

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**Факультет (ННІ)** конструювання та дизайну

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

**Завідувач кафедри**

Конструювання машин і обладнання  
(назва кафедри)

\_\_\_\_\_ Ловейкін В.С.  
(підпис) (ПІБ)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
(ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ БАКАЛАВРА)**

**на тему :** Розробка конструкції друкуєної голівки 3D принтера

**Спеціальність** 133 – «Галузеве машинобудування»  
(код і назва)

**Гарант освітньої програми**

Доктор технічних наук, професор  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Булгаков В.М.  
(ПІБ)

**Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи**

**(Керівник дипломного проєкту бакалавра)**

Кандидат технічних наук, доцент  
(науковий ступінь та вчене звання)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Крушельницький В.В.  
(ПІБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ (підпис)

Линник В.А.  
(ПІБ студента)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (НН) конструювання та дизайну

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

д.т.н. професор  
Ловейкін Вячеслав Сергійович  
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)  
“ ” 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я**

**на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту  
(на виконання дипломного проєкту бакалавра студенту)**

Лінник Валдим Артемович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проєкту бакалавра) \_\_\_\_\_

Розробка конструкції друкууючої голівки 3D принтера

затверджена наказом ректора НУБіП України від “ 16 ” грудня 2024 р. № 2265 “С”

Термін подання завершеної роботи (проєкту) на кафедру \_\_\_\_\_

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи (дипломного проєкту бакалавра)

Перелік питань, які потрібно розробити:

Провести аналіз літератури

Запропонувати конструкцію голівки 3D принтера

Здійснити розрахунки механізмів 3D принтера

Техніко економічне обґрунтування

Розглянути охорону праці

Висновки

Перелік графічних документів (за потреби) \_\_\_\_\_

Загальний вигляд конструкції друкууючої голівки 3D принтера

Деталювання

Дата видачі завдання “ 20 ” грудня 2024 р.

**Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи**

**(Керівник дипломного проєкту бакалавра)** \_\_\_\_\_

Крушельницький В. В.

( підпис )

(прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання** \_\_\_\_\_

Лінник В. А.

( підпис )

(прізвище та ініціали студента)

## Зміст

|  |    |
|--|----|
| РЕФЕРАТ .....  | 5  |
| ВСТУП.....   | 6  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ.....                                   | 7  |
| 1.1. ЕВОЛЮЦІЯ 3D ДРУКУ ПОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ .....      | 7  |
| 1.2. КОМПОНЕНТИ ТА СИСТЕМИ FDM-ПРИНТЕРІВ .....                     | 8  |
| 1.3. ВЕЛИКОФОРМАТНЕ АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО .....                     | 11 |
| 1.4. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ 3D-ДРУКУ ГРАНУЛАМИ.....                         | 13 |
| 1.5. ЕКСТРУЗІЯ ГРАНУЛ У FGF ТА ЇХ АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ .....      | 16 |
| 1.5.1. Принцип роботи екструдера FGF-принтера.....                 | 16 |
| 1.5.2. Апаратне забезпечення FGF-принтерів .....                   | 19 |
| 1.5.3. Програмне забезпечення .....                                | 23 |
| 1.6. ЗАСТОСУВАННЯ 3D-ДРУКУ ГРАНУЛАМИ.....                          | 25 |
| 1.7. ЕКОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ .....                                      | 27 |
| 1.8. ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ КОНСТРУКЦІЇ 3D-ПРИНТЕРА .....          | 28 |
| 1.9. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВПЛИВ НА РОЗВИТОК FGF-ТЕХНОЛОГІЇ..... | 31 |
| РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ДРУКУЮЧОЇ ГОЛОВКИ .....                         | 33 |
| 2.1. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ РОЗРОБКИ ГОЛІВКИ 3D ПРИНТЕРА.....   | 33 |
| 2.1.1. Розрахунки екструзійної системи.....                        | 33 |
| 2.1.2. Термічні розрахунки .....                                   | 38 |
| 2.1.3. Кінематичні та загальні параметри принтера .....            | 40 |
| 2.2. РОЗРОБКА ДРУКУЮЧОЇ ГОЛОВКИ .....                              | 44 |
| РОЗДІЛ 3. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....                                  | 47 |
| 3.1. РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА ПРАЦЮ .....                              | 47 |
| 3.2. РОЗРАХУНОК ВИТРАТ НА 3D-ДРУК ГРАНУЛАМИ.....                   | 48 |

|           |                   |          |        |      |                                       |      |         |
|-----------|-------------------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|---------|
|           |                   |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ |      |         |
| Змн.      | Арк.              | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |         |
| Розроб.   | Лінник В.А        |          |        |      | Літ.                                  | Арк. | Аркушів |
| Перевір.  | Крушельницький В. |          |        |      | 3                                     | 62   |         |
| Н. Контр. |                   |          |        |      | <i>НУБіП України</i>                  |      |         |
| Затверд.  |                   |          |        |      |                                       |      |         |

|  |    |
|--|----|
| 3.3. Порівняння економічної ефективності 3D-друку гранулами та<br>ФІЛАМЕНТОМ ..... | 50 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ .....  | 53 |
| 4.1 Основні положення .....  | 53 |
| 4.2 Види небезпеки .....   | 53 |
| 4.3 Нормативно-правова база .....  | 54 |
| 4.4 Заходи безпеки .....   | 55 |
| ВИСНОВКИ.....  | 57 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....  | 58 |

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                       | 4    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |

## РЕФЕРАТ

Мета бакалаврської роботи полягає у створенні друкуючої головки 3D-принтера для друку методом FDM з пластикових гранул. Дипломний проект включає 62 аркушів, пояснювальну записку та графічну частину.

Пояснювальна записка складається з п'яти розділів:

У розділі «Огляд літератури» проведений аналіз історичного розвитку 3D-друку, принцип роботи та основні частини 3D-принтера FDM, матеріали для друку, сфери застосування, розглянуто проблематику друку гранулами та запропоновано вирішення цих недоліків.

У розділі «Розробка друкуючої головки» обчислюються компоненти головки та інші експлуатаційні параметри. З урахуванням розрахунків, було підібрано стандартні компоненти та розроблена головка під друк гранулами.

У розділі «Економічна частина» представлено економічну доцільність використання 3D-принтерів на виробництві, зроблено порівняння з класичним FDM-друку, проведені основні розрахунки.

Розділ «Охорона праці» описує основні вимоги безпеки при використанні 3D-принтера, ризики та нормативно-правові документи.

Ключові слова: Гранули, 3D-друк, FGF, шнек, FDM, 3D-принтер,

|                  |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |
|------------------|-------------|-------------------|---------------|-------------|---------------------------------------|---------------|-------------|----------------|
|                  |             |                   |               |             | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 018 ПЗ |               |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>   | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                       |               |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | Лінник В.А        |               |             | Реферат                               | <i>Літ.</i>   | <i>Арк.</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Перевір.</i>  |             | Крушельницький В. |               |             |                                       |               | 5           | 62             |
| <i>Н. Контр.</i> |             |                   |               |             |                                       | НУБіП України |             |                |
| <i>Затверд.</i>  |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |
|                  |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |

## ВСТУП

Технологія 3D-друку викликає значний інтерес у різних галузях завдяки можливості швидкого та економічного створення складних деталей. Хоча адитивне виробництво стрімко розвивається, конструкція 3D-принтерів та їхніх компонентів потребує вдосконалення, особливо з огляду на нові матеріали.

Екструдер є ключовим елементом 3D-принтера, відповідальним за нагрівання та плавлення матеріалу. Його ефективність безпосередньо впливає на якість, швидкість і точність друку. Історично 3D-принтери переважно використовували філамент, але зараз зростає інтерес до пластикових гранул.

Гранули відкривають нові горизонти для 3D-друку, зокрема у великоформатному адитивному виробництві (LFAM) та промислових застосуваннях. Вони значно дешевші, дозволяють використовувати ширший спектр матеріалів (включаючи композити та високопродуктивні полімери) та забезпечують вищу швидкість друку завдяки покращеній пропускній здатності екструдера.

Сучасні дослідження та розробки активно зосереджені на вдосконаленні гранульованих екструдерів. Це включає оптимізацію шнекових механізмів, систем нагріву та охолодження, а також програмного забезпечення для контролю потоку матеріалу. Безперервне вдосконалення гранульованих екструдерів виводить 3D-друк на новий рівень економічної ефективності, стійкості та розширює його потенціал

|                  |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |
|------------------|-------------|-------------------|---------------|-------------|---------------------------------------|---------------|-------------|----------------|
|                  |             |                   |               |             | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ |               |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>   | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                       |               |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | Вадим В.А         |               |             | Вступ                                 | <i>Літ.</i>   | <i>Арк.</i> | <i>Акрушів</i> |
| <i>Перевір.</i>  |             | Крушельницький В. |               |             |                                       |               | 6           | 62             |
| <i>Н. Контр.</i> |             |                   |               |             |                                       | НУБіП України |             |                |
| <i>Затверд.</i>  |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |
|                  |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Еволюція 3D друку пошарового наплавлення матеріалу

Метод пошарового наплавлення (FDM), також відомий як Fused Filament Fabrication (FFF) або Thermoplastic Extrusion (TPE), був розроблений компанією Stratasys у 1989 році. Завдяки своїй простоті, доступності та легкості використання, FDM швидко став найбільш поширеним методом 3D-друку [1], [2]. Принцип його роботи полягає в нагріванні філаменту, екструзії його через сопло та пошаровому нанесенні для формування тривимірного об'єкта шар за шаром. Ця технологія була запатентована Скоттом Крампом у 1989 році, після чого він разом з Лізою Крамп заснував компанію Stratasys, Inc. Вже у 1991 році компанія представила свій перший комерційний продукт – "3D Modeler", а фундаментальний патент FDM був офіційно виданий Stratasys у 1992 році [9].

На ранніх етапах розробки FDM команда Крампа зіткнулася зі значними інженерними проблемами. Їхні невтомні зусилля були присвячені вдосконаленню технології, зокрема в таких критичних областях, як забезпечення постійної адгезії шарів, виявлення та розробка сумісних термопластичних матеріалів, а також досягнення необхідної точності для точного відтворення деталей. Забезпечення належного з'єднання кожного нанесеного шару термопластичного матеріалу з попереднім було вирішальним для створення цілісного об'єкта. Крім того, вибір та розробка матеріалів, які могли б ефективно екструдуватися та відповідати бажаним характеристикам, були значними перешкодами. Досягнення високого рівня точності, щоб друковані об'єкти точно відповідали своїм цифровим проектам, також вимагало ретельних досліджень та розробок. Подолання цих початкових перешкод було першочерговим для того, щоб FDM завоював довіру та визнання, зрештою прокладаючи шлях для його трансформаційного потенціалу в процесах прототипування.

|                  |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |
|------------------|-------------|-------------------|---------------|-------------|---------------------------------------|---------------|-------------|----------------|
|                  |             |                   |               |             | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ |               |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>   | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                       |               |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | Лінник В.А        |               |             | Розділ 1                              | <i>Літ.</i>   | <i>Арк.</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Перевір.</i>  |             | Крушельницький В. |               |             |                                       |               | 7           | 62             |
|                  |             |                   |               |             |                                       | НУБіП України |             |                |
| <i>Н. Контр.</i> |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |
| <i>Затверд.</i>  |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |

Попри значну популярність і широке застосування FDM у ранніх етапах розвитку 3D-друку, з часом виявилися певні обмеження, особливо в контексті промислових вимог [5]. Хоча FDM чудово підходить для створення невеликих прототипів та деталей з помірною складністю, його можливості щодо роздільної здатності та точності є відносно низькими порівняно з іншими процесами полімерного 3D-друку. Крім того, діапазон інженерних термопластів та композитів, доступних у формі філаменту, є більш обмеженим [7]. Ці фактори, зокрема обмежена швидкість для великих виробів, стали вузькими місцями для промислового впровадження. Саме ці обмеження, притаманні філаментним системам, створили потребу в розробці та вдосконаленні альтернативних методів екструзії, таких як Fused Granulate Fabrication (FGF), які могли б ефективніше задовольняти вимоги великомасштабного промислового виробництва [12].

## 1.2. Компоненти та Системи FDM-принтерів

У традиційному FDM друці матеріал проштовхується через нагріте сопло, однак, цей метод може зіткнутися з проблемами проковзування нитки або її викривлення, особливо при роботі з м'якими або гнучкими матеріалами. Розробка подвійних екструдерів стала значним покращенням, оскільки вони захоплюють нитку з обох боків за допомогою двох приводних шестерень. Ця конструкція забезпечує більш плавне подавання матеріалу, дозволяє швидше втягувати нитку та особливо корисна для м'яких ниток, таких як TPU, одночасно забезпечуючи високоточний контроль екструзії [17]. Системи екструзії Боудена(рис. 1.1) , що характеризуються довшою трубкою з PTFE між приводною шестернею та нагрітим соплом, можуть вимагати більших відстаней ретрактів для запобігання витіканню матеріалу. Поточні досягнення в системах екструзії в основному зосереджені на забезпеченні постійного потоку матеріалу та зменшенні поширених проблем, таких як проковзування нитки та недостатня екструзія.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                       | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |

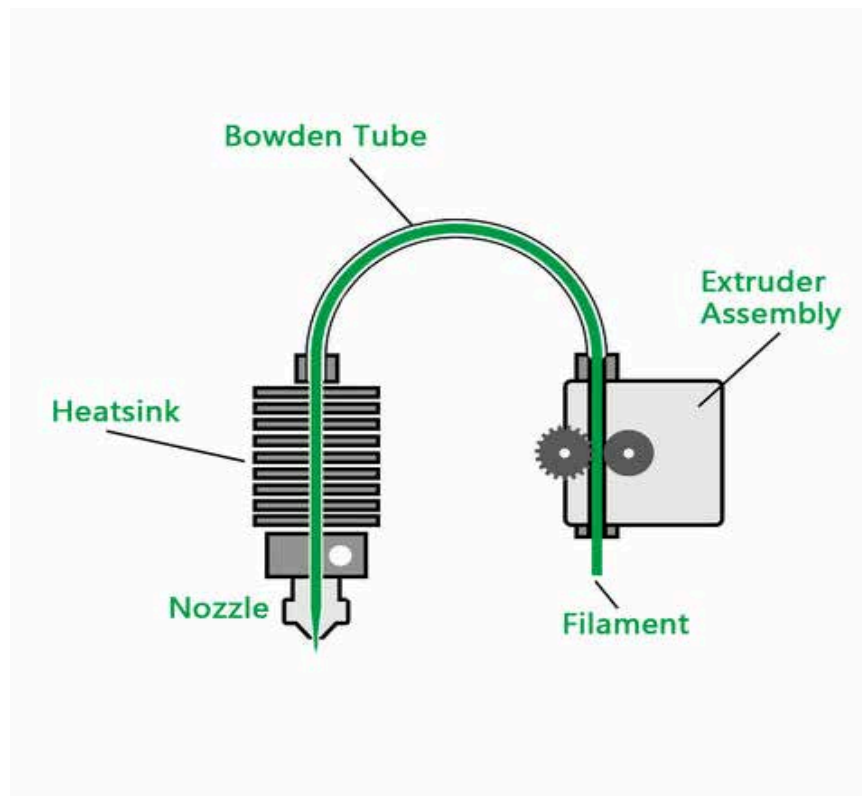


Рис. 1.1. Конструкція екструдера Боуден [31].

