Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально–науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

кафедра металургійного обладнання
(повна назва кафедри)

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

На тему Розробка комплексу обладнання для рециклінгу пластикових відходів з метою подальшого його використання при 3D друці деталей металургійного обладнання

Виконав: магістрант групи 8.1334

Худяков Р.А.
(ПІБ) (підпис)

спеціальності

133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

Освітньо–професійна програма
Металургійне обладнання
(шифр і назва)

Керівник Шейко С.П.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Н.контроль Васильченко Т.О.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2025 року

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інженерний навчально–науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра металургійного обладнання

Рівень вищої освіти магістр
(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Спеціалізація
(шифр і назва)

Освітньо–професійна програма Металургійне обладнання
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою А.О. Власов
_____
“____”_____20___ року

Завдання
до випускної кваліфікаційної роботи магістра

Худякова Ростислава Андрійовича
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи: Розробка комплексу обладнання для рециклінгу пластикових відходів з метою подальшого його використання при 3D друці деталей металургійного обладнання
керівник магістерської роботи канд. техн. наук., професор Шейко С.П., затверджені наказом вищого навчального закладу від “19“ вересня 2025 року № 1305–с.
2. Строк подання студентом магістерської роботи 11 грудня 2025 року.
3. Вихідні дані магістерської роботи техніко–економічні показники роботи 3D принтера ENDER 3
4. Зміст розрахунково–пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Огляд науково–технічних рішень для 3D друку та обґрунтування обраного напрямку роботи; 2. Розрахункова частина; 3. Дослідно–експериментальна частина; 4. Охорона праці та техногенна безпека в галузі. Загальні висновки та рекомендації
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень): 1. Креслення загального виду 3D принтера (плакат)– 1А1; 2. Креслення обладнання для рециклінгу пластикових пляшок (плакат) – 1А1; 3. Деталіровка – 1А1 4.Аналіз впливу температури екструзії на якість філаменту (плакат)– 1А1; 5. Кінцево–елементний аналіз виготовленої деталі з вторинного пластику (плакат) – 1А1; 6. Заземлення обладнання лабораторії – 1А1;

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Шейко С.П., канд.техн.наук,професор		
2	Шейко С.П., канд.техн.наук,професор		
3	Шейко С.П., канд.техн.наук,професор		
4	Шейко С.П., канд.техн.наук,професор		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітки
1	Збір матеріалу на кваліфікаційну роботу	29.05.2025 – 25.06.2025	
2	Групування та аналіз зібраного матеріалу. Уточнення завдань проєктування	01.09.2025 – 17.09.2025	
3	Виконання теоретичної частини проекту	18.09.2025 – 18.10.2025	
4	Виконання графічної частини проєкту	19.10.2025 – 19.11.2025	
5	Написання та оформлення пояснювальної записки	20.11.2025 – 30.11.2025	
6	Перевірка проєкту консультантами	01.12.2025 – 03.12.2025	
7	Попередній захист	09.12.2025	
8	Переплітання пояснювальної записки	Згідно з графіком	
9	Захист проєкту	Згідно з графіком	

Студент _____ Худяков Р.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник магістерської роботи _____ Шейко С.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Худяков Р.А. Розробка комплексу обладнання для рециклінгу пластикових відходів з метою подальшого його використання при 3D друці деталей металургійного обладнання.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальність 133 – Галузеве машинобудування, науковий керівник С.П. Шейко. Запорізький національний університет, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра металургійного обладнання, 2025.

Проаналізовані переваги та недоліки наявних технічних рішень спрямованих на підвищення ефективності 3D друку. Запропонований варіант комплексу обладнання для переробки пластикових пляшок на філамент до 3D принтера. Проведено аналіз впливу технологічних факторів на рециклінг пластикових відходів. Розроблена технологія виготовлення філаменту з пластикових відходів для 3D принтерае ENDER 3.

Ключові слова: РЕЦИКЛІНГ, ПЛАСТИК, 3D ПРИНТЕР, ФІЛАМЕНТ, 3D МОДЕЛЮВАННЯ

ABSTRACT

Khudyakov R.A. Development of a complex of equipment for recycling plastic waste with the aim of its further use in 3D printing of metallurgical equipment parts.

Qualification final work for obtaining a higher education degree of a master's degree in specialty 133– Industrial engineering scientific adviser S.P. Sheyko. Zaporizhzhia National University ,Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M.Potebni,Department of Metallurgical Equipment,2025

The advantages and disadvantages of existing technical solutions aimed at increasing the efficiency of 3D printing are analyzed. The proposed version of the complex of equipment for processing plastic bottles into filament for a 3D printer. An analysis of the influence of technological factors on the recycling of plastic waste was carried out. The technology for making filament from plastic waste for the ENDER 3 3D printer has been developed.

Keywords: RECYCLING, PLASTIC, 3D PRINTER, FILAMENT, 3D MODELING

Зміст

Вступ 7
ОГЛЯД НАУКОВО–ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ 3D ДРУКУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО НАПРЯМКУ РОБОТИ 9
1.1 Історія розвитку адитивних технологій 9
1.2 Аналіз конструктивних особливостей обладнання та типів витратних матеріалів для 3D–друку 12
1.3 Технічна характеристика та аналіз конструктивних недоліків 3D–принтера Creality Ender 3 18
1.4 Огляд технічних рішень, спрямованих на модернізацію 3D–принтера в лабораторних умовах, та обґрунтування обраного напрямку 21
2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА 24
2.1 Розробка та принцип дії експериментального обладнання для рециклінгу пластику 24
2.2 Розрахунок відкритої передачі намотувального пристрою 35
2.3 Розрахунок валу намотувального барабана 38
2.4 Розрахунок приводу механізму різання пляшки 39
3 ДОСЛІДНО–ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА 42
3.1 Аналіз типу пластику та відходів призначених для рециклінгу 42
3.2 Теоретичне підґрунтя створення лабораторного обладнання для рециклінгу пластикових пляшок 50
3.3 Аналіз можливих перешкод для відпрацювання технологічного процесу рециклінгу пластмас в лабораторних умовах 53
3.4 Методика виконання експериментальної частини 56
3.5 Результати проведення експерименту по рециклінгу пластику 60
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА В ГАЛУЗІ 66
4.1 Виявлення та оцінка шкідливих факторів виробничого середовища 66
4.2 Заходи захисту від впливу шкідливих факторів виробничого середовища 67

4.3 Технічні рішення по гігієні праці та виробничій санітарії 68
4.4 Техногенна безпека 69
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ 72
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 74
ДОДАТКИ 77

Вступ

На сучасному етапі розвитку промисловості однією з найгостріших глобальних проблем є зростання обсягів пластикових відходів, що негативно впливає на стан довкілля та екологічну безпеку. Пластмаси широко застосовуються у різних галузях промисловості, зокрема в металургії, машинобудуванні та енергетиці, завдяки своїй низькій масі, корозійній стійкості та технологічності. Однак значний термін їх розкладання та складність утилізації зумовлюють необхідність пошуку ефективних рішень щодо повторного використання пластикових матеріалів.

Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є рециклінг пластикових відходів з подальшим виготовленням виробів методами адитивних технологій, зокрема 3D-друку. Застосування адитивного виробництва дозволяє оперативно виготовляти деталі складної геометрії, зменшувати матеріальні витрати та скорочувати терміни ремонту і модернізації промислового обладнання. У металургійній галузі 3D-друк може бути ефективно використаний для виготовлення допоміжних, захисних, ізоляційних та конструктивних елементів, що не працюють у зонах високих температур і навантажень.

Разом з тим, ефективне використання вторинних пластикових матеріалів у 3D-друці потребує створення спеціалізованого комплексу обладнання, який забезпечує повний цикл підготовки сировини: від сортування та подрібнення пластикових відходів до отримання філаменту з необхідними фізико-механічними властивостями.

