря у приміщенні.

У результаті отримуємо розрахунок:

$$L = 130 \cdot 3 = 390 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Для людини, яка постійно перебуває у приміщенні достатній норматив – 60 м^3/ год. За отриманими результатами розрахунків можна зробити висновок, що у лабораторії на постійній основі можуть перебувати до 6 осіб.

4.2 Небезпечні та шкідливі фактори FFF/FDM-технології

Під час роботи з принтерами оператор може зіткнутися з різними небезпечними та шкідливими факторами, пов'язаними з нагрівальними елементами, рухомими частинами та випарами філаменту. Найбільший шкідливий фактор полягає у високій температурі нагрівального блоку, яка під час експлуатації може досягати від 200 °C до 300 °C. Якщо доторкнутися до сопла або нагрівача, це може призвести до миттєвих опіків другого ступеня. Також існує ризик загоряння філаменту або проводки, якщо система теплового захисту вийде з ладу.

Також небезпекою під час роботи з полімерами, є викид летких органічних сполук і ультрадрібних частинок, які виникають під час плавлення полімерів. Найвищі рівні викидів спостерігаються у ABS, Nylon та PC. Ці речовини можуть викликати подразнення дихальних шляхів, головний біль та алергічні реакції, особливо в умовах поганої вентиляції приміщення.

Рухомі елементи принтера, такі як каретки осей X та Y, екструдер, ремені й вали, можуть бути також факторами небезпеки. Вони здатні спричинити затягування або механічні травми під час роботи чи обслуговування верстата,

оскільки більшість приводів є відкритого типу. Щодо електричних ризиків, то до них відносяться блок живлення, нагрівачі та термістори, які підключені до мережі 220 В.

Зважаючи на всі ці фактори, робота з 3D-принтером вимагає дотримання електробезпеки, забезпечення належної вентиляції та суворого виконання інструкцій щодо обслуговування нагрівальних і механічних компонентів.

4.3 Вентиляція та контроль повітряного середовища

У процесі екструзії термопластів виділяються леткі сполуки, мікрочастинки та продукти термічного розкладання полімерів. Інтенсивність цього процесу залежить від типу матеріалу та температури друку. Найбільше потенційно шкідливих речовин виділяють ABS, Nylon і PC, оскільки вони можуть частково розкладатися при високих температурах. Навіть PLA, який вважається екологічно безпечним, під час екструзії утворює дрібнодисперсний аерозоль.

Щоб забезпечити безпечний рівень вмісту шкідливих речовин у повітрі, важливо використовувати системи примусової вентиляції, витяжні шафи або локальні фільтрувальні модулі, які фільтрами активованого вугілля. Робоче місце слід облаштовувати в приміщенні з кратністю повітрообміну не менше двох, трьох циклів на годину. Тривала експлуатація принтера в приміщеннях без вентиляції або поруч з людьми, які довго перебувають у кімнаті, зокрема в освітніх закладах, заборонена.

4.4 Висновки до четвертого розділу

Роботи за FFF/FDM 3D-принтерами пов'язана з рядом небезпечних та шкідливих факторів. Серед них особливої уваги заслуговують високі температури нагрівальних елементів, виділення летких органічних сполук і функціонування електромеханічних вузлів. Для забезпечення безпечних умов

експлуатації необхідний комплексний підхід, що включає технічні, організаційні та санітарно-гігієнічні заходи.

Дотримання вимог електробезпеки, регулярний технічний огляд обладнання, використання систем вентиляції та фільтрації повітря, а також правильне облаштування робочого місця значно знижують ризики виникнення аварійних ситуацій і негативного впливу на здоров’я. Впровадження заходів охорони праці гарантує безпечне проведення експериментальних досліджень і сприяє підвищенню надійності обладнання, а також стабільності технологічного процесу FFF/FDM-друку.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне завдання розробки системи програмного керування шнековим 3D-принтером для друку керамікою. Проведений аналіз сучасних адитивних технологій показав, що технологія шнекової екструзії (DIW) є найбільш доцільною для друку високов'язкими керамічними пастами завдяки можливості безперервної та контрольованої подачі матеріалу. У ході роботи розроблено апаратну архітектуру системи керування на базі контролера Geek 3D Z370, драйверів TMC2209, крокових двигунів NEMA 17 та NEMA 23, а також спроєктовано друкуючу головку зі шнековим екструдером, встановленим на рейковій напрямній MGN12. Для приводу шнека обґрунтовано використання крокового двигуна NEMA 23 з планетарним редуктором 1:7, що забезпечує необхідний крутний момент для стабільної подачі керамічної пасти.