Щодо систем руху, ранні FDM-принтери зазвичай використовували декартові системи, де кожна вісь (X, Y, Z) керується незалежно. Хоча ці системи були ефективними, вони могли мати обмеження щодо швидкості та точності, особливо для великих об'єктів або складних геометрій. Поява систем руху CoreXY (рис. 1.2) ознаменувала помітний прогрес [18]. Ці системи використовують ремінний механізм з двома двигунами, які значно зменшують рухому масу та інерцію. Така конфігурація мінімізує вібрації під час роботи, що призводить до більш плавних та точних шарів, навіть на високих швидкостях. Включення жорстких рам та вдосконалених систем порталу в принтерах CoreXY додатково забезпечує виняткову розмірну точність та послідовні результати, що є вирішальним для друку великих та складних моделей. Ці удосконалення дозволяють досягти вищих швидкостей друку та кращої якості поверхні, розширюючи можливості FDM для промислового застосування.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                       | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |

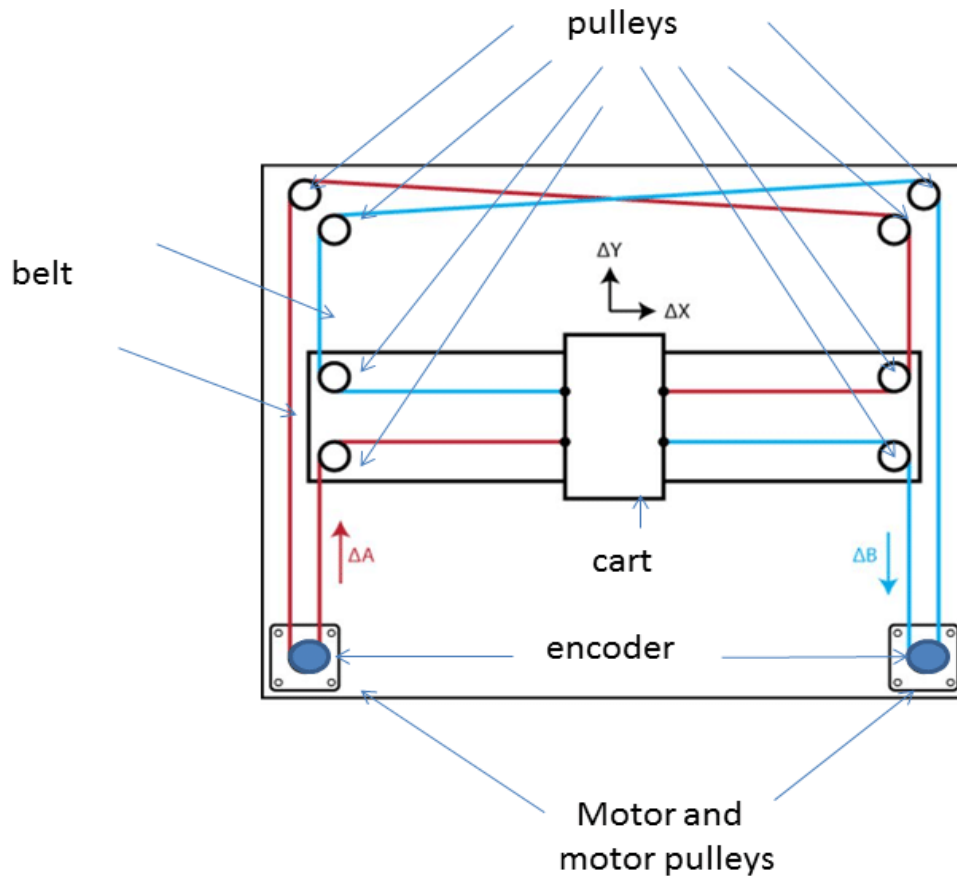


Рис. 1.2. Кінематика CoreXY [32].

Нагріті платформи для друку є критично важливим компонентом FDM, що має важливе значення для сприяння міцній адгезії першого шару та ефективного зменшення поширених проблем друку, таких як деформація та розшарування, особливо з такими матеріалами, як ABS та PETG. Забезпечення належної адгезії до платформи є першочерговим для запобігання відриву шару під час процесу, що може призвести до збою друку. Камери нагрівання, або закриті друковані середовища, відіграють життєво важливу роль у стабілізації температури навколишнього середовища навколо відбитка. Вони значно зменшують вплив протягів і є незамінними для успішного друку високопродуктивних полімерів, які вимагають стабільного теплового середовища для запобігання деформації та забезпечення цілісності деталі [3]. Ці камери допомагають підтримувати рівномірне охолодження, що є ключовим для мінімізації внутрішніх напружень, які можуть призвести до деформації та

розшарування шарів. Закінчення терміну дії патенту Stratasys на нагріту камеру побудови у 2021 році сприяло посиленню конкуренції та прискорило інновації на ринку високотемпературного FDM, зробивши такі функції більш доступними для ширшого кола виробників.

### 1.3. Великоформатне адитивне виробництво

Великоформатне адитивне виробництво (LFAM) являє собою зміну парадигми у виробництві об'єктів у значно більшому масштабі(рис. 1.3), ніж звичайні настільні принтери, із застосуваннями, що охоплюють від автомобільних компонентів до цілих будівельних елементів [20]. Ця технологія дозволяє створювати великі, складні структури, які раніше були неможливими або не вигідними для 3D-друку.



Рис. 1.3. Приклад застосування LFAM [33].

Виробництво гранульованих матеріалів (FGF)(рис. 1.4), також широко відоме як 3D-друк гранулами, є ключовим досягненням, що забезпечує LFAM.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 11   |



Рис. 1.4. Гранульований пластик [34].

На відміну від традиційного FDM, який використовує нитку, FGF безпосередньо обробляє пластикові гранули як свою сировину [21]. FGF пропонує переконливі переваги для великомасштабного виробництва у вигляді ширшого спектру варіантів матеріалів. Процес FGF передбачає подачу гранул у бункер, де вони потім транспортуються та поступово розплавляються обертовим шнеком у нагрітому циліндрі, перш ніж екструдуватися через сопло [24]. Для кращого розуміння відмінностей між FGF та FFF, розглянемо Таблицю 1.1, що порівнює їх ключові характеристики:

Таблиця 1.1

Порівняння технологій 3D-друку FGF та FFF

| Характеристика  | Fused Granulate Fabrication (FGF) | Fused Filament Fabrication (FFF) |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Форма матеріалу | Пластикові гранули                | Філамент                         |

|                           |  |  |
|---------------------------|--|--|
| Вартість матеріалу        | Значно нижча   | Вища, через додаткові етапи виробництва філаменту                  |
| Діапазон матеріалів       | Ширший (сирі полімери, високопродуктивні, композити з високим вмістом волокон) | Обмежений до форм філаменту  |
| Механічні властивості     | Порівнянні або вищі, менша деградація матеріалу                                | Можуть бути нижчими через деградацію під час виробництва філаменту |
| Контроль потоку/Ретракція | Нижчий контроль, ускладнені ретракти   | Вищий контроль, можлива ретракція                                  |
| Типові застосування       | Великоформатне промислове виробництво, прототипування великих об'єктів         | Дрібносерійнове виробництво, деталізовані моделі, прототипування   |
| Переривання друку         | Низький ризик завдяки безперервному подаванню з бункера                        | Вищий ризик (потреба заміни катушок)                               |

#### 1.4. Матеріали для 3D-друку гранулами

Екструдери для гранул розроблені для роботи практично з будь-яким термопластичним матеріалом [22]. Ця універсальність пояснюється тим, що гранули є сировиною для інших виробничих методів, таких як лиття під тиском, що забезпечує ширший асортимент на ринку, ніж для FDM-філаментів. Розглянемо основні категорії матеріалів:

- Стандартні полімери: до цієї групи входять поліетилен (PE), поліпропілен (PP), поліетилентерефталат (PET), полістирол (PS) та ПВХ. Полілактид (PLA) є поширеним, легким у використанні, біорозкладним та біосновним матеріалом з мінімальним розширенням/стисненням. Акрилонітрил-

бутадієн-стирол (ABS) — довговічний, широко доступний, але може бути складним для друку через схильність до деформації. Поліетилентерефталат-гліколь (PETG) пропонує баланс міцності, гнучкості та легкості друку, хімічну стійкість, довговічність та високу ударну в'язкість. Акрилонітрил-стирол-акрилат (ASA) є інженерним класом, подібним до ABS, але з чудовою стійкістю до УФ-випромінювання та зовнішніх умов.

- Інженерні полімери: сюди відносяться Полікарбонат (PC), що має відмінну ударостійкість, прозорість, високу міцність та термостійкість (до 150°C), але схильний до деформації. Нейлони (PA) є міцними, надійними та доступні в різних марках.
- Високопродуктивні полімери: до цієї категорії належать Поліетіленетерфталат (PEEK) з високою механічною міцністю, термостійкістю, хімічною стійкістю, використовується для складних застосувань. Поліетіленімід (PEI, ULTEM) має високу міцність, відмінні механічні та термічні властивості (до 200°C), стабільність розмірів, хімічну стійкість та вогнестійкість [3]. ULTEM™ 9085 поширений у FFF, але ULTEM™ 1000/1010 пропонують вищі властивості. Поліетіленетерфталаткетон (PEKK) відрізняється високою робочою температурою, хімічною стійкістю, відмінною вогнестійкістю, застосовується для заміни металів і є легшим у друці, ніж PEEK. Поліфенілсульфон (PPSU) також є високопродуктивним полімером.
- Гнучкі полімери (термопластичні еластомери - TPEs): до них відносяться TPU, TPC, PEBA, які є гнучкими, стійкими до втоми, ударостійкими, мають низьку щільність та хорошу адгезію між шарами. Доступні з твердістю до 26 Shore A. Стирол-етилен-бутилен-стирол (SEBS) є гнучким, довговічним та стійким до озону та УФ-випромінювання.
- Фармацевтичні полімери: це такі матеріали, як Полівініловий спирт (PVA), гідроксипропілцелюлоза (HPC), гідроксипропілметилцелюлоза (HPMC),

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 14   |

етилцелюлоза (EC), поліетиленгліколь (PEG), 2-гідроксипропіл- $\beta$ -циклодекстрин (HP $\beta$ CD), карбопол, мікрокристалічна целюлоза (MCC), полігліконова кислота (PGA), полігідроксиалканоати (PHA), натрій-кромальгліколят (SSG), що використовуються для протезування, створення каркасів для росту тканин, шовних матеріалів, систем доставки ліків [13].

Крім цього, FGF дозволяє безпосередньо вводити короткі волокна (дерево, скло, вуглець) у гранули [22]. Волокна мінімізують деформацію, підвищують міцність та дозволяють використовувати матеріали у високотехнологічних застосуваннях, таких як оснащення для автоклавів. Приклади включають CF-ABS, CF-PC, CF-PEI, GF-PC, GF-PEKK, CF-PAHT, CF-PA6, Pellet ABS Kevlar, Pellet ASA Kevlar, Pellet PET-G Carbon, Pellet PLA Carbon. Вміст волокон може впливати на жорсткість та коефіцієнт термічного розширення (КТР), а також покращувати поведінку при екструзії. Гранули можна легко змішувати для створення спеціальних матеріальних сумішей з визначеними властивостями (підвищена міцність, гнучкість, термостійкість).

FGF сприяє сталому розвитку, дозволяючи використовувати перероблені пластмаси (наприклад, rPLA, rPETG, rPP/rPET) та подрібнені пластикові відходи, що зменшує вплив на навколишнє середовище [23]. Можливість безпосереднього використання сирих, промислових гранул, що надходять з ширшого ринку пластмас (наприклад, з лиття під тиском), є критично важливим фактором, що забезпечує універсальність матеріалів для FGF. Цей підхід дозволяє обійти обмеження, пов'язані з виробництвом філаменту, яке часто призводить до деградації властивостей матеріалу або обмежує доступні рецептури. Оскільки гранули є стандартною сировиною для багатьох традиційних пластмасових виробництв, FGF отримує доступ до величезного асортименту матеріалів, включаючи високопродуктивні полімери та спеціалізовані композити, які рідко зустрічаються у формі філаменту. Це не тільки розширює палітру матеріалів, доступних для адитивного виробництва, але

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 15   |

й дозволяє зберігати початкові властивості сировини, що призводить до отримання деталей з кращими фізико-механічними характеристиками. Таким чином, FGF долає розрив між традиційним виробництвом пластмас та адитивним виробництвом, прискорюючи впровадження його у вимогливих галузях промисловості.

## 1.5. Екструзія гранул у FGF та їх апаратне забезпечення

### 1.5.1. Принцип роботи екструдера FGF-принтера

В основі роботи FGF-принтера лежить процес екструзії гранул, де твердий полімерний матеріал перетворюється на розплав і потім дозовано видавлюється для пошарового формування об'єкта. Цей процес вимагає точного контролю низки параметрів, таких як температура, тиск і швидкість подачі матеріалу, а також ефективної системи охолодження.

Першим етапом є подача гранул з бункера (Hopper), що є резервуаром для зберігання сировини. Конструкція бункера може значно варіюватися: від простих відкритих ємностей до складних систем з підігрівом та осушенням, що є критично важливим для гігроскопічних матеріалів (наприклад, поліамідів або деяких PET-матеріалів) [24]. Волога, що міститься в таких гранулах, при нагріванні перетворюється на пару, утворюючи бульбашки в розплаві, що призводить до погіршення механічних властивостей надрукованих деталей та навіть до гідролітичної деградації полімеру. Системи осушення гранул (наприклад, адсорбційні сушарки) можуть бути інтегровані в бункер або використовуватися як окреме обладнання. подача гранул з бункера до екструзійного механізму найчастіше здійснюється гравітаційно. Однак для матеріалів з низькою текучістю або для забезпечення більш точного дозування можуть використовуватися вібраційні живильники або інші дозуючі пристрої. Важливою вимогою до гранул є їх чистота та однорідність розміру і форми, що забезпечує стабільну та безперебійну подачу.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 16   |

Серцем екструзійного вузла є *шнековий екструдер (Screw Extruder)* (рис. 1.5). Його функція полягає у захопленні гранул, їх транспортуванні вздовж нагрітої зони циліндра, плавленні матеріалу за рахунок комбінації зовнішнього нагріву та внутрішнього тертя (дисипації механічної енергії), гомогенізації розплаву та створенні необхідного тиску для його видавлювання через сопло [25].