У зв’язку з цим розробка комплексу обладнання для рециклінгу пластикових відходів з метою подальшого їх використання у 3D-друці деталей металургійного обладнання є актуальним науково-технічним завданням, що поєднує екологічні, економічні та виробничі аспекти.

Мета і задачі дослідження**.** Метою роботи є дослідження можливості виготовлення витратних матеріалів (філаменту) з побутових пластикових відходів

з можливістю подальшого їхнього використання при 3D друці деталей металургійного обладнання

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дослідження вимог до матеріалів для 3D-друку деталей металургійного обладнання;
- розробка структурної схеми комплексу обладнання;
- обґрунтування основних конструктивних і технологічних параметрів;
- оцінка техніко- екологічної ефективності запропонованого рішення.

Предмет дослідження – є комплекс обладнання та технологічні параметри переробки пластикових матеріалів для 3D-друку деталей металургійного призначення.

Об'єкт дослідження – процес рециклінгу пластикових відходів та їх підготовка до використання в адитивних технологіях.

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи доповідалися на: XI International Scientific and Practical Conference “Modern generation: current problems, experience, development prospects” Seville: ISG, 2024 та XII International Scientific and Practical Conference “Prospective directions of modern science and education in the world” Rotterdam: ISG, 2024. Опубліковано 2 тези доповідей та наукова стаття у зарубіжному журналі (Experimental Study of the Process of Obtaining Filament for 3D Printing from Plastic Waste. *Energy & Environment Management*. 2025. Т. 1. № 2. С. 51-58. URL: https://doi.org/10.63333/eem.v1n26).

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг роботи включає 85 сторінок, у тому числі 78 сторінок основного тексту, на яких 18 рисунків, 2 таблиць, 27 найменування використаних джерел на 3 сторінках, 6 додатків.

Робота виконана на кафедрі металургійного обладнання, інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні, Запорізького національного університету.

ОГЛЯД НАУКОВО–ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ 3D ДРУКУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО НАПРЯМКУ РОБОТИ

1.1 Історія розвитку адитивних технологій

Адитивні технології, або технології пошарового нарощування матеріалу, є однією з найперспективніших галузей сучасного виробництва. Їхня суть полягає у створенні фізичних об’єктів на основі цифрової моделі шляхом послідовного додавання матеріалу шар за шаром. На відміну від традиційних методів, що ґрунтуються на видаленні матеріалу (механічна обробка, фрезерування, лиття), адитивні методи дозволяють отримувати вироби з високою геометричною складністю без потреби у спеціальних оснастках чи дорогих прес–формах.

Історичний розвиток адитивних технологій є багатоступеневим процесом, який охоплює період від перших концептуальних ідей у другій половині XX століття до сучасного етапу цифрової трансформації виробництва. Розглянемо ключові етапи їх становлення.

Зародження ідей, які згодом привели до створення 3D–друку, пов’язане з розвитком комп’ютерних технологій та автоматизації виробництва у 1950–1970–х роках. Першим кроком стало впровадження числового програмного керування (ЧПК), що дозволило автоматизувати обробку деталей на верстатах. У 1970–х роках з’явилися CAD–системи (Computer–Aided Design), які дали змогу створювати тривимірні цифрові моделі майбутніх виробів. У цей період були висловлені перші гіпотези про можливість виготовлення об’єктів шляхом пошарового нарощування матеріалу, а не його видалення. У 1972 році японський дослідник П’єр Дрейфус запатентував методику створення тривимірних моделей за допомогою пошарового нанесення полімерів. Проте рівень розвитку лазерних систем і полімерних матеріалів ще не дозволяв реалізувати ці ідеї на практиці.

Справжнім початком сучасної ери адитивних технологій вважаються 1980–ті роки, коли з'явилися перші комерційно придатні методики 3D–друку.

- 1981 рік – японський інженер Хідео Кодама розробив концепцію фотополімеризації рідких смол за допомогою ультрафіолетового випромінювання. Ця ідея стала основою майбутньої стереолітографії (SLA).
- 1984 рік – американський дослідник Чарльз Халл отримав патент на стереолітографію (SLA) – технологію, що дозволяла формувати тривимірні вироби шляхом локального затвердіння фотополімерної смоли лазером. Він же заснував компанію 3D Systems, яка випустила перший комерційний 3D–принтер.
- 1988 рік – Карл Декард (Техаський університет, США) розробив технологію селективного лазерного спікання (SLS), що дала змогу використовувати порошкові матеріали, зокрема полімери й метали.

Таким чином, саме у 1980–х роках відбувся перехід від експериментальних лабораторних установок до перших промислових рішень.

У 1990–х роках адитивні технології почали активно впроваджуватись у промисловість під назвою Rapid Prototyping («швидке прототипування»). Основною сферою застосування було створення дослідних зразків, макетів і функціональних моделей перед запуском серійного виробництва.

Ключові події цього періоду:

- Поява технології Fused Deposition Modeling (FDM), запатентованої у 1989 році Скоттом Крампом (компанія Stratasys). FDM стала найбільш поширеним методом завдяки відносній простоті, дешевизні матеріалів і відсутності потреби в лазерних установках.
- Активний розвиток матеріалів для SLA і SLS: фотополімерні смоли, нейлон, порошки металів.
- Впровадження перших програмних комплексів для автоматичної підготовки 3D–моделей до друку.

Проте на той час вартість обладнання залишалася дуже високою, тому доступ до технології мали лише великі корпорації (автомобільна, аерокосмічна промисловість, медицина).

На початку 2000–х років відбувся різкий стрибок у доступності адитивних технологій. Це було зумовлено закінченням терміну дії патенту на технологію FDM, що відкрило шлях для численних стартапів і ентузіастів.

- 2004 рік – запуск проєкту RepRap**,** метою якого було створення 3D–принтера з відкритим кодом, здатного друкувати власні комплектувальні деталі.
- Поширення дешевих настільних 3D–принтерів, які використовували пластикові філаменти (PLA, ABS).
- Формування спільнот «makers» та поява концепції персонального 3D–друку.

Цей період можна вважати часом демократизації технології, коли 3D–друк вийшов за межі промислових підприємств і став доступним для малих компаній, навчальних закладів і приватних користувачів. З 2010–х років адитивні технології інтегруються в усі ключові галузі промисловості. Відбувається перехід від швидкого прототипування **до** адитивного виробництва (Additive Manufacturing)**.**

Сучасні тенденції включають:

- Розширення спектра матеріалів: метали (титан, алюміній, інконель), кераміка, композити, біоматеріали, бетонні суміші для будівництва.
- Великоформатний друк: створення будівельних принтерів, що дозволяють зводити будинки безпосередньо на майданчику.
- Біодрук**:** експерименти з друком тканин, хрящів і навіть органів для медицини.
- Аерокосмічні та оборонні проєкти**:** компанії SpaceX, NASA, Boeing активно застосовують друк металевих деталей.
- Цифрове виробництво та Індустрія 4.0**:** інтеграція 3D–друку з робототехнікою, системами штучного інтелекту й хмарними сервісами.

Таким чином, 3D–друк перестав бути лише допоміжним інструментом і

перетворився на ключову технологію сучасної промислової революції.

Проаналізувавши історію розвитку адитивних технологій, можна виділити п’ять основних етапів:

1. Формування ідей (1950–1970–ті роки) – розвиток ЧПК і CAD.
2. Зародження технологій (1980–ті роки) – SLA, SLS, FDM.
3. Комерціалізація (1990–ті роки) – поширення у промисловості як Rapid Prototyping.
4. Демократизація (2000–ті роки) – поява домашніх і напівпрофесійних принтерів.
5. Масове впровадження (2010–ті – 2020–ті роки) – адитивне виробництво, біодрук, будівництво, космічні програми.