Проведене моделювання навантажень і прискорень друкуючої головки показало, що найбільші механічні напруження виникають у зоні кріплення каретки MGN12 до корпусу екструдера. За результатами розрахунків визначено раціональні режими роботи системи: швидкість друку 20–50 мм/с та робоче прискорення 2500–3500 мм/с², які забезпечують стабільну екструзію матеріалу та високу якість формування виробів. Розроблено алгоритми програмного керування подачею матеріалу, реалізовано функції Pressure Advance, розумного ретракту та автоматичної зміни інструментів, що дозволяють компенсувати коливання тиску в екструдері, підвищити точність дозування та зменшити кількість дефектів під час друку.

Практичне значення роботи полягає у створенні конструкції шнекового екструдера та системи програмного керування, які можуть бути використані при розробці лабораторних, дослідницьких і промислових 3D-принтерів для друку керамікою.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2017-01-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2023. 64 с.

3. Положення про організацію проведення практики здобувачів вищої освіти Харківського національного університету радіоелектроніки [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 03.05. 2019 р. № 222. Режим доступу : https://nure.ua/wp-content/uploads/222-vid-03.05.2019-pro-vvedennja-v-diju rishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf

4. Положення про академічну доброчесність [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 02 лютого 2021 р. № 50. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-akademi chnu-dobrochesnist.pdf.

5. Nikitin D., Nevliudov I., Badanyuk I. (2023). Topological image processing for comprehensive defect and deviation analysis using adaptive binarization. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. № 1 (23). С. 164–173. DOI:10.30837/ITSSI.2023.23.164

6. Nevliudov I., Bliznyuk D., Nikitin D., et al. (2022). Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Board. Technology Audit and Production Reserves. № 2/2(64). pp. 43–49.: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256538

7. Нікітін, Д. О., Невлюдов, І. Ш., Жарікова, І. В., Бронніков, А. І., & Стрілець, Р. Є. (2025). Розробка методу контролю виробів під час фотополімерного 3D-друку. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,

4(1 (136), 42–54. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335706

8. Масючок О. П., Юрженко М. В., Колісник Р. В. та ін. Адитивні технології полімерних матеріалів (огляд) // Автоматичне зварювання. – 2020. –

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

10. Nevlyudov I., Razumov-Frizyuk E., Nikitin D., et al. (2023). Practical results of the study of photopolymer exposure of printed circuit board topology. Information systems in project and program management: Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA. P. 262–280. ISBN 978-9984-891-22-4. https://doi.org/10.30837/MMP.2023.262

11. І.Ш. Невлюдов, Є.А. Разумов-Фризюк, Д.О. Нікітін, Р.Є. Стрілець. (2025). Контроль якості фотополімерного 3D-друку. Харків: ХНУРЕ, 2025. – 208 с. ISBN: 978-617-8332-79-2: https://doi.org/10.30837/978-617-8332-79-2

12. Любченко В. П. Огляд технологій швидкого прототипування та інтеграція 3D принтерів // Вісник інженерної академії. – 2021.

13. Демків Т. В. Покращення внутрішньої структури деталей, виготовлених методом адитивної технології : магістерська дисертація. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.

14. Поліщук О. С., Поліщук А. О., Лісевич С. П. та ін. Дослідження технологічних особливостей 3D-друку металами // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022

15. Павлов В. А., Корабльов В. А. Сучасні адитивні технології: обладнання та матеріали : навчальний посібник. – Дніпро : НТУ «ДП», 2020.

16. Bose S., Akdogan E. K., Balla V. K. et al. 3D printing of ceramics: Advantages, challenges, applications, and perspectives // Journal of the American Ceramic Society. – 2024. – Vol. 107. – P. 7885–7921.

17. Cárdenas Correa E. F., Torres Barahona E. A., Carda Castelló J. B. Additive Manufacturing of Ceramic Materials via Direct Ink Writing (DIW): A Review // Ceramics.

18. Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи:

Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков. – Електронні текстові дані . – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 98 с.

19. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Безпека праці в індустрії ІТ- технологій" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, І. І. Хондак. – Харків, 2024. – 171 с.