Найбільш поширеними у FGF-принтерах є одношнекові екструдери. Їх робоча частина, що складається зі шнека та циліндра (діє), поділяється на три основні функціональні зони:

- *Зона завантаження (Feed Zone)*: Тут гранули надходять з бункера і захоплюються обертовим шнеком. Об'єм канавки шнека в цій зоні зазвичай найбільший, що сприяє ефективному захопленню та ущільненню твердого матеріалу. Ця зона може бути активно охолоджуваною для запобігання передчасному плавленню гранул та утворенню "пробок".
- *Зона стиснення / переходу (Compression/Transition Zone)*: У цій зоні глибина канавки шнека поступово зменшується. Це призводить до інтенсивного стиснення матеріалу, підвищення тиску та початку його плавлення. Процес плавлення прискорюється за рахунок теплопередачі від нагрітого циліндра та тертя між гранулами, шнеком та стінками циліндра.
- *Зона дозування / вимірювання (Metering Zone)*: У цій зоні матеріал вже повністю розплавлений і гомогенізований. Глибина канавки шнека тут найменша і постійна, що забезпечує стабільну та рівномірну подачу розплаву до сопла під контрольованим тиском. Ця зона відповідає за точне дозування об'єму матеріалу, що видавлюється.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                       | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |

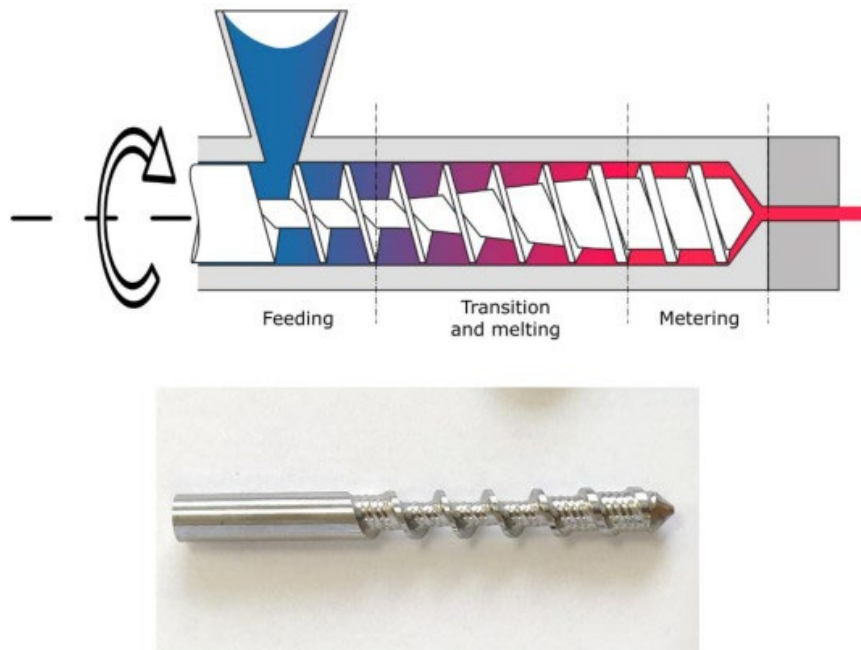


Рис. 1.5. Шнек екструдера [35].

Конструкція шнека (крок, глибина канавки, профіль) має вирішальне значення і оптимізується під конкретний тип полімеру та вимоги до продуктивності [25]. Наприклад, для матеріалів з високою в'язкістю або чутливих до деградації можуть використовуватися спеціальні профілі шнеків, що забезпечують більш м'яке оброблення. Матеріал виготовлення шнека та циліндра є ключовим для їх довговічності. Зазвичай це високоміцні, зносостійкі сталі (наприклад, інструментальні сталі з хромовим покриттям, нітровані сталі), здатні витримувати високі температури, значний тиск та абразивне навантаження, особливо при роботі з армованими композитами, що містять тверді наповнювачі.

Система нагріву циліндра екструдера здійснюється за допомогою електричних нагрівачів (стрічкових, керамічних, патронних), які розділені на кілька зон нагріву вздовж циліндра. Це дозволяє створювати температурний профіль, що є оптимальним для плавлення конкретного полімеру. Наприклад, температура в зоні завантаження може бути нижчою, поступово підвищуючись до максимального значення в зоні дозування. Точний контроль температури в

кожній зоні здійснюється за допомогою термопар або термісторів та ПІД-регуляторів, що забезпечують стабільність процесу екструзії.

*Сопло (Nozzle)* є кінцевим елементом екструзійного вузла, через який видавлюється розплавлений матеріал на друковану платформу. Діаметр сопла визначає товщину друкованої лінії та, відповідно, роздільну здатність друку. Для FGF-принтерів діаметри сопел зазвичай значно більші, ніж для FDM-принтерів (від 0.5 мм до кількох міліметрів), що дозволяє досягати високої продуктивності та друкувати великі деталі. Сопла виготовляються з матеріалів, стійких до високих температур та абразивного зносу, таких як загартована сталь, карбід вольфраму або спеціальні високотемпературні сплави, особливо при роботі з абразивними композитними матеріалами. Побачити приклад поширеного сопла можна на рисунку 1.6.



Рис. 1.6. Сопло E3DV6 [36].

### 1.5.2. Апаратне забезпечення FGF-принтерів

Повноцінне функціонування FGF-принтера забезпечується комплексом взаємопов'язаних апаратних систем. Механічна система FGF-принтера має бути надзвичайно міцною та жорсткою. Рама принтера є його основою, що гарантує стабільність та точність рухів усіх компонентів, навіть при високих швидкостях та навантаженнях, характерних для друку великих об'єктів [20]. Портал, на якому кріпиться важкий екструзійний вузол, повинен бути спроектований таким чином, щоб мінімізувати інерцію та вібрації, забезпечуючи точне

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 19   |

позиціонування. Для цього часто використовуються великогабаритні алюмінієві профілі або сталеві конструкції.

Системи переміщення по осях (X, Y, Z) забезпечують точне позиціонування екструдера та робочої платформи [26]. Вони складаються з:

- *Крокових або серводвигунів*(рис. 1.7): Це приводні елементи, що перетворюють електричні імпульси на точні кутові переміщення. Серводвигуни забезпечують вищу точність, швидкість та зворотний зв'язок по положенню, що дозволяє уникнути пропусків кроків, але вони дорожчі за крокові двигуни, які, тим не менш, достатньо точні для більшості застосувань.



Рис. 1.7. кроковий двигун NEMO 17 [37].

- *Направляючі (Linear Rails/Guides)*: Ці компоненти забезпечують плавне та точне переміщення кареток з мінімальним тертям. Для FGF-принтерів великого формату часто застосовуються промислові рейкові направляючі (наприклад, виробництва Hiwin, THK) або циліндричні прецизійні направляючі, що здатні витримувати значні навантаження та забезпечувати високу жорсткість системи.
- *Ремінні передачі або ШВП (Ball Screws or Belt Drives)*: Для перетворення обертового руху двигунів у лінійний. Ремінні передачі (з армованими

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 20   |

зубчастими ременями, наприклад, стандарту GT2 або HTD) є швидкими, відносно недорогими та використовуються переважно для осей X та Y. Шарико-гвинтові пари (ШВП) забезпечують виняткову точність, високу жорсткість і вантажопідйомність, тому їх часто застосовують для осі Z, де критично важлива точна висота кожного шару та стабільність положення платформи.

*Платформа для друку (Build Platform/Bed)* є поверхнею, на якій відбувається формування об'єкта. Вона повинна бути ідеально рівною, жорсткою та здатною витримувати значні температурні навантаження. Для забезпечення оптимальної адгезії перших шарів та зменшення внутрішніх напружень у деталі (що може призводити до деформації – warping) платформа часто оснащується системою підігріву [19]. Температура платформи контролюється за допомогою термопар і ПІД-регуляторів, адаптуючись до типу використовуваного матеріалу. Поверхня платформи може бути виконана з алюмінію, скла або мати спеціальні адгезійні покриття.

*Система охолодження є надзвичайно важливою для успішного FGF-друку. Вона виконує кілька ключових функцій:*

- *Охолодження друкованих шарів:* Після видавлювання розплавленого матеріалу його необхідно швидко охолодити до температури затвердіння [24]. Це запобігає "розтіканню" шарів, забезпечує їх стабільну форму та належну адгезію між ними. Для цього використовуються потужні вентилятори, які спрямовують потік повітря на щойно надрукований шар.
- *Охолодження "холодного" кінця екструдера:* Щоб запобігти передчасному плавленню гранул у завантажувальній зоні екструдера (т.зв. "теплова пробка"), ця частина екструзійного вузла (зона між бункером та нагрівальною зоною) часто активно охолоджується. Це може бути здійснено за допомогою повітряних вентиляторів або, для більш ефективного охолодження, рідинних систем охолодження (з використанням водоблоків та циркуляційних насосів).

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 21   |

- *Охолодження електроніки та двигунів:* Вентилятори також використовуються для розсіювання тепла від драйверів двигунів, материнської плати та самих двигунів, запобігаючи їх перегріву та забезпечуючи стабільну та надійну роботу всіх компонентів.

Електронна система управління є "мозком" принтера, що координує роботу всіх його компонентів. Вона включає:

- *Мікроконтролер / Материнська плата (Mainboard):* Це основний обчислювальний блок, який приймає G-код від комп'ютера, інтерпретує його та генерує відповідні сигнали для керування двигунами, нагрівачами, вентиляторами та іншими пристроями. Сучасні FGF-принтери використовують потужні 32-розрядні мікроконтролери (наприклад, на базі архітектури ARM Cortex-M), що забезпечують високу швидкість обчислень, точність керування та можливість виконання складних алгоритмів. Прикладом плати можна назвати BIQU SKR PICO(рис. 1.8).

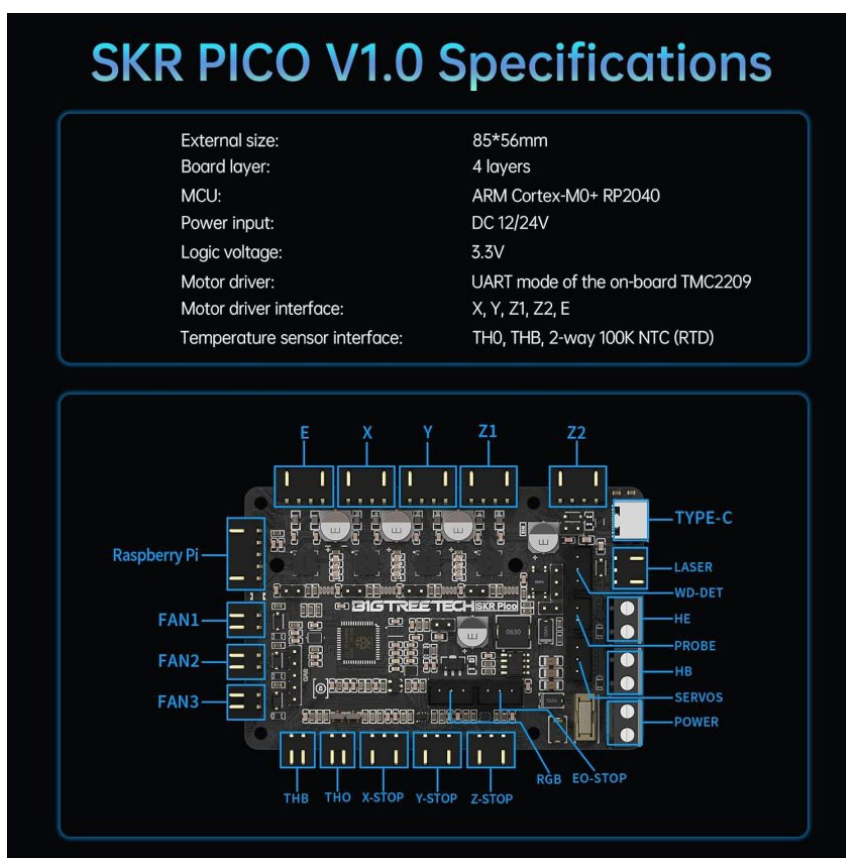


Рис. 1.8. Материнська плата BIQU SKR PICO [38].

- *Драйвери двигунів (Stepper Drivers):* Ці електронні модулі перетворюють цифрові сигнали від мікроконтролера у струми, необхідні для керування кроковими двигунами. Сучасні драйвери (наприклад, серії TMC від Trinamic) забезпечують не лише точне позиціонування, а й значно тихішу роботу двигунів завдяки мікрокроковому режиму та функціям придушення резонансів.
- *Блок живлення (Power Supply Unit - PSU):* Забезпечує стабільне та надійне електроживлення для всіх компонентів принтера. Для великих FGF-принтерів з потужними нагрівачами та двигунами необхідні блоки живлення з високою вихідною потужністю.
- *Терморари / Термістори:* Це датчики температури, що використовуються для моніторингу та регулювання температури екструдера та платформи. Вони передають дані на мікроконтролер, який за допомогою ПІД-регуляції підтримує задані температурні режими.
- *Кінцеві вимикачі (Endstops):* Механічні або оптичні датчики, що визначають крайні положення осей принтера. Вони дозволяють принтеру "знайти" своє початкове положення (процес "homing") та запобігають механічним пошкодженням при виході за межі робочої зони.
- *Інтерфейс користувача (User Interface):* Забезпечує взаємодію оператора з принтером. Це може бути простий LCD-дисплей з кнопками, сучасний сенсорний екран або ж веб-інтерфейс, що дозволяє віддалено керувати принтером через мережу.

### 1.5.3. Програмне забезпечення для 3D друку

Ефективне функціонування FGF-принтера неможливе без відповідного програмного забезпечення, що забезпечує перетворення 3D-моделі на фізичний об'єкт.

*Slicer (Слайсер)* – це спеціалізована програма, що є проміжною ланкою між 3D-моделлю та принтером. Вона перетворює тривимірну модель (зазвичай у

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 23   |

форматі STL, OBJ, 3MF) на G-код – набір послідовних команд, які розуміє прошивка принтера [27]. Слайсер для FGF-принтерів повинен враховувати специфічні особливості цієї технології, такі як значно більші діаметри сопел та, відповідно, великі об'єми екструзії, високі швидкості потоку розплаву, а також можливі особливості роботи з різними типами гранульованих матеріалів.