Таким чином, сучасний стан галузі є результатом багаторічного розвитку, а перспектива полягає у подальшій інтеграції 3D–друку в глобальні виробничі ланцюги, переході до децентралізованого та персоналізованого виробництва, а також розвитку нових напрямів, таких як біодрук і космічні адитивні технології.

Історія адитивних технологій демонструє поступовий шлях від наукових гіпотез до широкого промислового впровадження. Кожен етап розвитку супроводжувався технологічними проривами – від створення CAD–систем до появи нових матеріалів і процесів. Сьогодні адитивні технології є одним з головних драйверів Індустрії 4.0, відкриваючи нові можливості для гнучкого, екологічного й економічного виробництва.

1.2 Аналіз конструктивних особливостей обладнання та типів витратних матеріалів для 3D–друку

Адитивні технології реалізуються на спеціалізованому обладнанні – 3D–принтерах, конструкція яких визначає точність, швидкість, розміри виробів і можливі типи матеріалів. Залежно від технології друку (FDM, SLA, SLS, DMLS

тощо) використовується різне обладнання, що має власні конструктивні особливості та принципи роботи. Важливим елементом також є витратні матеріали, адже саме вони визначають функціональні властивості готових виробів.

У даному підрозділі проведено аналіз основних конструктивних вузлів 3D–принтерів і класифікацію найбільш поширених матеріалів, що застосовуються в адитивному виробництві.

Незалежно від конкретної технології, більшість 3D–принтерів складається з таких базових компонентів:

1. Рама (корпус) – забезпечує жорсткість конструкції та точність позиціонування. Виконується зі сталі, алюмінію або композитних матеріалів. У профссійних принтерах використовується закрита камера для стабілізації температурного режиму.
2. Система координатного переміщення – рухомі осі X, Y, Z, що забезпечують переміщення робочої головки або платформи. Найчастіше застосовуються:
   - Картезіанські механізми (линейні напрямні, ходові гвинти);
   - CoreXY – компактна система з ремінними передачами;
   - Дельта–механізми (три паралельні приводи, висока швидкість, але менша точність у центрі платформи).
3. Робоча голівка (екструдер, лазерний модуль або сопло) – ключовий вузол, що формує шар матеріалу. Для різних технологій він має різну конструкцію:
   - у FDM–принтерах – це нагрівальний блок з термоконтролем і соплом;
   - у SLA–принтерах – лазерний або LCD–проектор для полімеризації смоли;
   - у SLS/DMLS – високопотужний лазер для спікання порошку.
4. Робоча платформа (стіл) – основа, на якій формується об’єкт. Може мати підігрів для покращення адгезії першого шару.

5. Система подачі матеріалу – залежить від типу витратного матеріалу: подача філамента через екструдер, дозування рідкої смоли чи рівномірне нанесення порошкового шару.

6. Система управління – електроніка, що координує переміщення вузлів, температурний режим і взаємодію з програмним забезпеченням (прошивки Marlin, Klipper, proprietary firmware).

7. Програмне забезпечення – включає CAD–моделювання, CAM–підготовку (слайсинг) та контроль друку.

Кожен тип технології має власні конструктивні особливості, тому розглянемо найпоширеніші з них.

– Найбільш доступні та поширені.
– Принцип роботи: подача термопластичного філамента в нагріту головку, де він плавиться і наноситься на платформу шар за шаром.
– Конструктивні типи: Direct drive (екструдер розташований на рухомій головці) та Bowden (подача філамента через тефлонову трубку).
– Особливості: потреба в нагріві сопла (180–260 °C), можливість закритої камери для ABS та нейлону.

SLA/LCD/DLP–принтери

– Використовують рідкі фотополімерні смоли, що полімеризуються під дією ультрафіолетового випромінювання.
– Конструкція включає ванночку зі смолою та лазерний або проекторний модуль.
– Відрізняються високою точністю (до 25 мкм), але мають обмеження у розмірах робочої області.

SLS/DMLS–принтери

– Принцип: селективне лазерне спікання (SLS) полімерних або металевих порошків.
– Особливості конструкції: система нанесення тонкого шару порошку, потужний лазер, камера з інертним газом (для металів).

– Забезпечують високу міцність виробів, застосовуються в авіаційній, медичній та автомобільній промисловості.

Будівельні та біопринтери

– Для друку бетоном застосовуються великоформатні портальні конструкції.
– Біопринтери мають модулі для екструзії гідрогелів, біочорнил і живих клітин, потребують стерильних умов.

Матеріали для адитивного виробництва поділяються залежно від технології: термопластики, фотополімери, порошки полімерів і металів, а також композити.

Термопластики для FDM

1. PLA (полілактид)
   - Біорозкладний, легкий у друці.
   - Робоча температура: 190–220 °C.
   - Недоліки: низька термостійкість (до 60 °C).
2. ABS (акрилонітрил–бутадієн–стирол)
   - Міцніший за PLA, стійкий до ударів.
   - Робоча температура: 230–250 °C.
   - Потребує закритої камери через усадку.
3. PETG (глікольмодифікований поліетилентерефталат)
   - Компроміс між PLA і ABS: міцний, стійкий до вологи, простий у друці.
4. Нейлон, полікарбонат, TPU (гнучкі поліуретани)
   - Для функціональних деталей, шестерень, амортизувальних елементів.

- Стандартні смоли – для високодеталізованих моделей.
- Інженерні смоли – підвищена міцність і термостійкість.
- Біосумісні смоли – для стоматології та медицини.

Порошкові матеріали

- Поліамід (нейлон) – основний матеріал для SLS.

- Металеві порошки (титан, алюміній, інконель, сталь) – використовуються в DMLS/SLM.
- Композити – порошки з додаванням скловолокна або вуглеволокна.

Спеціальні матеріали

- Бетонні суміші – для будівельного друку.
- Біочорнила – гідрогелі, клітинні суспензії для друку тканин.

Кожен тип обладнання й матеріалу має власну нішу застосування:

- FDM – найкраще підходить для швидкого прототипування та малих серій, дешевий і простий.
- SLA/DLP – забезпечує високу точність і гладку поверхню, проте дорожчі смоли й обмежений розмір моделі.
- SLS/DMLS – професійні рішення для промислових деталей із високими вимогами до міцності.

З погляду матеріалів:

- PLA, PETG – підходять для побутових виробів, декоративних елементів.
- Нейлон, полікарбонат – для механічно навантажених деталей.
- Метали – для авіаційної, космічної, медичної галузей.

Таким чином, вибір конкретної конструкції принтера й типу витратного матеріалу залежить від вимог до функціональності виробу, точності, швидкості та вартості.

Конструктивні особливості 3D–принтерів визначають не лише їхню точність і надійність, а й допустимі матеріали. Найпоширенішими є FDM–принтери через простоту, однак для промислових задач використовуються SLA, SLS і DMLS. Витратні матеріали охоплюють широкий спектр – від доступних термопластів до високотехнологічних металевих порошків і біочорнил. Розвиток матеріалознавства прямо впливає на можливості адитивного виробництва, розширюючи сфери його застосування.

3D принтер Creality ENDER є однією з найпопулярніших моделей у сегменті бюджетних та середнього рівня пристроїв для домашнього та лабораторного використання. Модель набула широкого поширення завдяки простоті конструкції, відносно високій якості друку та низькій вартості комплектуючих. Принтер призначений для друку тривимірних моделей з різних термопластичних матеріалів, таких як PLA, ABS, PETG та інші. Завдяки відкритій архітектурі, пристрій часто використовується як база для модернізацій і покращень, що дозволяє користувачам адаптувати його під свої потреби.

Creality ENDER оснащений робочою областю приблизно 220×220×250 мм, що дозволяє друкувати деталі середніх розмірів. Максимальна швидкість друку становить близько 180 мм/с, протс для забсзпсчсння якісного рсзультату рекомендовано не перевищувати 60–80 мм/с. Принтер використовує філамент діаметром 1,75 мм, що є стандартним для більшості сучасних моделей. Нагріваєма платформа забезпечує стабільне прилипання першого шару, що особливо важливо при друку матеріалів, схильних до деформації, таких як ABS. Екструдер працює при температурі до 250–260 °C, що дозволяє обробляти більшість термопластиків, однак для спеціалізованих матеріалів, наприклад нейлону або полікарбонату, потрібні додаткові модифікації.

Рама принтера виконана з алюмінієвого профілю та деяких пластикових деталей, що робить конструкцію легкою та доступною для транспортування, але водночас менш жорсткою при високих швидкостях друку. Відомим недоліком є вертикальні вісі, які іноді схильні до легкого люфту, що може призводити до зниження точності. Механізм подачі філамента простий у обслуговуванні, але не завжди ефективний при роботі з гнучкими матеріалами, що може викликати застрягання або нерівномірне надходження пластику. Стандартна комплектація не включає автоматичне рівняння столу, через що користувач повинен вручну налаштовувати висоту першого шару, що займає додатковий час і впливає на повторюваність результатів.

Незважаючи на доступність та популярність, Creality ENDER має низку конструктивних недоліків. По–перше, недостатня жорсткість рами при швидкому друку спричиняє появу вібрацій, що відображається на якості поверхні виробу та точності геометрії. По–друге, обмежене охолодження екструдера може призводити до перегріву та ненадійної подачі філамента при тривалому друку складних моделей. Третій аспект – це механізм натягу ременів, який часто вимагає ручного регулювання; неправильне натягнення може спричиняти зсув шарів і деформацію деталей. Також серед недоліків користувачі виділяють обмежені можливості модифікації базового програмного забезпечення без додаткових знань у сфері прошивок та електроніки.

Під час роботи з Crcality ENDER користувачі часто стикаються з необхідністю регулярного обслуговування: перевірки рівняння столу, мастила осей, заміни сопел та очищення механізму подачі філамента. Незважаючи на це, принтер демонструє стабільну продуктивність при дотриманні рекомендованих параметрів друку. Для покращення якості друку та підвищення надійності конструкції часто застосовують модернізації: заміну пластикових деталей на металеві, додаткове охолодження екструдера, встановлення автоматичного сенсора рівняння платформи, а також зміцнення рами за допомогою додаткових кріплень.

1.3 Технічна характеристика та аналіз конструктивних недоліків 3D–принтера Creality Ender 3

3D–принтер Creality Ender 3 є одним з найпоширеніших настільних FDM–принтерів початкового та середнього рівня. Його основні технічні параметри наведено в таблиці 1.1.

Принтер постачається у напіврозібраному вигляді, має металеву раму з профілю 2020, ручне регулювання натягу ременів і механічну кінцеву зупинку по осі Z.

Попри популярність та низьку вартість, Creality Ender 3 має низку конструктивних недоліків, які можуть впливати на якість друку та зручність експлуатації:

1. Відсутність автоматичного рівнювання стола. Рівнювання платформи здійснюється вручну за допомогою гвинтів, що вимагає регулярної перевірки. Це ускладнює роботу новачкам і призводить до нерівномірного першого шару.
2. Bowden–система подачі філаменту. Використання Bowden–екструдера збільшує гнучкість прутка в тефлоновій трубці, що негативно впливає на друк м'яких матеріалів (TPU, TPE). Також це погіршує точність реверсивних рухів (rctraction).
3. Відсутність повного закритого корпусу. Принтер має відкриту конструкцію, що призводить до нерівномірного прогріву робочої зони, виникнення протягів і поганого друку ABS або інших термочутливих матеріалів.
4. Механічні люфти та знос роликів. Система переміщення заснована на V–slot роликах із полімеру, які з часом зношуються й викликають люфти на осях X, Y, Z. Це призводить до вібрацій, ряби (ghosting) і зниження точності.
5. Обмежена стабільність рами. Базова конструкція має лише одну вертикальну стійку по осі Z, що може спричиняти мікроколивання при друці на великій висоті.
6. Обмеження в температурному режимі. Стандартний хотенд має тефлонову трубку всередині, яка починає деградувати при температурах понад 240 °C. Це обмежує друк високо–температурними матеріалами (наприклад, нейлон, полікарбонат).
7. Відсутність датчика закінчення філаменту. Базова версія не має філамент–сенсора, тому при розриві чи закінченні матеріалу друк припиняється з помилкою.

8. Шумність друку. Стандартна плата керування використовує драйвери A4988, які створюють характерний високочастотний шум при русі осей.

Creality Ender 3 є оптимальним варіантом для навчальних і побутових задач завдяки доступності, простоті обслуговування та великій спільноті користувачів. Однак для підвищення надійності та якості друку доцільно провести модернізацію: встановити автоматичне рівнювання стола (BLTouch), замінити екструдер на прямий (Direct Drive), поліпшити охолодження хотенда, додати сенсор філаменту та оновити плату керування на безшумну.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики об’єкта дослідження

Параметр	Значення
Технологія друку	FDM (Fused Deposition Modeling)
Робоча область	220×220×250 мм
Тип екструдера	Bowden (MK8)
Діаметр сопла	0,4 мм (можлива заміна на 0,2–0,8 мм)
Товщина шару	0,1–0,4 мм
Швидкість друку	до 180 мм/с (рекомендована 60 мм/с)
Матеріали	PLA, PETG, TPU, ABS (з обмеженнями)
Робоча температура сопла	до 255 °C
Робоча температура стола	до 110 °C
Файлові формати	STL, OBJ, G–code
Інтерфейси	microSD, USB
Живлення	24 В, блок живлення 350 Вт
Габарити принтера	440×410×465 мм
Вага	≈ 6,9 кг

1.4 Огляд технічних рішень, спрямованих на модернізацію 3D–принтера в лабораторних умовах, та обґрунтування обраного напрямку

Стандартна конструкція 3D–принтера Creality Ender 3 є достатньою для базових завдань, однак у лабораторних умовах часто виникає потреба у:

- підвищенні точності друку;
- розширенні переліку матеріалів, які можна використовувати;
- автоматизації процесу підготовки до друку;
- зменшенні людського фактору при калібруванні;
- зниженні шумності та підвищенні надійності.

Для цього розглядаються різні напрями модернізації, які можна реалізувати в лабораторних умовах без значних витрат.

У таблиці 1.2 наведено основні технічні рішення, що застосовуються користувачами для покращення характеристик Ender 3, а також їх вплив на якість друку. Для лабораторних умов важливо досягти стабільного та передбачуваного друку при мінімальних витратах часу на підготовку. Найбільш критичними є:

- перша шарова адгезія (рівність столу),
- сумісність із різними матеріалами (PLA, PETG, ABS),
- стабільність геометрії друкованих деталей.
- Найбільш доцільними модернізаціями вважаються:
- встановлення датчика автонівелювання (BLTouch) – усуває потребу у ручному калібруванні;
- заміна хотенда на all–metal – дозволяє друкувати матеріали з підвищеною температурою плавлення;
- покращення рами (підсилення осі Z) – зменшує вібрації при друку високих моделей;
- створення простого закритого кожуха – дозволяє друкувати ABS без деформацій.