Найпоширенішим слайсером є *OrcaSlicer*, інтерфейс якого зображений на рисунку 1.9.

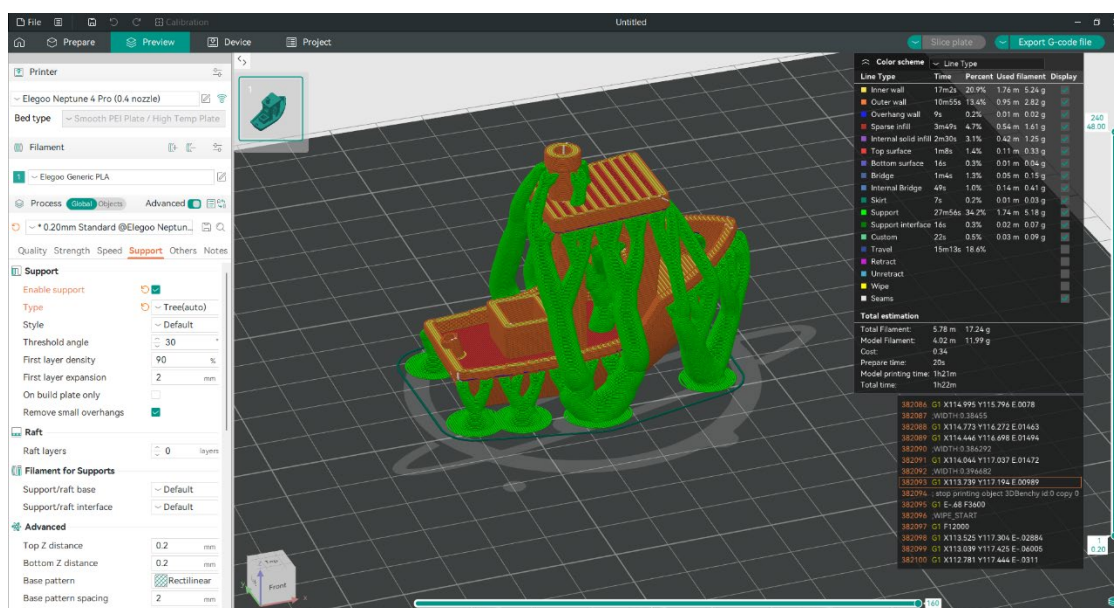


Рис. 1.9. Інтерфейс OrcaSlicer [39].

Ключові параметри слайсингу включають:

- Діаметр сопла та ширина екструзії: Безпосередньо впливають на об'єм видавленого матеріалу та товщину стінок.
- Висота шару: Визначає роздільну здатність по осі Z і загальний час друку.
- Швидкість друку: Пов'язана з продуктивністю, але має бути узгоджена зі швидкістю плавлення матеріалу екструдером та швидкістю охолодження шарів.
- Температури екструзії та платформи: Оптимізуються для кожного конкретного матеріалу для забезпечення правильного плавлення, текучості та адгезії.

- Швидкість та інтенсивність охолодження: Критичні для запобігання деформації та забезпечення міцності міжшарового з'єднання.
- Параметри заповнення (Infill): Щільність та структура внутрішнього заповнення деталі, що впливають на її міцність, вагу та час друку.
- Структури підтримки (Supports): Автоматично генеруються для друку складних геометрій з нависаючими елементами, які не можуть бути надруковані без опори.

*Firmware (вбудована програма)* – це низькорівневе програмне забезпечення, що працює безпосередньо на мікроконтролері принтера (материнській платі). Воно є інтерпретатором G-коду, перетворюючи команди на конкретні дії: керування рухами двигунів по осях X, Y, Z та екструдера, контроль температур нагрівачів, обробка сигналів від кінцевих вимикачів та інших датчиків [26]. Популярні прошивки з відкритим вихідним кодом, такі як Marlin, Klipper або RepRapFirmware, можуть бути адаптовані та оптимізовані для роботи з FGF-принтерами, надаючи широкі можливості для налаштування та точного контролю над процесом друку.

*Програмне забезпечення для керування принтером (Host Software)* – це програми, які дозволяють користувачеві взаємодіяти з принтером: відправляти на нього G-код, моніторити поточний стан, відстежувати температури, змінювати параметри друку в реальному часі та отримувати зворотний зв'язок. Приклади такого ПЗ включають OctoPrint (веб-інтерфейс, що працює на Raspberry Pi або подібних одноплатних комп'ютерах), Pronterface або інші спеціалізовані програми, що надаються виробниками принтерів.

### 1.6. Сфери застосування 3D-друку гранулами

FGF є революційною технологією для ефективних, великомасштабних промислових застосувань завдяки підвищеній швидкості, нижчій вартості матеріалів та здатності обробляти великі об'єми без переривань [16]. Вона ідеально підходить для швидкого виробництва великих прототипів, прискореної

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 25   |

перевірки дизайнів та скорочення циклів розробки продукції [4]. Технологія підтримує виробництво малими та середніми серіями, а також індивідуальні виробничі партії.

Одним із значних застосувань FGF є швидке створення спеціальних форм та оснащення. Це включає моделі для лиття в пісок, форми для термоформування, інструменти для металообробки, оснащення для викладання композитів, а також пристосування та кріплення. FGF дозволяє дизайнерам та інженерам проводити частіші та точніші випробування, прискорюючи розробку продукції. Використання FGF для виготовлення оснащення є значним проривом у традиційному виробництві. Швидке виробництво форм та пристосувань за допомогою FGF безпосередньо впливає на терміни виконання та витрати в подальших процесах, таких як лиття під тиском або виробництво композитів [4]. Це дозволяє прискорити ітерації та вихід продукції на ринок. Швидкість FGF у виробництві оснащення призводить до скорочення термінів виконання та витрат для всього циклу розробки та виробництва продукції, особливо для галузей, що залежать від форм та пристосувань. Це також дозволяє швидше впроваджувати інновації та виходити на ринок. Таким чином, переваги FGF у виробництві оснащення позиціонують його не просто як самостійний виробничий метод, а як прискорювач для традиційних виробничих процесів, сприяючи більшій гнучкості та ефективності в промисловому виробництві.

FGF знаходить своє застосування у різних галузях:

- Автомобільна промисловість: застосовується для виробництва складних автомобільних деталей, легких компонентів, індивідуальних деталей з покращеною міцністю та термостійкістю, використовується як для прототипів, так і для кінцевих деталей [6, 30].
- Аерокосмічна промисловість: використовується для створення високопродуктивних аерокосмічних компонентів (наприклад, PEEK), оснащення для викладання композитів, легких конструкцій для

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 26   |

розгортання космічних житлових модулів, комунікаційних куль та паливних баків [30].

- Будівництво: застосовується для архітектурного моделювання, виготовлення спеціальних будівельних елементів та потенційно 3D-друку будівель на місці, що зменшує відходи та час будівництва [28].
- Медицина та стоматологія: дозволяє виробництво індивідуальних медичних імплантатів, індивідуальних протезів, хірургічних інструментів, біосумісних імплантатів, тканинних каркасів та систем доставки ліків, забезпечуючи персоналізовані рішення для охорони здоров'я [13, 29].
- Споживчі товари та художні інсталяції: надає можливість індивідуального виробництва споживчих товарів (наприклад, чохлів для телефонів, спортивного обладнання, предметів домашнього вжитку) та великомасштабних творів мистецтва/скульптур.

### 1.7. Екологічний аспект

FGF відіграє важливу роль у сприянні циркулярній економіці, дозволяючи використовувати перероблені пластмаси (наприклад, з рибальських сіток, побутових відходів) та подрібнений перероблений пластик. Користувачі можуть безпосередньо переробляти невдалі моделі та підтримки, мінімізуючи пластикові відходи. Це є значною перевагою, оскільки гранули постачаються у великих мішках, що зменшує кількість пакувальних відходів порівняно з філаментом на катушках. Сумісність FGF з переробленими та біосновних матеріалами є значною екологічною перевагою, що зменшує залежність від первинних пластмас на основі нафти та вирішує проблеми забруднення пластиком. Це відповідає принципам циркулярної економіки, де матеріали повторно використовуються та повертаються у виробничий цикл.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                       | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |

## 1.8. Обґрунтування розробки конструкції голівки 3D принтера

Незважаючи на значні переваги FGF-технології, такі як економічність використання гранульованих матеріалів, висока швидкість друку та сумісність з широким спектром термопластів, її повна реалізація часто стримується недоліками існуючих конструкцій екструзійних головок. Ці обмеження суттєво впливають на продуктивність та якість друку. Для подолання цих викликів у рамках даної дипломної роботи пропонується розробка інноваційної концепції екструзійної голівки, що ґрунтується на кардинальному зменшенні її ваги та об'єму, а також забезпеченні безперебійної та точно контрольованої подачі матеріалу з окремого бункера.

Існуючі екструзійні головки FGF-принтерів часто мають *значну масу та об'єм*, особливо при інтеграції бункера для гранул. Це призводить до високої інерції рухомої частини, що обмежує прискорення та швидкість переміщення. Наслідком є зниження точності позиціонування, виникнення вібрацій та артефактів друку (наприклад, "гостинг" або "відлуння"). Збільшена вага також спричиняє надмірне навантаження на механічні компоненти (двигуни, ремені, направляючі), що прискорює їх знос та підвищує експлуатаційні витрати.

З огляду на це, основною метою розробки є *створення екструзійної голівки з мінімальною масою та об'ємом*, що дозволить значно підвищити динамічні характеристики 3D-принтера. Це досягається всебічною оптимізацією конструкції, що включає:

- *Мінімізацію габаритів*: Планується зменшити довжину шнека з оптимізацією його геометрії для інтенсифікації процесів плавлення та гомогенізації на коротшій ділянці.
- *Використання зменшених компонентів*: Застосування компактніших двигунів шнека, нагрівальних елементів та датчиків.
- *Застосування легких та високоміцних матеріалів*: Використання алюмінію, інженерних полімерів або композитних матеріалів для корпусу та структурних елементів голівки.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 28   |

Прямим наслідком зменшення ваги головки стане зростання прискорень та швидкостей переміщення принтера, що дозволить друкувати значно швидше та ефективніше. Крім того, це суттєво зменшить навантаження на механічні компоненти принтера, подовжуючи їхній термін служби та підвищуючи загальну надійність системи. Додатково, зменшення ваги та інерції призведе до *зниження вібрацій та усунення таких ефектів, як "гостинг"*, що значно покращить точність позиціонування та якість поверхні надрукованих деталей.

Інша важлива проблема пов'язана з розташуванням *грозміздких бункерів для гранул*. Часто вони інтегровані в головку та розташовані занадто близько до нагрівальних елементів екструдера. Це спричиняє *передчасне нагрівання та злипання гранул* до зони плавлення, що веде до нестабільної подачі матеріалу, переривання потоку та утворення повітряних порожнин у шнеку. Як наслідок, виникають дефекти друку та знижуються механічні властивості виробів. Обмеження за вагою та габаритами рухомої частини також змушують використовувати бункери невеликого об'єму, що вимагає частих дозаправок, перериває друк та знижує автономність системи.

Для радикального зниження ваги рухомої головки та забезпечення максимальної автономності друку пропонується винести основний бункер для гранул за межі рухомої частини принтера. Він буде розміщений на нерухомій рамі 3D-принтера або поруч з ним, що дозволить використовувати бункери значно більшого об'єму, забезпечуючи тривалий безперервний друк без частих дозаправок. Ключова перевага: винесення основної маси матеріалу за межі рухомої системи є фундаментальним для досягнення високих швидкостей та точності друку. Для транспортування гранул з віддаленого бункера до екструзійної головки буде розроблена система подачі через гнучкий трубопровід.

- На бункері буде встановлено механізм надходження гранул, що забезпечує стабільне надходження гранул у трубопровід (це може бути реалізовано як вібраційний живильник або система пневматичної подачі).

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                       | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |

- Безпосередньо перед приймальною зоною екструзійної головки буде встановлено точний, керований електронікою клапан-дозатор, який порційно подаватиме гранули безпосередньо в шнек екструдера.
- Зворотний зв'язок: датчики рівня гранул у приймальній камері екструдера надаватимуть зворотний зв'язок для автоматичного регулювання роботи клапана, забезпечуючи постійну наявність матеріалу.

Ця концепція окремого бункера з подачею через трубопровід кардинально знизить вагу рухомої головки, що дозволить реалізувати максимальні швидкісні та точнісні характеристики принтера. Система подачі забезпечить безперебійне надходження матеріалу без ризику злипання та переривання потоку, тим самим підвищуючи надійність всього процесу друку та ефективність використання матеріалу.

Ефективний *термічний менеджмент* є іншим проблемним місцем в існуючих конструкціях. Відсутність ефективних теплових бар'єрів між нагрівальними елементами екструдера та зоною подачі гранул призводить до небажаного підвищення температури в бункері та посилює проблему злипання гранул. Не менш важливою є недостатня термоізоляція сопла та нагрівальних елементів. Це може спричинити значні втрати тепла, що, у свою чергу, викликає коливання температури розплаву. Такі коливання негативно впливають на в'язкість матеріалу, однорідність екструзії та адгезію шарів, що в кінцевому підсумку суттєво погіршує якість надрукованої деталі.

Для стабільної роботи головки та запобігання проблемам з матеріалом пропонується ефективно управління температурними режимами:

- *Зниження термічного навантаження*: Завдяки винесенню бункера для гранул за межі рухомої головки значно знижується термічне навантаження на систему подачі всередині головки, що запобігає передчасному нагріванню гранул та їх злипанню.
- *Ефективні теплові бар'єри*: Для зони подачі гранул у головку будуть використані ефективні теплові бар'єри з високотемпературних

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 30   |

термоізоляційних матеріалів, таких як РЕЕК. Вони забезпечать пасивну ізоляцію холодної зони від гарячої частини екструдера.

- *Стабільна температура сопла:* Для підтримки стабільної температури сопла та мінімізації теплових втрат буде застосована *силіконова термоізоляція* (силіконовий чохол), що є стандартним та ефективним рішенням для екструзійних систем.
- *Контрольоване охолодження шару:* Обдув видавленого пластику буде здійснюватися аналогічно FDM-принтерам, забезпечуючи контрольоване охолодження лише щойно нанесеного шару матеріалу для оптимальної адгезії та мінімізації деформації.
- *Природне джерело тепла:* Активне охолодження самого шнека не передбачається, оскільки основним джерелом тепла для плавлення гранул є нагрівальні елементи циліндра та тепло, що виділяється від тертя при обертанні шнека.