Таблиця 1.2 – Пропозиції щодо покращення характеристик 3D принтера Ender3

№	Модернізація	Суть технічного рішення	Переваги	Недоліки
1	Автоматичне рівнювання стола (BLTouch або аналог)	Додавання датчика, що вимірює висоту платформи та автоматично створює сітку компенсації	Зменшення помилок першого шару, економія часу	Потребує перепрошивки плати, додаткове калібрування
2	Прямий екструдер (Dircct Drivc)	Перенесення екструдера бсзпоссрсдньо на каретку осі X	Друк гнучкими матеріалами, краща точність реверсів	Збільшення маси рухомої частини → можливі вібрації
3	Заміна хотенда на all–metal (Micro–Swiss, E3D V6)	Усунення тефлонової вставки, робота на вищих температурах	Друк ABS, нейлоном, полікарбонатом	Дорожче обслуговування, потребує налаштувань
4	Оновлення плати керування на 32–бітну з безшумними драйверами (TMC2208/2209)	Заміна стандартної плати на сучасну	Зниження шуму, підвищення стабільності	Фінансові витрати, перепрошивка
5	Додаткові підсилюючі елементи рами	Встановлення бокових розкосів або друкованих кріплень	Підвищення жорсткості осі Z, менше вібрацій	Мінімальні витрати, але потребує часу
6	Закритий корпус (енклоужер)	Створення камери з контрольованою температурою	Можливість друку ABS без деформацій	Збільшення габаритів, вартість виготовлення
7	Додаткові датчики (філамент–сенсор, термодатчики)	Контроль наявності філаменту, температури в камері	Автоматизація процесу друку	Потребує інтеграції з платою

Для виконання лабораторних експериментів у кваліфікаційній роботі обрано

комплексний підхід, який передбачає покращення стабільності та розширення функціоналу принтера з мінімальними витратами. Зокрема буде реалізовано:

1. Встановлення автоматичного датчика рівнювання BLTouch, що зменшить час налаштування й підвищить точність першого шару.
2. Заміна стандартного хотенда на all–metal варіант, що дозволить працювати з ABS і PETG у стабільних умовах.
3. Підсилення конструкції осі Z додатковими елементами жорсткості, щоб уникнути вібрацій при друці високих моделей.
4. Створення простого лабораторного енклоужера (закритої камери) для стабілізації температурного режиму.

Такий напрямок модернізації є найбільш раціональним, оскільки:

– не потребує суттєвих фінансових витрат;
– легко реалізується в лабораторних умовах;
– дозволяє отримати помітне покращення якості друку;
– дає можливість експериментувати з різними типами філаментів.

Окремим напрямом даної роботи є розробка комплексу обладнання, яке б дозволяло в лабораторних умовах отримувати філамент для 3D–моделювання з навчально–пізнавальною метою. Основна задача досліджень визначити можливість отримання якісного витратного матеріалу з побутових відходів, а саме пластикових пляшок, яких в країні накопичується дуже багато в результаті життєдіяльності людей. Таким чином буде вирішена не тільки науково–пізнавальна складова в учбовому процесі, а й розвиватиметься свідоме раціональне споживання з можливістю покращувати екологічний стан в країні.

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Розробка та принцип дії експериментального обладнання для рециклінгу пластику

В ході експерименту для переробки використовувалися пластикові пляшки різних виробників, що мають різні форми, розміри та відтінки кольорів. Ці характеристики відіграють важливу роль, тому що пластик, що використовується в пляшках, може відрізнятися за складом та добавками, що впливає на його властивості при переробці.

У всіх випадках основним матеріалом пляшок був поліетилентерефталат (PET 1). Цей тип пластику широко застосовується у виробництві упаковки для напоїв і має ряд особливостей:

- Висока міцність та зносостійкість.
- Хороша термопластичність, що робить її придатною для переробки.
- Схильність до гідролітичного розкладання при високій температурі та вологості.
- Можливість зміни хімічних властивостей залежно від присутніх барвників та інших добавок.

Колір пляшок є важливим фактором при переробці, оскільки пофарбовані та прозорі варіанти можуть по–різному реагувати на нагрівання та формування. Зокрема, прозорий PET найчастіше містить менше домішок, ніж кольоровий, що може покращити якість переробленого матеріалу. У ході експерименту було вирішено враховувати ці відмінності під час аналізу отриманих результатів.

Перед переробкою пластикові пляшки проходять кілька етапів підготовки, щоб очистити їх від забруднень, видалити етикетки та клей, а також підготувати до подальшої переробки.

На першому етапі пляшки ретельно промиваються водою для видалення бруду, пилу та залишків рідини. Для покращення якості очищення можна використовувати теплу воду та м'які миючі засоби. Після промивання пляшки промиваються чистою водою та висушуються.

Етикетки видаляються вручну або механічним способом. Ручне зняття – етикетка знімається вручну, якщо вона приклеєна слабким клеєм.Однак після зняття етикетки на поверхні пляшки часто залишається клей. Для його видалення можна використовувати такі методи:

- Замочування в гарячій воді (50–70°C) із миючим засобом – допомагає розм'якшити клей та полегшує його видалення.
- Використання спеціальних розчинників (спирт, ацетон, уайт–спірит) ефективно видаляє залишки клею, але застосовується з обережністю, щоб не пошкодити пластик.
- Механічне видалення (металевий або пластиковий скребок, абразивна губка) – використовується для сильного зчеплення клею з поверхнею пляшки.

Найбільш ефективним способом є комбінація гарячої води та механічного видалення, оскільки це знижує ризик пошкодження пластику та забезпечує повне видалення клею.

Після видалення етикеток горловина пляшки підключається до спеціального адаптера, який з'єднується з компресором. Усередині пляшки створюється тиск 15–18 psi (1,04–1,24 бар). Цей процес використовується для:

- Випрямлення деформованих пляшок перед подальшою переробкою.
- Перевірка цілісності пластику перед переробкою.

Далі підготовлені пляшки переходять до наступного етапу переробки – теплова обробка пляшок

Після надування пляшок до тиску 15–18 psi (1,04–1,24 бар), без скидання тиску, вони піддаються тепловому впливу за допомогою будівельного фена.

Температура фена встановлюється відповідно до температури деформації PET–пластику, яка зазвичай знаходиться в діапазоні 70–120°C. У процесі нагрівання пластик розм'якшується, і пляшка починає змінювати свою форму.

Основна мета цього етапу:

- Випрямлення нерівностей та складок, що виникають після збирання та зберігання пляшок.
- Попереднє формування, що робить подальшу переробку простіше та ефективніше.
- Підвищення однорідності матеріалу, оскільки нагрівання дозволяє пластмасі рівномірно розподілятися під тиском.

Завдяки внутрішньому тиску пляшка стає рівною, що полегшує наступні процеси.

У процесі експерименту використовувалося таке устаткування:

Портативний акумуляторний компресор Xiaomi Mi Portable Air Pump 2

Цей компактний компресор використовувався для подачі стисненого повітря до пляшок перед їх термічною обробкою. Його переваги:

- Автономна робота завдяки вбудованому акумулятору.
- Можливість точного регулювання тиску, що є важливим для рівномірного випрямлення пляшок.
- Компактність та зручність у використанні.

Технічний фен Bosch Professional GHG

Використовувався для нагріву PET–пляшок з метою їхнього попереднього формування. Основні характеристики:

- Можливість регулювання температури, що дозволяє підлаштовуватись під температуру деформації PET.
- Висока потужність нагріву, що забезпечує швидке та рівномірне прогрівання матеріалу.
- Надійність та довговічність, характерні для професійного інструменту.

Для переробки підготовленого PET–пластику використовувалася установка власної розробки. Також у процесі роботи використовувалися різні дрібні інструменти для обслуговування та налаштування установки, такі як викрутки, плоскогубці та ключі. Ці інструменти необхідні підтримки роботи обладнання та забезпечення його ефективної експлуатації.

Експериментальна установка для переробки пластикових пляшок є комплексним пристроєм, що складається з декількох функціональних модулів, кожен з яких виконує свою роль в процесі термоформування пластику. Конструкція установки забезпечує стабільність, точний контроль параметрів нагріву та рівномірнс формування філамснту.

Установка призначена для переробки підготовленого PET–пластику методом теплової деформації. Вона складається з кількох взаємопов'язаних компонентів, які забезпечують ефективну переробку пластику у формі філаменту чи трубчастого матеріалу. Установка розроблена для проведення дослідних досліджень та оптимізації технологічного процесу переробки пластику.

Як основа конструкції використовується ДСП–плита, вирізана розміром 15×35 см. Основа служить платформою, на якій закріплені всі робочі елементи установки, забезпечуючи їх стійкість та зручність експлуатації.