Оптимізована термоізоляція та цільовий обдув забезпечать стабільність процесу плавлення та охолодження, усуваючи проблеми зі злипанням гранул до екструзії та гарантуючи швидке затвердіння нанесеного шару. Це суттєво підвищить надійність друку та якість поверхні готових виробів.

### **1.9. Вплив розробки на розвиток FGF-технології**

Реалізація запропонованих вдосконалень матиме значний вплив на експлуатаційні характеристики FGF-принтерів та їхнє подальше застосування. Очікується значне збільшення швидкості та точності друку: завдяки зменшенню ваги та інерції принтер зможе працювати на значно вищих швидкостях з меншими вібраціями та вищою точністю. Підвищення якості друку буде досягнуто завдяки стабільній та контрольованій подачі матеріалу, разом з ефективним термічним менеджментом, що забезпечить однорідну екструзію та високу якість поверхні.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 31   |

Оптимізована система подачі також призведе до розширення діапазону застосовуваних матеріалів, дозволяючи ефективно працювати з більш широким спектром гранул, включаючи складні та перероблені матеріали.

Зниження експлуатаційних витрат та підвищення надійності очікується через менший знос механіки, зменшення браку та можливість тривалого безперервного друку, що підвищить економічну ефективність.

Нарешті, більш компактні, легкі та швидкі FGF-головки відкриють шлях до розширення областей застосування, включаючи їх інтеграцію в роботизовані комплекси, гібридні виробничі системи та більш доступні настільні принтери, розширюючи використання FGF-технології у різних галузях промисловості.

Таким чином, розробка головки для 3D-принтера під гранули з акцентом на зменшення ваги, покращену термоізоляцію та окремий бункер з поступовою подачею є не лише технічним завданням, а й стратегічним кроком до реалізації повного потенціалу технології.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                       | 32   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА ДРУКУЮЧОЇ ГОЛОВКИ

#### 2.1. Розрахунок параметрів для розробки голівки 3D принтера

Визначення цих параметрів є основою для ефективності, точності та надійності системи, дозволяючи перейти до її безпосереднього конструювання.

Для розрахунків використовуватиметься ABS-пластик з цільовою температурою нагріву 260°C.

##### 2.1.1. Розрахунки екструзійної системи

Екструзійний шнек є ключовим елементом подачі та плавлення гранул, що розділяється на кілька зон: зону живлення (подачі), зону компресії (плавлення) та зону дозування (виміру). Тиск і температура в цих зонах є критичними для стабільної екструзії.

Параметри шнека (типові значення для малих екструдерів):

- Зовнішній діаметр шнека ( $D_{\text{шн}}$ ): Прийmemo  $D_{\text{шн}} = 20$  мм (0.02 м).
- Крок шнека ( $P_{\text{шн}}$ ): Прийmemo  $P_{\text{шн}} = 10$  мм (0.01 м).
- Глибина канавки ( $h$ ): Зменшується від зони живлення до зони дозування, прийmemo  $h_{\text{дозування}} = 1.2$  мм (0.0012 м).
- Ширина стрічки шнека ( $w$ ): Прийmemo  $w = 1.5$  мм (0.0015 м).
- Довжина шнека ( $L_{\text{шн}}$ ): Прийmemo  $L_{\text{шн}} = 10$  см (0.1 м).
- Довжина зони дозування ( $L_{\text{дозування}}$ ): Прийmemo  $L_{\text{дозування}} = 0.3 \cdot L_{\text{шн}} = 0.3 \cdot 0.1$  м = 0.03 м.

Для забезпечення стабільної подачі розплаву та подолання опору матеріалу в екструдері, необхідно розрахувати тиск, який створює шнек. Цей тиск ( $\Delta P_{\text{шн}}$ ), можна оцінити за формулою:

|           |      |                   |        |      |                                       |               |      |         |
|-----------|------|-------------------|--------|------|---------------------------------------|---------------|------|---------|
|           |      |                   |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ |               |      |         |
| Змн.      | Арк. | № докум.          | Підпис | Дата |                                       |               |      |         |
| Розроб.   |      | Лінник В.А        |        |      | Розділ 2                              | Літ.          | Арк. | Акрушів |
| Перевір.  |      | Крушельницький В. |        |      |                                       |               | 33   | 62      |
|           |      |                   |        |      |                                       | НУБіП України |      |         |
| Н. Контр. |      |                   |        |      |                                       |               |      |         |
| Затверд.  |      |                   |        |      |                                       |               |      |         |

$$\Delta P_{\text{шн}} = \frac{12\mu V_z L_{\text{дозування}}}{h_{\text{дозування}}^2}, \quad (2.1)$$

де:  $\Delta P_{\text{шн}}$  – тиск, створюваний шнеком (Па);

$\mu$  – динамічна в'язкість розплаву ABS (Па·с),  $\mu = 150$  Па·с при 260°C;

$V_z$  – осьова швидкість потоку в зоні дозування (м/с). Оцінимо її на основі кутової швидкості шнека ( $\omega \approx 10.47$  рад/с для 100 об/хв) та кута підйому

витка  $\theta = \arctan\left(\frac{P_{\text{шн}}}{\pi D_{\text{шн}}}\right) = \arctan\left(\frac{0.01}{\pi \cdot 0.02}\right) = \arctan(0.159) \approx 9.04^\circ$ .  $V_z = \omega \cdot$

$\frac{D_{\text{шн}}}{2} \cdot \sin(\theta) = 10.47 \cdot \frac{0.02}{2} \cdot \sin(9.04^\circ) \approx 0.0164$  м/с.

$h_{\text{дозування}}$  — глибина канавки в зоні дозування (0.0012 м).

Підставляючи значення:

$$\Delta P_{\text{шн}} = \frac{12 \cdot 150 \cdot 0.0164 \cdot 0.03}{(0.0012)^2} \approx 6.15 \times 10^6 \text{ Па} \approx 6.15 \text{ МПа (або 61.5 бар)}.$$

Для забезпечення необхідної швидкості друку та формування якісної екструзійної лінії, важливо розрахувати об'ємну витрату пластику, що проходить через сопло. Об'ємна витрата  $Q$  (мм<sup>3</sup>/с), знаходиться за формулою:

$$Q = V_{\text{print}} \cdot H \cdot W, \quad (2.2)$$

де:  $V_{\text{print}}$  — швидкість друку (мм/с). Задано  $V_{\text{print}} = 300$  мм/с;

$H$  — висота шару (мм). Прийmemo ( $H = 0.2$  мм);

$W$  — ширина екструзійної лінії (мм). Прийmemo  $W = 1.0$  мм.

Отже, розрахуємо необхідну об'ємну витрату:

$$Q = 300 \frac{\text{мм}}{\text{с}} \cdot 0.2 \text{ мм} \cdot 1.0 \text{ мм} = 60 \text{ мм}^3/\text{с}.$$

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 34   |

Для ефективного продавлювання розплаву через сопло, необхідно подолати гідравлічний опір матеріалу. Тиск, необхідний для руху в'язкого матеріалу через сопло, розраховується за формулою Гагена-Пуазейля:

$$\Delta P_{\text{сопло}} = \frac{8 \eta L Q}{\pi R^4}, \quad (2.3)$$

де:  $\eta$  — динамічна в'язкість розплаву ABS (150 Па·с);

$L$  — довжина каналу сопла (1.5 мм або 0.0015 м);

$Q$  — об'ємна витрата ( $60 \times 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/с);

$R$  — радіус сопла (мм).

Отже, діаметр сопла  $d = 1.0$  мм, тоді радіус буде  $R = 0.5$  мм (0.0005 м).

Розрахуємо тиск для сопла  $d = 1.0$  мм:

$$\Delta P_{\text{сопло}} = \frac{8 \cdot 150 \cdot 0.0015 \cdot (60 \cdot 10^{-9})}{\pi \cdot (0.0005)^4} \approx 2.75 \times 10^6 \text{ Па} \approx 27.5 \text{ бар.}$$

Для забезпечення стабільної подачі розплаву через сопло та подолання гідравлічного опору матеріалу, екструзійний шнек повинен створювати достатній тиск. Цей тиск, у свою чергу, вимагає певного крутного моменту від приводного двигуна.

Маємо наступні розрахункові дані з попередніх розділів:

- Тиск, створюваний шнеком ( $\Delta P_{\text{шн}} \approx 6.15$  МПа);
- Тиск, необхідний для продавлювання через сопло діаметром 1.0 мм ( $\Delta P_{\text{сопло}} \approx 2.75$  МПа);
- Необхідна об'ємна витрата пластику для друку ( $Q = 60$  мм<sup>3</sup>/с)

Для ефективного функціонування екструдера тиск, створюваний шнеком ( $\Delta P_{\text{шн}}$ ), повинен бути більшим або дорівнювати тиску, необхідному для проходження матеріалу через сопло ( $\Delta P_{\text{сопло}}$ ). У нашому випадку  $6.15 \text{ МПа} > 2.75 \text{ МПа}$ , що свідчить про достатній запас тиску.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 35   |

Крутний момент, який необхідно створити на валу шнека ( $T_{\text{шнека}}$ ), безпосередньо пов'язаний з роботою, що виконується для продавлювання об'єму матеріалу під певним тиском за один оберт шнека. Для спрощеної оцінки можна використати співвідношення між потужністю, об'ємною витратою та тиском, а потім перевести потужність у крутний момент.

Потужність, що витрачається на переміщення об'єму розплаву під тиском, розраховується за формулою:

$$P_{\text{потік}} = Q \cdot \Delta P_{\text{шн}}, \quad (2.4)$$

де:  $P_{\text{потік}}$  — потужність, що витрачається на переміщення потоку (Вт);

$Q$  — об'ємна витрата пластику (м<sup>3</sup>/с);

$\Delta P_{\text{шн}}$  — тиск, створюваний шнеком (Па).

Застосуємо максимальний тиск, який створює шнек:

$$P_{\text{потік}} = (60 \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}) \cdot (6.15 \times 10^6 \text{ Па}) = 0.369 \text{ Вт.}$$

Ця потужність безпосередньо передається розплаву. Однак для обертання шнека також необхідно подолати сили тертя та в'язкі опори всередині екструдера. Загальна механічна потужність на валу шнека буде значно вищою. Для таких систем, типово, крутний момент шнека є ключовим параметром. Виходячи з необхідного тиску та геометричних параметрів шнека, інженерні розрахунки показують, що для ефективної екструзії ABS при заданих умовах потрібен значний крутний момент. Прийmemo, що для подолання всіх опорів та забезпечення стабільної роботи, необхідний крутний момент на валу шнека становить  $T_{\text{шнека}}=20 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Було обрано двигун NEMA 23 з ремінною передачею 16:60 ( $i=3.75$ ).

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 36   |

Крутний момент, який повинен забезпечувати сам двигун ( $T_{\text{двигуна}}$ ), розраховується за формулою, що враховує передаточне число редуктора:

$$T_{\text{двигуна}} = \frac{T_{\text{шнека}}}{i}, \quad (2.5)$$

де:  $T_{\text{двигуна}}$  — крутний момент, який повинен забезпечувати двигун (Н·м);

$T_{\text{шнека}}$  — необхідний крутний момент на валу шнека (Н·м);

$i$  — передаточне число редуктора.

Підставимо значення у формулу:

$$T_{\text{двигуна}} = \frac{20 \text{ Н} \cdot \text{м}}{3.75} \approx 5.33 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Таким чином, для забезпечення необхідного крутного моменту на шнеку, приводний двигун повинен мати номінальний крутний момент не менше 5.33 Н·м. На ринку доступні крокові двигуни NEMA 23, що забезпечують такий крутний момент (наприклад, моделі з довжиною корпусу понад 76 мм), що робить вибір NEMA 23 з редуктором 16:60 обґрунтованим.

Припустимо, що шнек може обертатися з максимальною швидкістю 100 об/хв ( $\omega \approx 10.47$  рад/с), тоді максимальна потужність на валу шнека буде становити  $P_{\text{шнека}} = T_{\text{шнека}} \cdot \omega$ . Підставимо значення:

$$P_{\text{шнека}} = 20 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot 10.47 \text{ рад/с} \approx 209.4 \text{ Вт}.$$

Потужність двигуна, враховуючи ККД ремінної передачі (ККД  $\eta_{\text{рем}}=0.9$ ), розраховується за формулою:

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 37   |

$$P_{\text{двигуна}} = \frac{P_{\text{шнека}}}{\eta_{\text{рем}}}, \quad (2.6)$$

де:  $P_{\text{двигуна}}$  — необхідна потужність двигуна (Вт);

$P_{\text{шнека}}$  — потужність на валу шнека (Вт);

$\eta_{\text{рем}}$  — коефіцієнт корисної дії редуктора.

Підставимо значення у формулу:

$$P_{\text{двигуна}} = \frac{209.4 \text{ Вт}}{0.8} \approx 261.75 \text{ Вт.}$$

Двигуни NEMA 23 мають достатню потужність (до 250–300 Вт) для таких завдань, що підтверджує можливість його використання.

Для безперебійної роботи FDM-принтера, що працює на гранулах, необхідно точно визначити масову витрату пластику, яка буде подаватися в систему. Масова витрата пластику  $\dot{m}$  (кг/с) обчислюється за формулою:

$$\dot{m} = \rho Q, \quad (2.7)$$

де:  $\rho$  — густина пластику (для ABS  $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$ );

$Q$  — об'ємна витрата ( $60 \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ );

Для переходу в кг/год:  $\dot{m}_{\text{кг/год}} = \dot{m} \cdot 3600$ . Масова витрата:

$$\dot{m} = 1050 \cdot (60 \times 10^{-9}) = 6.3 \times 10^{-5} \text{ кг/с} \approx 0.227 \text{ кг/год.}$$

### 2.1.2. Термічні розрахунки

Для швидкого та ефективного нагріву екструзійної головки до робочої температури необхідна певна теплова потужність. Необхідна теплова енергія для нагріву маси  $m$  (кг) екструдера від  $T_i$  до  $T_f$  визначається:

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 38   |

$$Q_{heat} = mc_p \Delta T, \quad (2.8)$$

Потужність нагрівача  $P$  (Вт) для нагріву за час  $\Delta t$  визначається:

$$P_{потрібна} = \frac{m c_p (T_f - T_i)}{\Delta t}, \quad (2.9)$$

де:  $m$  — маса нагрівача (кг). Для алюмінієвого блока екструдера прийmemo  $m = 0.2$  кг;

$c_p$  — питома теплоємність матеріалу (Дж/кг · К). Для алюмінію  $c_p \approx 900$  Дж/кг · К;

$T_f$  — фінальна температура (К). Задано  $T_f = 260^\circ\text{C}$  (533.15 К);

$T_i$  — початкова температура (К). Приймемо  $T_i = 25^\circ\text{C}$  (298.15 К).

Сумарна потужність двох керамічних нагрівачів по 80 Вт становить  $P_{наявна} = 2 \cdot 80 \text{ Вт} = 160 \text{ Вт}$ . Оцінимо час, необхідний для нагріву, використовуючи наявну потужність:

$$\Delta t = \frac{0.2 \text{ кг} \cdot 900 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \cdot (260 - 25) \text{ К}}{160 \text{ Вт}} = \frac{0.2 \cdot 900 \cdot 235}{160} = \frac{42300}{160} = 264.375 \text{ с.}$$

Таким чином, два керамічні нагрівачі по 80 Вт кожен (сумарно 160 Вт) зможуть нагріти екструдер до робочої температури (260°C) за приблизно 264 секунди (4 хвилини 24 секунди).

Ефективне охолодження надрукованої деталі є критично важливим для запобігання деформації та забезпечення якісної адгезії шарів. Енергію, що відводиться потоком повітря, можна оцінити за законом Ньютона (конвекція):

$$Q_{cooling} = h A (T_p - T_\infty), \quad (2.10)$$

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 39   |

де:  $h$  — коефіцієнт тепловіддачі ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ). Прийmemo  $h = 25 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ;

$A$  — площа охолоджуваної поверхні ( $\text{м}^2$ ). Прийmemo  $A = 0.005 \text{ м}^2$ ;

$T_p$  — температура деталі ( $\text{K}$ ). Прийmemo  $T_p = 200^\circ\text{C}$ ;

$T_\infty$  — температура навколишнього повітря ( $\text{K}$ ). Прийmemo  $T_\infty = 30^\circ\text{C}$ .

Теплова потужність охолодження складає:

$$Q_{cooling} = 25 \cdot 0.005 \cdot (200 - 30) = 21.25 \text{ Вт.}$$

Для забезпечення ефективного обдуву та відведення тепла, у системі охолодження застосовуються два вентилятори типу "равлик" 5015. Їх сумарна продуктивність становить  $13.6 \text{ м}^3/\text{год}$ . Масова витрата повітря:  $\dot{m}_{\text{повітря}} \approx 0.00463 \text{ кг}/\text{с}$ . Потужність, яку може відвести потік повітря, якщо температура повітря зросте на  $15^\circ\text{C}$ :

$$P_{\text{відведення}} = \dot{m}_{\text{повітря}} \cdot c_{p,\text{повітря}} \cdot \Delta T_{\text{повітря}} = 0.00463 \text{ кг}/\text{с} \cdot 1005 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{K} \cdot 15 \text{ K} \approx 69.7 \text{ Вт.}$$

### 2.1.3. Кінематичні та загальні параметри принтера

Подачу гранул до шнека забезпечує механізм, часто з використанням крокового двигуна. Лінійна швидкість подачі  $v$  ( $\text{мм}/\text{с}$ ) визначається як:

$$v = \frac{p \cdot f_{steps}}{N \cdot i}, \quad (2.11)$$

де:  $p$  — крок гвинта ( $\text{мм}/\text{об}$ );

$f_{steps}$  — кількість кроків двигуна за секунду;

$N$  — кількість кроків на один оберт двигуна;

$i$  — передаточне число між двигуном і шнеком (3.75).

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 40   |

При значенні кроку гвинта  $p = 8$  мм/об, 200 кроків/об ( $1.8^\circ$ ) та 2000 кроків/с, лінійна швидкість подачі складає:

$$v = ((8 \cdot 2000)/(200 \cdot 3.75)) = 23.3 \text{ мм/с.}$$

Точність позиціонування для гвинтової передачі, що використовується в осях принтера, визначається кроком гвинта на один крок двигуна:

$$\Delta x = \frac{p}{N_{steps}}, \quad (2.12)$$

де:  $p$  — крок гвинта (мм/об);

$N_{steps}$  — загальна кількість кроків на один оберт двигуна з урахуванням мікрошагування.

При використанні гвинта з кроком  $p = 4$  мм/об, кроковим двигуном 200 кроків/об ( $1.8^\circ$ ) та 32-кратним мікрошагом ( $N_{steps} = 200 \cdot 32 = 6400$  кроків/об), точність позиціонування складає:

$$\Delta x = 4/6400 = 0.000625 \text{ мм} \approx 0.625 \text{ мкм на крок.}$$

Для розрахунку кінетичної енергії та навантаження на двигуни необхідно знати масу рухомих частин принтера. Масу  $m$  (кг) елементів визначають за їх об'ємом ( $V$ ) і густиною ( $\rho$ ):

$$m = \rho V. \quad (2.13)$$

Сумарна маса всіх рухомих вузлів (екструдер, каретка, напрямні) може становити близько 1.5 кг.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 41   |

Енергія, що витрачається на переміщення рухомих частин, залежить від їх маси, прискорення та відстані. Кінетична енергія, що надається:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2. \quad (2.14)$$

Енергія на прискорення:

$$E_{accel} = F \cdot S = m \cdot a \cdot S. \quad (2.15)$$

Якщо маса каретки осі X становить  $m = 1.0$  кг, вона розганяється до швидкості  $v = 0.15$  м/с, то  $E_{kin} = 0.01125$  Дж.

Якщо прискорення  $a = 5$  м/с<sup>2</sup> і відстань  $S = 0.1$  м, то  $E_{accel} = 0.5$  Дж.

Задана швидкість друку принтера складає  $V_{print} = 300$  мм/с. Це є лінійною швидкістю переміщення друкуючої головки. Вона визначається компонентами швидкості по осях X та Y:

$$V_{print} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (2.16)$$

Наприклад, якщо  $V_x = 212.13$  мм/с та  $V_y = 212.13$  мм/с, то:

$$V_{print} = \sqrt{212.13^2 + 212.13^2} \approx 300 \text{ мм/с.}$$

Оцінка часу друку є важливою для планування виробництва. Вона залежить від багатьох факторів, включаючи об'єм деталі, швидкість друку, товщину шару, щільність заповнення та час нагріву/охолодження.

Розрахуємо час друку для заданної моделі:

- об'єм моделі ( $V_{model}$ ): 500000 мм<sup>3</sup>;
- об'ємна витрата пластику ( $Q_{extrusion}$ ): 60 мм<sup>3</sup>/с;

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 42   |

- коефіцієнт, що враховує щільність заповнення та інші втрати ( $K_{fill}$ );
- накладні витрати часу ( $T_{overhead}$ ): 3600 с (1 година).

Час друку буде розраховуватися за формулою:

$$T_{print} = \frac{V_{model}}{Q_{extrusion}} \cdot K_{fill} + T_{overhead}. \quad (2.17)$$

Підставляючи значення:

$$T_{print} = \frac{500000}{60} \cdot 1.5 + 3600 \approx 12500 + 3600 = 16100 \text{ с} \approx 4.47 \text{ год.}$$

Споживання електроенергії вимірюється як добуток потужності навантаження на час роботи. Для пристрою з сумарною потужністю  $P$  (Вт), що працює  $t$  годин, енергію  $E$  (кВт·год) обчислюють:

$$E = P \cdot t. \quad (2.18)$$

Припустимо сумарну потужність принтера  $P = 400$  Вт і час роботи  $t = 5$  годин, тоді спожита енергія складе

$$E = 0.4 \cdot 5 = 2.0 \text{ кВт·год.}$$

Рівень шуму є важливим ергономічним параметром, що впливає на комфорт експлуатації. Рівень звуку поєднаних джерел обчислюють логарифмічно:

$$L_{tot} = 10 \log_{10}(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}). \quad (2.19)$$

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 43   |

Якщо рівень шуму від двох вентиляторів становить 45 дБ, а від крокових двигунів - 65 дБ, то сумарний рівень шуму буде:

$$L_{tot} = 10 \log_{10}(10^{4.5} + 10^{6.5}) \approx 65.04 \text{ дБ.}$$

## 2.2. Розробка друкуючої головки

Під час розробки моделі екструдера для друку гранулами були використані стандартні компоненти та розроблено власні деталі.

До основних стандартних компонентів належать: двигун Nema 23, круглі напрямні 10 мм з подовженими лінійними підшипниками LM10LUU, підшипник SMR138ZZ (8x13x4), шків зубчастий GT2 з на 16 зубів, шків зубчастий GT2 з на 60 зубів, ремінь GT2 6 мм, сопло E3D V6 1 мм, два керамічних нагрівальних елементів по 80 Вт, термістор NTC 100k, вентилятор-равлики 5015 та вентилятор 40x40. Крім того, використано, гвинти M2.5, M3, M5, гайки M3

Перед створенням власної головки для 3D-принтера, було виставлено в просторі стандартні деталі та розроблений шнек (рис 2.1).

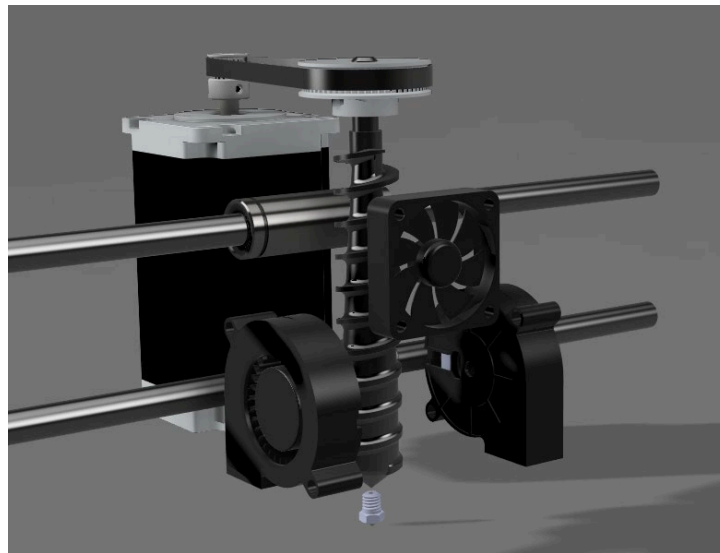


Рис. 2.1 Просторове розташування стандартних деталей.

Основною деталлю головки принтера складає каретка, на яку кріпиться всі інші деталі (рис 2.2)

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 44   |

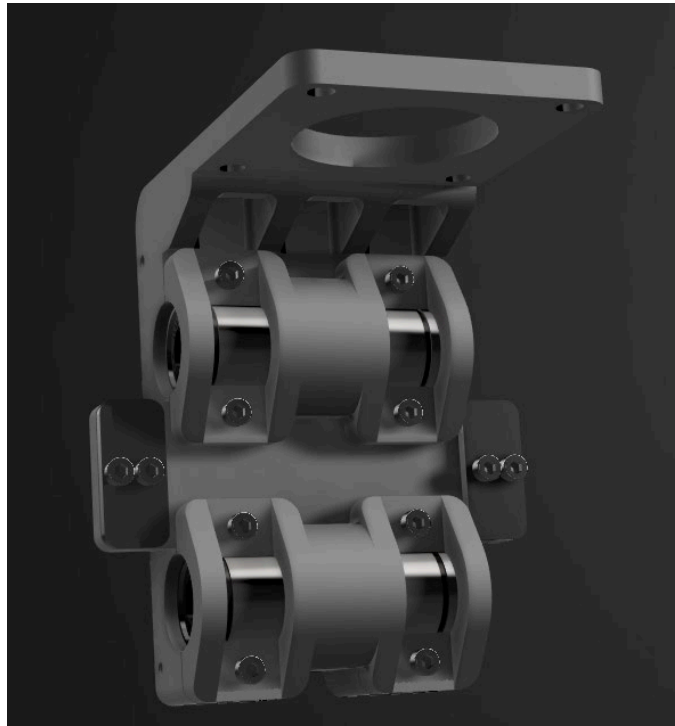


Рис. 2.2. Каретка.

Після створення каретки, було розроблено шахту для шнеку та нагрівний блок (рис. 2.3)

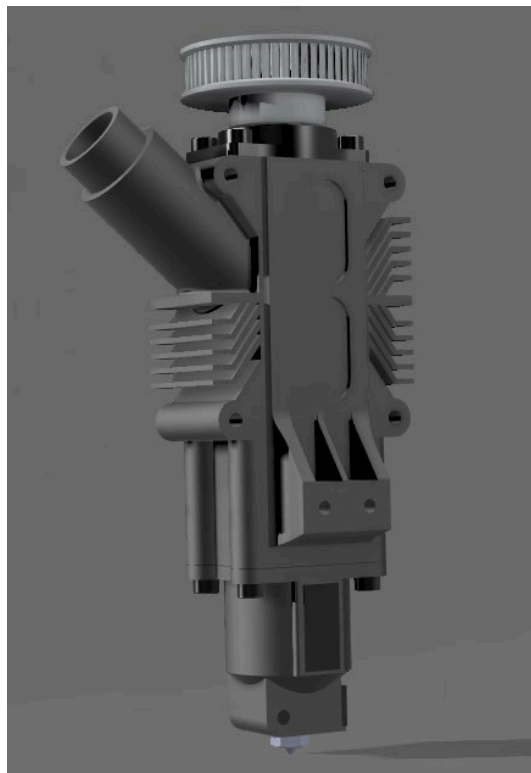


Рис. 2.3. Шахта шнеку з нагрівним блоком.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 45   |

Отримуємо збірку основної функціонуючої частини головки для друку гранулами (рис. 2.4).

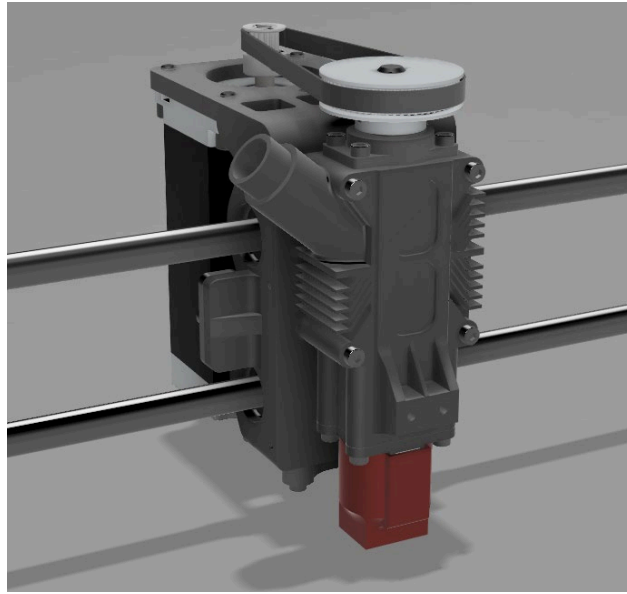


Рис. 2.4. Збірка основних компонентів.