Нагрівальна частина складається з двох основних компонентів:

- Сам нагрівач, який забезпечує температурне нагрівання пластику.
- Знімне сопло, через яке виходить розм'якшений пластик. Завдяки можливості зміни сопла, можна регулювати вихідний діаметр філаменту, що формується. Такий підхід дозволяє експериментувати з різними параметрами переробки.

Після виходу із сопла розігрітий та сформований пластик повинен стабілізуватися та намотуватися на барабан. Намотуючий барабан забезпечує рівномірний натяг та акуратне розміщення отриманого філаменту.

Термоконтролер відіграє найважливішу роль у підтримці стабільної температури нагрівального пристрою:

- Він контролює температуру нагрівання пластику,
- Забезпечує точне налаштування робочого діапазону,
- Захищає нагрівальний елемент від перегріву, збільшуючи термін служби всієї установки.

Для забезпечення енергією нагрівального елементу та всіх приводних частин установки використовують блок живлення потужністю 60 Вт, який виконує функцію перетворення напруги.

- Перетворює 220 В, 16 А змінного струму в 12 В, 5 А постійного струму,
- Забезпечує стабільне енергопостачання всіх електричних компонентів,
- Захищає систему від стрибків напруги.

Основні складові частини пристрою включають:

1.Блок живлення S–60–12 (рис.2.1) – це імпульсне джерело живлення, призначене для перетворення мережевої напруги 220 В змінного струму в 12 В постійного струму з вихідним струмом до 5 А. Він широко застосовується для живлення різного обладнання, в тому числі в системах автоматизації, світлодіодному освітленні, 3D–принтерах та інших пристроях.

Основні характеристики S–60–12

- Тип: Імпульсний блок живлення
- Вхідна напруга: AC 110–220 В (змінний струм), 50/60 Гц
- Вихідна напруга: DC 12 В (постійний струм)
- Максимальний вихідний струм: 5 А
- Потужність: 60 Вт
- ККД: Близько 80–85%
- Охолодження: Пасивне (перфорація корпусу для відведення тепла)
- Захист:
- Від короткого замикання

- Від навантаження
- Від перенапруги
- Конструкція та принцип роботи
- Корпус блоку живлення виконаний із металу з перфорацією для пасивного охолодження. Усередині розташовані високочастотні компоненти:

Випрямний міст – перетворює змінну напругу на постійну. Фільтруючі конденсатори – згладжують пульсацію напруги.

Імпульсний трансформатор – знижує напругу до 12 В.

Вихідний стабілізатор – підтримує стабільний рівень напруги.

Переваги S–60–12:

- Компактність – невеликі розміри дозволяють легко інтегрувати установки.
- Стабільність роботи – підтримує 12 В навіть за зміни вхідної напруги.
- Захист від перевантажень – продовжує термін служби як самого блоку, так і пристроїв, що підключаються.
- Простота підключення – стандартні гвинтові клеми полегшують монтаж.

Застосування в установці для переробки пластику

В експериментальній установці S–60–12 використовується для живлення нагрівального елемента, термоконтролера та інших електронних компонентів, забезпечуючи стабільну роботу при напрузі 12 В та максимальному струмі 5 А.



Рисунок 2.1 – блок живлення S–60–12

MK8 Extrusion V5 J–head Hotend Heating Aluminum Block (рис.2.2) – це алюмінієвий нагрівальний блок, який використовується у 3D–принтерах та екструзійних системах. Він відповідає за розігрів пластику до потрібної температури перед його екструзією. Цей компонент відіграє ключову роль у процесі плавлення та подачі нитки пластику (філаменту).

Основні характеристики

Тип: Нагрівальний блок для хотенду (Hotend Heating Block)

Матеріал: Алюміній (забезпечує хорошу теплопровідність та рівномірний розподіл температури)

Розміри: 20×20×10 мм

Сумісність: MK8, V5, J–hcad

Нагрівач: Керамічний нагрівальний елемент 12V/24V, 40W

. Конструкція нагрівального блоку

- Алюмінієвий корпус – основний елемент, який служить для утримання нагрівального слсмснта та тсрмопари. Він забсзпсчує рівномірний розподіл тепла та швидке нагрівання.
- Керамічний нагрівач (12V/24V, 40W) – вставляється в один із бічних отворів нагрівального блоку.

При подачі напруги він розігрівається та передає тепло на алюмінієвий корпус. Потужність 40W забезпечує швидке нагрівання та підтримання температури. Термістор контролює температуру нагрівання та передає дані в термоконтролер. Використовується для автоматичного регулювання температури та запобігання перегріву.

Фіксуючі гвинти – забезпечують надійне кріплення нагрівача та термістора усередині блоку.

Вихідний отвір під сопло – у нижній частині блоку розташований отвір з різьбленням для кріплення латунного сопла (зазвичай з діаметром від 0.2 мм до 1.5 мм).



Рисунок 2.2 – Нагрівальний блок MK8 Extrusion V5 J–head Hotend Heating Aluminum Block

Терморегулятор W3230 (рис.2.3) – це цифровий контролер температури, призначений для вимірювання та регулювання температур у діапазоні від –60°C до +500°C.

Основні характеристики:

Діапазон вимірювання температури: від –60°C до +500°C

Напруга живлення: 12 В

Точність виміру: ±0,1°C

Датчик температури: термопара типу K з довжиною дроту 45 см

Розміри пристрою: 79 мм x 43 мм x 26 мм

Розмір монтажного отвору: 72 мм x 39 мм

Функціональні можливості:

Режими роботи: нагрівання (H) та охолодження (C)

Гістерезис, що настроюється: від 0,1°C до 30°C

Верхня та нижня межі температури: регулюються користувачем

Корекція температури: від –10 ° C до +10 ° C

Затримка увімкнення реле: від 0 до 10 хвилин

Сигналізація перевищення заданої температури

Блокування налаштувань для запобігання випадковим змінам параметрів



Рисунок 2.3 – Терморегулятор W3230

Мотор JGB37–520 (рис.2.4–2.5) є мініатюрним висококрутним моментним редуктором з планетарним механізмом, призначений для роботи при напрузі 12 В постійного струму. Він оснащений металевими шестернями, що підвищує його довговічність та стійкість до зносу.

Основні характеристики:

Напруга живлення: 12 В постійного струму, що забезпечує сумісність з більшістю малопотужних систем.

Вихідна швидкість: 7 об/хв, що підходить для завдань, що потребують повільного та стабільного обертання.

Крутний момент: Високий, що дозволяє передавати значні зусилля за низької швидкості обертання, що важливо для точних та надійних процесів переробки.

Тип редуктора: Металевий планетарний редуктор, який забезпечує високу ефективність передачі потужності за низьких втрат на тертя.

Діаметр корпусу: 37 мм, що робить його компактним та придатним для інтеграції в обмежені простори.

Даний двигун забезпечує стабільну роботу при високих навантаженнях і ідеально підходить для установки в механізми, де необхідна точність і довговічність, такі як барабан намотування в установках переробки пластику.