В кінці розробки було додано кріплення вентилятора охолодження шахти шнеку, кріплення вентиляторів з повітряними каналами для охолодження друкованої деталі та захисні кожухи (рис. 2.5)

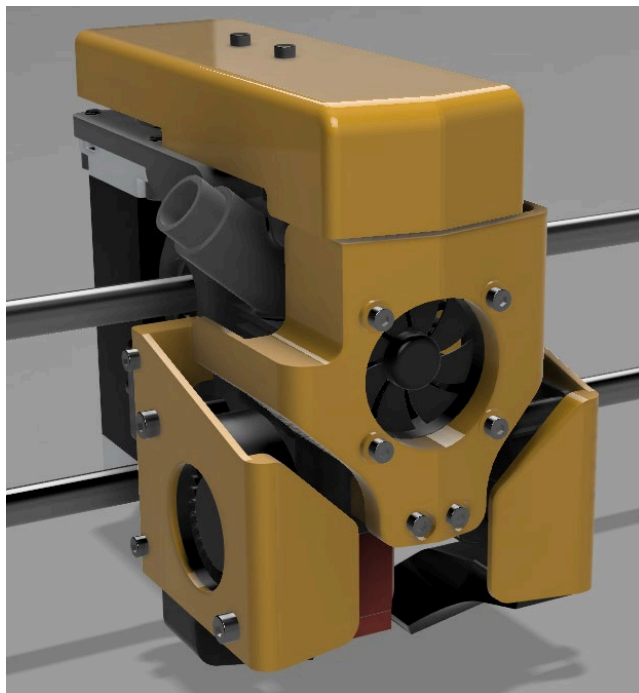


Рис. 2.5. Фінальний вигляд головки 3D-принтера.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 46   |

**РОЗДІЛ 3**  
**ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА**

**3.1. Розрахунок витрат на працю**

Для розрахунку витрат на працю використовується актуальна середня заробітна плата оператора 3D-друку в Україні (м. Київ) станом на червень 2025 року. За даними Work.ua, середня місячна заробітна плата оператора 3D-друку становить 27 500 грн.

Визначимо погодинну ставку ( $T_{\Gamma}$ ), виходячи з 22 робочих днів на місяць та 8 робочих годин на день:

$$T_{\Gamma} = \frac{T_{\text{м}}}{Q_{\text{м}} \cdot Q_{\Gamma}}, \quad (3.1)$$

де:  $T_{\text{м}}$  – місячна заробітна плата (27 500 грн);  
 $Q_{\text{м}}$  – кількість робочих днів на місяць (22);  
 $Q_{\Gamma}$  – кількість робочих годин на день (8).

Розрахунок погодинної ставки:

$$T_{\Gamma} = \frac{27500}{22 \cdot 8} = \frac{27500}{176} \approx 156.25 \text{ грн/год}$$

Витрати на працю ( $T_{\text{р}}$ ) для проєкту розраховуються, припускаючи 5 робочих годин, витрачених на модернізацію та розробку:

$$T_{\text{р}} = Q_{\text{с}} \cdot T_{\Gamma}, \quad (3.2)$$

де:  $Q_{\text{с}}$  – кількість годин, витрачених на проєкт (5 год).

|                  |             |                   |               |             |                                       |                      |             |                |
|------------------|-------------|-------------------|---------------|-------------|---------------------------------------|----------------------|-------------|----------------|
|                  |             |                   |               |             | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ |                      |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>   | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                       |                      |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | Лінник В.А        |               |             | Розділ 3                              | <i>Літ.</i>          | <i>Арк.</i> | <i>Акрушів</i> |
| <i>Перевір.</i>  |             | Крушельницький В. |               |             |                                       |                      | 47          | 62             |
|                  |             |                   |               |             |                                       |                      |             |                |
| <i>Н. Контр.</i> |             |                   |               |             |                                       |                      |             |                |
| <i>Затверд.</i>  |             |                   |               |             |                                       |                      |             |                |
|                  |             |                   |               |             |                                       | <i>НУБіП України</i> |             |                |

Розрахунок витрат на працю:

$$T_p = 5 \text{ год} \cdot 156.25 \text{ грн/год} = 781.25 \text{ грн.}$$

Отже, витрати на працю становлять 781.25 грн.

Людськогодинна ставка ( $P$ ) для місяця становить:

$$P = 22 \text{ дн} \cdot 8 \text{ год/дн} = 176 \text{ люд./год.}$$

### 3.2. Розрахунок витрат на 3D-друк гранулами

Витрати на 3D-друк гранулами залежать від вартості матеріалу, енергоспоживання, амортизації та часу друку. Розрахунок проведено для деталі вагою 100 грамів.

Вихідні дані:

- Вартість ABS гранул: 150 грн/кг (або 0.15 грн/г).
- Енергоспоживання принтера: 400-500 Вт/год (0.4-0.5 кВт/год). Для розрахунків візьмемо середнє значення 0.45 кВт/год.
- Вартість електроенергії: 4.5 грн/кВт\*год (згідно з тарифами для населення України на червень 2025 року).
- Амортизація та обслуговування: 10 грн/год (оціночне значення).

Формула витрат на друк ( $V_{д.гр}$ ):

$$V_{д.гр} = (M \cdot C_m) + (E \cdot C_e \cdot T_{др}) + (A \cdot T_{др}), \quad (3.3)$$

де:  $M = 100 \text{ г};$

$C_m = 0.15 \text{ грн/г};$

$E = 0.45 \text{ кВт/год};$

$C_e = 4.5 \text{ грн/кВт*год};$

$A = 10 \text{ грн/год.}$

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 48   |

Час друку ( $T_{др}$ ): Припустимо, що для деталі вагою 100 г при базовій товщині шару 0.6 мм, час друку становить 3 години. Тоді для інших шарів:

- 0.4 мм: 3 год · (0.6/0.4) = 4.5 год.
- 0.6 мм: 3 год.
- 0.8 мм: 3 год · (0.6/0.8) = 2.25 год.

Розрахунок витрат для різних товщин шару:

- Товщина шару 0.4 мм (4.5 год):  $V_{д.гр}(0.4) = (100 \cdot 0.15) + (0.45 \cdot 4.5 \cdot 4.5) + (10 \cdot 4.5) = 15 + 9.1125 + 45 = 69.1125$  грн.
- Товщина шару 0.6 мм (3 год):  $V_{д.гр}(0.6) = (100 \cdot 0.15) + (0.45 \cdot 4.5 \cdot 3) + (10 \cdot 3) = 15 + 6.075 + 30 = 51.075$  грн.
- Товщина шару 0.8 мм (2.25 год):  $V_{д.гр}(0.8) = (100 \cdot 0.15) + (0.45 \cdot 4.5 \cdot 2.25) + (10 \cdot 2.25) = 15 + 4.55625 + 22.5 = 42.05625$  грн.

Таблиця 3.1

Витрати на 3D-друк гранулами залежно від товщини шару

| Товщина шару, мм | Час друку, год | Вартість матеріалу, грн | Вартість електроенергії, грн | Амортизація та обслуговування, грн | Загальні витрати на друк, грн |
|------------------|----------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 0.4              | 4.5            | 15.00                   | 9.11                         | 45.00                              | 69.11                         |
| 0.6              | 3.0            | 15.00                   | 6.08                         | 30.00                              | 51.08                         |
| 0.8              | 2.25           | 15.00                   | 4.56                         | 22.50                              | 42.06                         |

Загальні витрати та податки: Для розрахунку загальних витрат візьмемо базовий варіант друку з товщиною шару 0.6 мм ( $V_{д.гр} = 51.08$  грн).

Податкові витрати ( $V_{п}$ ) з урахуванням 19.5% накладних податків:

$$V_{п} = (T_{р} + V_{д.гр}) \cdot 0.195. \quad (3.4)$$

Розрахунок податкових витрат:

$$V_{\text{п}} = (781.25 + 51.08) \cdot 0.195 = 832.33 \cdot 0.195 \approx 162.30 \text{ грн.}$$

Загальні витрати на проєкт визначаються за формулою:

$$Z = T_{\text{р}} + V_{\text{д.гр}} + V_{\text{п}}, \quad (3.5)$$

Розрахунок загальних витрат на проєкт:

$$Z = 781.25 + 51.08 + 162.30 = 994.63 \text{ грн.}$$

Таблиця 3.2

Витрати на проєкт з друком гранулами

| Витрати  | Сума, грн |
|--|-----------|
| Витрати на працю ( $T_{\text{р}}$ )                | 781.25    |
| Витрати на 3D-друк гранулами ( $V_{\text{д.гр}}$ ) | 51.08     |
| Податкові витрати ( $V_{\text{п}}$ )               | 162.30    |
| Загальні витрати ( $Z$ )                           | 994.63    |

### 3.3. Економічна доцільність використання гранул для 3D друку

Порівняння проводиться для друку однієї і тієї ж деталі вагою 100 грамів.

Вихідні дані для філаментного друку:

- Вартість ABS філаменту: 550 грн/кг (або 0.55 грн/г).
- Енергоспоживання принтера: 450 Вт/год (0.45 кВт/год).
- Амортизація та обслуговування: 10 грн/год (оціночне значення).

Розрахунок витрат на 3D-друк філаментом ( $V_{\text{д.філ}}$ ):

$$V_{\text{д.філ}} = (M \cdot C_{\text{м.філ}}) + (E_{\text{філ}} \cdot C_{\text{е}} \cdot T_{\text{др.філ}}) + (A \cdot T_{\text{др.філ}}), \quad (3.6)$$

де:  $M = 100$  г,  
 $C_{м.філ} = 0.55$  грн/г,  
 $E_{філ} = 0.45$  кВт/год,  
 $C_e = 4.5$  грн/кВт\*год,  
 $A = 10$  грн/год.

Час друку ( $T_{др.філ}$ ): Припустимо, що для деталі вагою 100 г при базовій товщині шару 0.6 мм на філаментному принтері, час друку становить 3.5 години.

Тоді для інших шарів:

- 0.4 мм:  $3.5 \text{ год} \cdot (0.6/0.4) = 5.25 \text{ год}$ .
- 0.6 мм: 3.5 год.
- 0.8 мм:  $3.5 \text{ год} \cdot (0.6/0.8) = 2.625 \text{ год}$ .

Розрахунок витрат для різних товщин шару (філамент):

- Товщина шару 0.4 мм (5.25 год):  $V_{д.філ}(0.4) = (100 \cdot 0.55) + (0.45 \cdot 4.5 \cdot 5.25) + (10 \cdot 5.25) = 55 + 10.63125 + 52.5 = 113.13$  грн.
- Товщина шару 0.6 мм (3.5 год):  $V_{д.філ}(0.6) = (100 \cdot 0.55) + (0.45 \cdot 4.5 \cdot 3.5) + (10 \cdot 3.5) = 55 + 7.0875 + 35 = 97.09$  грн.
- Товщина шару 0.8 мм (2.625 год):  $V_{д.філ}(0.8) = (100 \cdot 0.55) + (0.45 \cdot 4.5 \cdot 2.625) + (10 \cdot 2.625) = 55 + 5.315625 + 26.25 = 86.57$  грн.

Таблиця 3.3

Фінансове порівняння 3D-друку гранулами та нитками

| Критерій                 | Товщина шару, мм) | Друк гранулами, грн | Друк нитками, грн | Різниця, грн |
|--------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--------------|
| Вартість сировини        | Всі               | 15.00               | 55.00             | -40.00       |
| Загальні витрати на друк | 0.4               | 69.11               | 113.13            | -44.02       |
|                          | 0.6               | 51.08               | 97.09             | -46.01       |
|                          | 0.8               | 42.06               | 86.57             | -44.51       |

| Критерій                      | Товщина шару, мм) | Друк гранулами, грн | Друк нитками, грн | Різниця, грн                                   |
|-------------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|--|
| Вартість обладнання (орієнт.) | -                 | Від 200 000 грн     | Від 10 000 грн    | Значна перевага ниток у початкових інвестиціях |

Висновок за фінансовим порівняльним аналізом:

- Вартість сировини: Друк гранулами має значну фінансову перевагу через нижчу вартість матеріалу (гранули в 3.6 рази дешевші за філамент).
- Початкові інвестиції: Філаментні 3D-принтери значно дешевші у придбанні, тоді як гранульні принтери є дорожчими промисловими рішеннями.
- Загальна вартість друку за деталь: Незважаючи на дорожче обладнання, нижча ціна сировини робить загальну вартість друку 100-грамової деталі суттєво нижчою при використанні гранул для всіх розглянутих товщин шару. Економія на друку однієї деталі коливається від -44.02 грн до -46.01 грн на користь гранул.

Отже, гранули економічно вигідніші для великих обсягів виробництва та використання вторинної сировини.

|      |      |          |        |      |                                       |  |  |  |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|--|--|--|------|
|      |      |          |        |      |                                       |  |  |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                       |  |  |  | 52   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ |  |  |  |      |

## РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Основні положення

*Охорона праці* — це комплексна система правових, організаційних та технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці, збереження життя та здоров'я працівників. У сучасному виробництві, особливо при використанні 3D-друку з гранульованих матеріалів, важливо дотримуватися спеціальних вимог безпеки. Це пов'язано з високотемпературною обробкою пластмас, використанням електричного обладнання, шкідливими випарами та можливими механічними пошкодженнями. Експлуатація гранульних 3D-принтерів несе низку потенційних небезпек, тому дотримання встановлених норм та правил є критично важливим для уникнення негативних наслідків.

### 4.2 Види небезпеки

При роботі з гранульними 3D-принтерами виникають різноманітні небезпечні та шкідливі виробничі фактори.

*Хімічні ризики:* При нагріванні та екструзії полімерів виділяються леткі органічні сполуки (ЛОС) та ультратонкі частинки (УТЧ). Вони можуть викликати подразнення очей, носа, горла, головні болі, нудоту, а при тривалому впливі – серйозніші проблеми зі здоров'ям, включаючи респіраторні захворювання (наприклад, пневмоконіоз від полімерного пилу), алергічні реакції та навіть канцерогенний вплив. Токсичність цих викидів залежить від типу матеріалу, температури та тривалості друку.

*Фізичні ризики:* Сюди відносяться термічні та електричні небезпеки. Гарячі елементи принтера, такі як сопло та нагрівальна платформа, становлять ризик опіків. Неправильне заземлення обладнання може призвести до ураження електричним струмом.

|                  |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |
|------------------|-------------|-------------------|---------------|-------------|---------------------------------------|---------------|-------------|----------------|
|                  |             |                   |               |             | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ |               |             |                |
| <i>Змн.</i>      | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>   | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                       |               |             |                |
| <i>Розроб.</i>   |             | Лінник В.А        |               |             | Розділ 4                              | <i>Літ.</i>   | <i>Арк.</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Перевір.</i>  |             | Крушельницький В. |               |             |                                       |               | 53          | 62             |
| <i>Н. Контр.</i> |             |                   |               |             |                                       | НУБіП України |             |                |
| <i>Затверд.</i>  |             |                   |               |             |                                       |               |             |                |

Механічні ризики пов'язані з рухомими частинами принтера (двигуни, ремені, гвинтові механізми, вентилятори), які можуть спричинити защемлення або інші травми. Обертові частини екструдерів повинні бути закриті захисними кожухами. Також існує ризик пожежі та вибуху через наявність легкозаймистих матеріалів, перегрів компонентів або використання легкозаймистих розчинників під час постобробки. Залишати 3D-принтер без нагляду під час роботи категорично заборонено. В промислових умовах можуть виникати ризики, пов'язані з використанням інертних газів (асфіксія), УФ-світла (пошкодження очей та шкіри) та надмірним шумом.

*Екологічні ризики:* Відходи 3D-друку, особливо смоли, можуть бути токсичними для водних екосистем. Неналежна утилізація відходів може завдати шкоди навколишньому середовищу.

### 4.3 Нормативно-правова база

При експлуатації 3D-принтерів необхідно суворо дотримуватися рекомендацій виробника, а також національних та міжнародних стандартів, зокрема від OSHA (Occupational Safety and Health Administration) та NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). OSHA вимагає від роботодавців надавати працівникам повну інформацію та навчання щодо небезпечних хімічних речовин (включаючи паспорти безпеки), а також забезпечувати робоче місце, вільне від визнаних небезпек. NIOSH надає рекомендації щодо навчання, обмеження доступу, використання матеріалів з меншими викидами та ефективною вентиляції.

Діяльність із використанням 3D-принтерів в Україні регулюється низкою законів та стандартів, зокрема:

- Закон України «Про охорону праці»;
- ДСТУ EN ISO 12100:2014 — Безпечність машин;
- ДСТУ EN 60204-1:2015 — Електрообладнання машин;
- ДСН 3.3.6.042-99 — Санітарні норми мікроклімату;

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 54   |

- ДБН В.2.2-3:2014 — Вимоги до освітлення та вентиляції;
- Наказ Мінсоцполітики № 67 від 29.01.2018 — навчання з питань охорони праці.

Ці документи визначають мінімальні вимоги до безпеки роботи обладнання, розміщення робочих місць, а також кваліфікаційні вимоги до персоналу.

#### 4.4 Заходи безпеки

Ефективна охорона праці при роботі з 3D-принтерами вимагає комплексного підходу, що охоплює організаційні, технічні та санітарно-гігієнічні заходи, а також чіткий алгоритм дій у разі аварійних ситуацій.

**Організаційні заходи безпеки:** Це включає обов'язкове проведення інструктажів та навчання з охорони праці для всього персоналу, який працює з обладнанням. Необхідно призначати відповідальних осіб за технічний стан принтера та регулярно вести журнал технічного обслуговування та реєструвати несправності.

**Технічні заходи безпеки:** Приміщення, де розташовані 3D-принтери, має бути обладнане ефективною припливно-витяжною вентиляцією для видалення шкідливих випарів. Принтери повинні використовуватися лише в заземленій мережі для уникнення ураження електричним струмом. Обов'язковою є наявність пожежогасника (вуглекислотного або порошкового). Бажано, щоб принтери мали автоматичне блокування подачі живлення при відкритті дверцят та систему аварійного вимкнення.

**Санітарно-гігієнічні заходи:** Для створення комфортних та безпечних умов праці необхідно підтримувати температуру в приміщенні в межах 18–26 °С, вологість — 40–60 %, а освітленість — не менше 400 лк. Провітрювання приміщення повинно здійснюватися щонайменше 3 рази на зміну.

**Дії у разі аварії та медичне забезпечення:** При виявленні диму, перегріву або запаху горілого пластику, необхідно негайно зупинити роботу та вимкнути

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 55   |

живлення 3D-принтера, вивести персонал із приміщення, увімкнути вентиляцію та відкрити вікна. Слід негайно повідомити відповідальну особу та, за необхідності, викликати пожежну або технічну службу. На кожному робочому місці повинна бути аптечка з засобами першої допомоги (пов'язки, бинти, пластирі, гель від опіків, антисептик, засіб для промивання очей, захисні рукавички). Оператор повинен щорічно проходити медичний огляд, зокрема флюорографію, перевірку зору та функції дихальної системи.

*Ефективна організація охорони праці* — це багатогранний напрям, що об'єднує технічну, організаційну, санітарну та освітню складові. Її успішність прямо впливає не лише на безпеку персоналу, а й на якість виробництва, надійність обладнання та екологічну ситуацію.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                       | 56   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |

## ВИСНОВКИ

У даній дипломній роботі здійснено ретельний аналіз передової технології 3D-друку FDM, з особливим акцентом на її гранульних та філаментом варіаціях. Було глибоко занурено у сфери застосування 3D-принтерів, а також висвітлено актуальні проблеми, що обмежують ефективність сучасних друкуючих головок для гранульного друку. Проаналізувавши проблеми було запропоновано вирішення деяких з них.

Під час роботи було виконано математичні розрахунки параметрів шнека, крокового двигуна та інших компонентів. На їх основі була спроектована функціональна друкуюча головка, що об'єднує підібрані елементи та теоритично забезпечує високу продуктивність.

Отже, запропонована вдосконалена конструкція головки 3D-принтера підвищує якість друку та економічну ефективність. Результати цього дослідження відкривають широкі перспективи для практичного застосування у промисловості, медицині, архітектурі та інших галузях, де 3D-друк демонструє свій потенціал. Подальший розвиток даної тематики може охоплювати поглиблене вивчення конструктивних рішень, інтеграцію новітніх матеріалів та вдосконалення систем керування з метою досягнення ще більшої якості, швидкості та доступності адитивного виробництва.

|           |      |                   |        |      |                                       |               |      |         |
|-----------|------|-------------------|--------|------|---------------------------------------|---------------|------|---------|
|           |      |                   |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ |               |      |         |
| Змн.      | Арк. | № докум.          | Підпис | Дата |                                       |               |      |         |
| Розроб.   |      | Лінник В.А        |        |      | Висновки                              | Літ.          | Арк. | Акрушів |
| Перевір.  |      | Крушельницький В. |        |      |                                       |               | 57   | 62      |
|           |      |                   |        |      |                                       | НУБіП України |      |         |
| Н. Контр. |      |                   |        |      |                                       |               |      |         |
| Затверд.  |      |                   |        |      |                                       |               |      |         |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Turner, B. N., Strong, R., & Gold, S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Additive Manufacturing*. 2014. Vol. 1–4. P. 136–143.
2. Bikas, H., & Stavropoulos, P. Additive manufacturing technologies: review and trends. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 102, no. 5–8. P. 1827–1839.
3. Gebisa, A. W., & Lemu, H. G. Fused deposition modeling process parameter optimization for tensile properties of ULTEM 9085. *Materials & Design*. 2018. Vol. 139. P. 192–202.
4. Gao, H., et al. Design and optimization of Fused Granular Fabrication (FGF) process for large-scale composite structures. *Composites Part B: Engineering*. 2021. Vol. 222. Article 109088.
5. Ngo, T. D., et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. P. 172–196.
6. Popescu, D., et al. A review of Fused Deposition Modeling (FDM) applications for automotive industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 837. Article 012017.
7. Singh, H., et al. A critical review of materials for Fused Deposition Modeling (FDM) and their mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46, Part 10. P. 10243–10249.
8. Agarwala, M. K., et al. Fused Deposition of Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 1996. Vol. 79, no. 1. P. 110–118.
9. Stratasys Ltd. *About Stratasys: Our History*. URL: <https://www.stratasys.com/about-us/our-history> (дата звернення: 17.06.2025).

|           |                   |          |        |      |                                       |      |      |         |
|-----------|-------------------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|------|---------|
|           |                   |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ |      |      |         |
| Змн.      | Арк.              | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |      |         |
| Розроб.   | Лінник В.А.       |          |        |      | Список використаної<br>джерел         | Літ. | Арк. | Акрушів |
| Перевір.  | Крушельницький В. |          |        |      |                                       |      | 58   | 62      |
| Н. Контр. |                   |          |        |      | НУБіП України                         |      |      |         |
| Затверд.  |                   |          |        |      |                                       |      |      |         |

10. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 3rd ed. New York: Springer, 2021.
11. Vora, J. J., et al. A comprehensive review on fused deposition modeling (FDM): Materials, process parameters, and applications. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46, Part 15. P. 11394–11400.
12. Duty, C. E., et al. A review of the current state of pellet extrusion additive manufacturing. *Addit. Manuf.* 2018. Vol. 21. P. 20–31.
13. Goyanes, A., et al. Fused deposition modeling (FDM) 3D printing of tablets with adjustable drug loading and release properties. *International Journal of Pharmaceutics*. 2017. Vol. 531, no. 1. P. 502–511.
14. Al-Sabri, S. F., et al. A comprehensive review on fused deposition modeling (FDM) process parameters and their effect on mechanical properties. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2018. Vol. 12, no. 1. P. 3433–3454.
15. Vidakis, N., et al. Fused Deposition Modeling (FDM) of Thermoplastic Composites: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 34, no. 12. P. 1285–1306.
16. Hwa, K. L., et al. Recent advances in Fused Granular Fabrication (FGF) for large-scale additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 8, no. 2. P. 321–345.
17. Manoharan, S., et al. Effect of nozzle temperature and printing speed on the mechanical properties of FDM printed parts. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 30. P. 320–327.
18. Pavan, P., et al. CoreXY Kinematics for 3D Printers: A Review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 64. P. 21–35.
19. Salmi, M. S., et al. Enhancing the Mechanical Properties of FDM Parts through Heated Build Chamber and Post-Processing. *Polymer Engineering & Science*. 2020. Vol. 60, no. 11. P. 2883–2894.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 59   |

20. Al-Ahmari, A. M. A., et al. Additive Manufacturing of Large-Scale Structures: Challenges and Opportunities. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 293. Article 117094.
21. Roldan, M. C., et al. A Review on Pellet Extrusion Additive Manufacturing of Engineering Polymers. *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 12. Article 2354.
22. Lv, Z., et al. Advances in Materials for Fused Granular Fabrication: From Traditional Polymers to High-Performance Composites. *Additive Manufacturing*. 2024. Vol. 77. Article 103829.
23. Ghabezi, A., et al. Sustainability in Additive Manufacturing: Utilizing Recycled Plastics in Fused Granular Fabrication. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 385. Article 135431.
24. Kulkarni, M., et al. Design and Optimization of Screw Extruders for Fused Granular Fabrication. *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 36. Article 101569.
25. Samal, R. R., et al. A Review on Screw Extruder Design for Polymer Processing. *Polymer Reviews*. 2019. Vol. 59, no. 4. P. 660–692.
26. Wu, L., et al. Control Systems for Additive Manufacturing: A Review. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 35270–35285.
27. Qian, Z., et al. Slicing Algorithms for Large-Scale Additive Manufacturing. *Computer-Aided Design*. 2023. Vol. 165. Article 103550.
28. Tayeh, V., et al. Applications of Large-Scale Additive Manufacturing in Construction: A Comprehensive Review. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 159. Article 105260.
29. Cacciotti, I., et al. Additive Manufacturing of Medical Devices: Materials, Design, and Applications. *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 48. Article 102435.
30. Yu, X., et al. Fused Granular Fabrication for Automotive and Aerospace Applications: A Review. *Journal of Advanced Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 5, no. 1. Article e10168.

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| ЗМН. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 60   |

31. Bowden VS Direct Drive: Pros & Cons, Which to Choose [Электронный ресурс] / Kingroon 3D // Kingroon. — Режим доступа: <https://kingroon.com/blogs/3d-print-101/bowden-vs-direct-drive-pros-cons> (дата звернення: 17.06.2025).
32. AbdelHamid, A. Low Cost X-Y Core Positioning System Using Stepper Motor [Электронный ресурс] / A. AbdelHamid, Mohamed A.A Abdeldayem, M. Mabrouk // ResearchGate. — 2018. — Режим доступа: [https://www.researchgate.net/figure/General-layout-of-the-core-XY-positioning-system\\_fig2\\_326843167](https://www.researchgate.net/figure/General-layout-of-the-core-XY-positioning-system_fig2_326843167) (дата звернення: 17.06.2025).
33. 3D-printed lamination mold [Электронный ресурс] // Caracol. — Режим доступа: <https://caracol-am.com/resources/case-studies/3d-printed-lamination-mold> (дата звернення: 17.06.2025).
34. ABS granules [Электронный ресурс] // epo3d. — Режим доступа: <https://epo3d.com/ru/katalog/plastik/granuly/abs-granuly.html> (дата звернення: 17.06.2025).
35. ScienceDirect [Электронный ресурс] // ScienceDirect. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067222000372> (дата звернення: 17.06.2025).
36. Сопло E3D M6 1мм под нить 3 3\*1мм для 3D-принтера (14489) [Электронный ресурс] // electricbike. — Режим доступа: <https://electricbike.com.ua/sopla/53753-soplo-e3d-m6-1mm-pod-nit-3-31mm-dlya-3d-printera-14489.html> (дата звернення: 17.06.2025).
37. Шаговый двигатель NEMA 17 42BYGH47-401AS [Электронный ресурс] // Mini-Tech. — Режим доступа: <https://www.mini-tech.com.ua/42byghw208-nema17-shagoviy-motor> (дата звернення: 17.06.2025).
38. BIGTREETECH SKR PICO V1.0 Control Board: Mini Controller Board with TMC2209 UART Stepper Motor and Raspberry Pi Online Printing for Voron V0 V0.1 3D Printer Parts [Электронный ресурс] / BIGTREETECH Direct // Amazon.de. — Режим доступа: <https://www.amazon.de/>

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       | 61   |

</en/BIGTREETECH-PICO-V1-0-Control-Board/dp/B09MYKL9MP>

(дата

звернення: 17.06.2025).

39. Orca Slicer Download | Obico [Електронний ресурс] / Mohamed Elgandy // Obico. — Режим доступу: <https://www.obico.io/blog/orca-slicer-download/> (дата звернення: 17.06.2025).

|      |      |          |        |      |                                       |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 17.05-БКР-2265 «С» 16.12.2024. 016 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                                       | 62   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                                       |      |