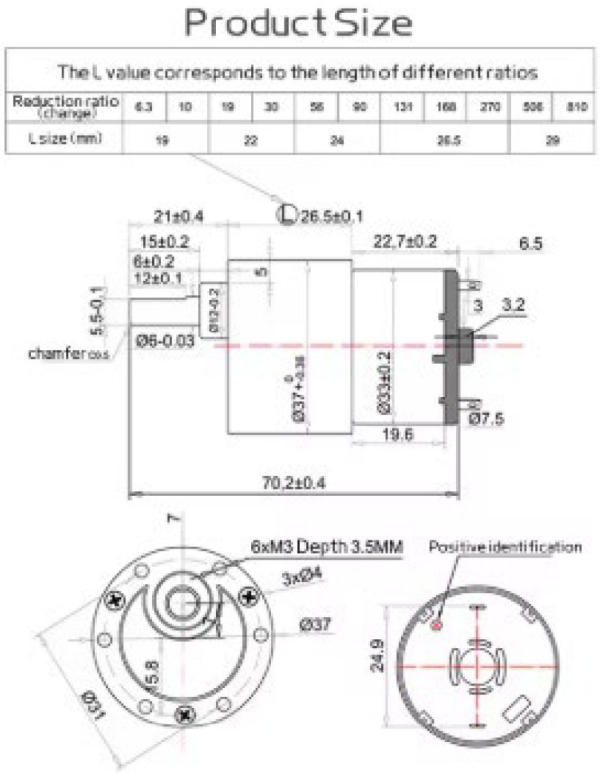


Рисунок 2.4 – Приєднувальні та габаритні розміри мотору JGB37–520

Мініатюрний привод N20 (рис.2.5) з напругою 12V і металевим корпусом використовується в механізмі, що використовується для нарізання пляшок на штабу. Він має швидкість обертання 300 об/хв та компактні розміри: діаметр 12 мм, висота 26 мм, загальна довжина 36 мм. Вал двигуна має діаметр 3 мм та довжину 10 мм, що робить його зручним для встановлення у механізми з обмеженим простором.

Принципову схему з’єднання всіх елементів наведено на рисунку 2.6.

Всі частини корпусів установки, а також багато інших деталей були надруковані на 3D–принтері з ABS–пластика (рис.3.7). Цей матеріал вибраний через високу термостійкість (до 100°C), механічну міцність і стійкість до впливу

хімічних речовин, що робить його ідеальним для роботи в умовах нагрівання та механічних навантажень.



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд мініатюрного приводу N20

Надруковані деталі:

Корпус пристрою для нарізання пластикові штаби– захищає різальний механізм та стабілізує його роботу.

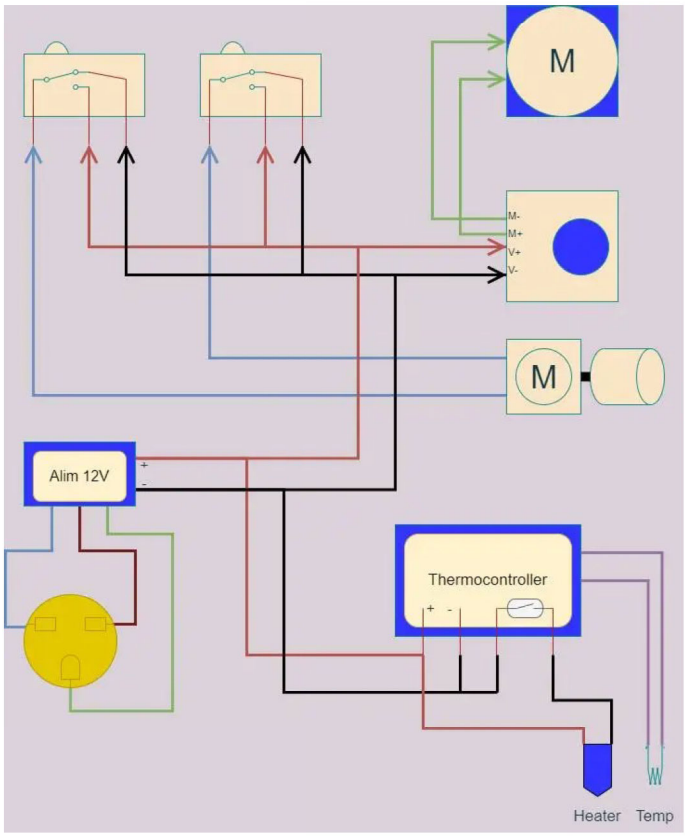


Рисунок 2.6 – Принципова електрична схема установки по переробці пластику

Намотуючий барабан з касетою – забезпечує рівномірне намотування філаменту, запобігаючи сплутуванню.

Корпус термоконтролера – фіксує та захищає W3230, забезпечуючи зручний доступ до налаштувань.

Багато інших деталей, включаючи кріплення, напрямні, захисні кожухи та елементи конструкції, що покращують стабільність роботи установки.

Використання 3D–друку дозволило створити функціональні та надійні деталі, адаптовані під специфічні завдання переробки пластику. ABS–пластик гарантує довговічність та стійкість всіх компонентів.

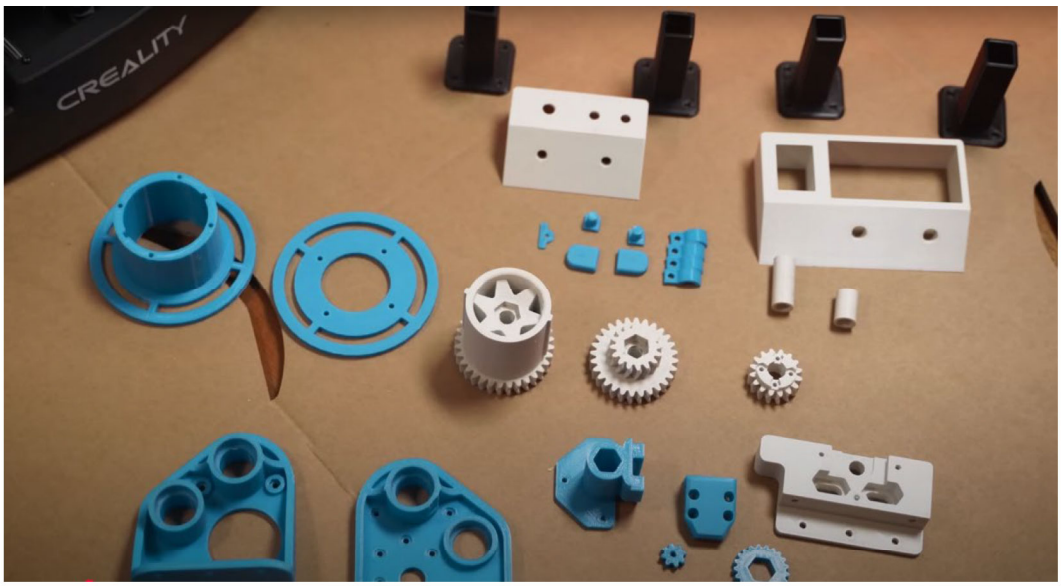


Рисунок 2.7 – Основні елементи установки роздруковані на 3D принтері

2.2 Розрахунок відкритої передачі намотувального пристрою

Для забезпечення процесу рівномірного намотування філаменту на котушку в конструкції установки передбачено використання електромеханічного приводу. Вибір електродвигуна здійснювався виходячи з необхідності забезпечення

високого крутного моменту при низькій швидкості обертання, що є критичним для стабілізації процесу витягування пластикової нитки.

Як привід обрано мотор–редуктор JGB37–520.

Основні технічні характеристики двигуна:

- Напруга живлення: 12 В;
- Номінальна швидкість обертання вихідного валу: $n = 7$ об/хв;
- Тип редуктора: планетарний металевий.

Визначимо кутову швидкість валу двигуна (ω):

$$\omega = \frac{\pi * n}{30} = \frac{3.1416 * 7}{30} \approx 0.733 \text{ рад/с} \quad (2.1)$$

Орієнтовна потужність двигуна даного типу становить $P = 2$ Вт (0.002 кВт).

Розрахуємо крутний момент (T) на валу двигуна:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{2}{0.733} \approx 2.73 \text{ Н} * \text{м} \quad (2.2)$$

Отриманий крутний момент є достатнім для подолання сил тертя та опору натягу пластикової штаби при її формуванні.

Розрахунок зубчастої передачі на міцність

Передача крутного моменту від двигуна до барабана здійснюється через триступінчасту шевронну передачу, деталі якої виготовлені методом 3D–друку з ABS–пластику. Використання шевронного профілю (V–подібного зуба) на всіх трьох шестернях забезпечує повну взаємну компенсацію осьових зусиль у зачепленні, що є необхідною умовою для забезпечення довговічності та надійності пластикового корпусу редуктора.

Вихідні дані передачі (згідно з вимірами розробленої 3D–моделі):

- Модуль зачеплення: $m = 1.6$ мм;

- Число зубів шестерні двигуна (z_1): 16;
- Число зубів Блок–шестерня, вхід/низ (z_{2a}): 28;
- Число зубів Блок–шестерня, вихід/верх (z_{2b}): 16;

Число зубів шестерні валу барабана (z_3): 32.

Визначимо геометричні параметри передачі.

1. Передавальне число (u):У даній кінематичній схемі проміжна шестерня не змінює передавальне число, яке залежить від відношення зубів веденої та ведучої ланок:

Передавальне число 1–го ступеня (Двигун –Блок):

$$u_1 = \frac{z_{2a}}{z_1} = \frac{28}{16} = 1.75 \quad (2.3)$$

Передавальне число 2–го ступеня (Блок –Барабан):

$$u_2 = \frac{z_3}{z_{2b}} = \frac{32}{16} = 2 \quad (2.4)$$

Загальне передавальне число:

$$u_{zag} = u_1 * u_2 = 1.75 * 2 = 3{,}5$$

2. Ділильні діаметри шестерень:

Ділильний діаметр шестерні двигуна ($z_1 = 16$):

$$d_1 = m * z_1 = 1.6 * 16 = 25.6 \text{ мм} \quad (2.5)$$

3.Ділильні діаметри проміжної блок-шестерні:

Вхідний вінець (нижній, $z_{2a} = 28$):

$$d_{2a} = m * z_{2a} = 1.6 * 28 = 44.8 \text{ мм} \quad (2.6)$$

Вхідний вінець (нижній, $z_{2b} = 16$):

$$d_{2b} = m * z_{2b} = 1.6 * 16 = 25.6 \text{ мм} \quad (2.7)$$

4. Ділильний діаметр шестерні валу барабана ($z_3 = 32$):

$$d_3 = m * z_3 = 1.6 * 32 = 51.2 \text{ мм} \quad (2.8)$$

5. Розрахунок міжосьових відстаней (a_ω):

1. Відстань "Двигун - Блок-шестерня":

$$a_{\omega 1} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{25.6 + 44.8}{2} = 35.2\text{мм} \quad (2.7)$$

2. Відстань "Блок-шестерня - Вал барабана":

$$a_{\omega 2} = \frac{d_{2b} d_3}{2} = \frac{25.6 + 51.2}{2} = 38.4\text{мм} \quad (2.8)$$

Перевірка на міцність: Визначимо колову силу (F_t) в зачепленні:

$$F_t = \frac{2*T*1000}{d_1} = \frac{2*2.73*1000}{25.6} \approx 213.28\text{мм} \quad (2.9)$$

Отримане значення навантаження ($F_t \approx 213\ H$) є допустимим для зубів з модулем $m = 1.6$ мм, виготовлених з ABS–пластику (при заповненні 100%). Міцність зубів забезпечена.

2.3 Розрахунок валу намотувального барабана

Вал намотувального пристрою відчуває навантаження від натягу філаменту. Виконаємо перевірочний розрахунок на статичну міцність.

Максимальний згинаючий момент (M) виникає від сили натягу нитки. Приймемо силу натягу $F_{nat} = 20$Н (експертна оцінка).Плече прикладання сили (довжина консолі валу) L = 50 мм (0.05 м).

$$M = F_{\{nat\}} * L = 20 * 0.05 = 1\ \text{Н} * \text{м} \quad (2.10)$$

Визначимо необхідний діаметр валу з умови міцності на згин:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{M}{0.1*[\sigma_{iz}]}} \quad (2.11)$$

Для ABS–пластику (вал виготовлено заодно з барабаном) допустиме напруження на згин $[\sigma_{iz}] \approx 25\text{МПа}\ (25 * 10^6\text{Па})$.

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{1}{0.1*25*10^6}} = \sqrt[3]{0.0000004} \approx 0.0074\ \text{м} = 7.4\ \text{мм} \quad (2.12)$$

Фактичний діаметр валу в конструкції становить 10 мм, що перевищує розрахунковий мінімум (10 > 7.4 мм). Геометричні параметри передачі та валу обрані вірно, міцність деталей при заданих навантаженнях забезпечена.

2.4 Розрахунок приводу механізму різання пляшки

Для виконання операції нарізання ПЕТ–пляшки на смугу (філамент) використовується окремий компактний електромеханічний вузол. Головною вимогою до приводу є компактність та достатній крутний момент для протягування матеріалу через ножовий блок.

Вибір електродвигуна

У якості силового агрегату обрано мініатюрний мотор–редуктор N20 (рис. 2.5) з металевим редуктором.

Технічні характеристики двигуна:

- Напруга живлення: 12 В;

- Номінальна швидкість обертання (n_{dv}): 300 об/хв;
- Габаритні розміри корпусу: діаметр 12 мм, висота 26 мм, Вал двигуна має діаметр 3 мм та довжину 10 мм;
- Параметри валу: діаметр 3 мм (D–подібний), довжина 10 мм.

Визначимо кутову швидкість валу двигуна ω_1):

$$\omega_1 = \frac{\pi * n_{dv}}{30} = \frac{3.14 * 300}{30} = 31.4 \text{ рад/с} \quad (2.13)$$

Розрахунок зубчастої передачі різака

Передача руху від двигуна до ріжучого валу здійснюється за допомогою одноступінчастої циліндричної прямозубої передачі. Деталі виготовлені методом 3D–друку.

Вихідні дані передачі (згідно з вимірами 3D–моделей):

- Модуль зачеплення: m = 1.25 мм;
- Число зубів шестерні двигуна (z_1): 8;
- Число зубів колеса різака (z_2): 21.

Визначення передавального числа (u):

$$u = \frac{z_2}{z_1} = \frac{21}{8} = 2.625 \quad (2.14)$$

Визначимо швидкість обертання вихідного валу різака (n_{out}):

$$n_{out} = \frac{n_{dv}}{u} = \frac{300}{2.625} \approx 114.3 \text{ об/хв} \quad (2.15)$$

Це значення швидкості є оптимальним для контрольованого процесу різання, запобігаючи ривкам та застряганню пластику.

Розрахуємо основні розміри шестерень для проектування міжосьової відстані в корпусі.

- Ділильний діаметр шестерні двигуна (d_1):

$$d_1 = m * z_1 = 1.25 * 8 = 10 \text{ мм} \quad (2.16)$$

- Ділильний діаметр колеса різака:

$$d_2 = m * z_2 = 1.25 * 21 = 26.25 \text{ мм} \quad (2.17)$$

- Міжосьова відстань (a_ω):

$$a_\omega = \frac{d_1+d_2}{2} = \frac{10+26.25}{2} = 18.125 \text{ мм} \quad (2.18)$$

Для перевірки відповідності надрукованих деталей розрахунковим даним, визначимо зовнішні діаметри (D_a):

- Шестерня (z_1):

$$D_{a1} = m(z_1 + 2) = 1.25(8 + 2) = 12.5 \text{ мм} \quad (2.19)$$

- Колесо (z_2):

$$D_{a2} = m(z_2 + 2) = 1.25(21 + 2) = 28.75 \text{ мм}. \quad (2.20)$$

Розрахована передача забезпечує зниження обертів у 2.625 рази та відповідне збільшення крутного моменту, що дозволяє компактному двигуну N20 ефективно виконувати роботу з нарізання стрічки. Геометричні параметри ($a_\omega \approx 18.1$мм) враховані при проектуванні корпусу різака.

3 ДОСЛІДНО–ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз типу пластику та відходів призначених для рециклінгу

В лабораторії кафедри металургійного обладнання встановлено встановлено досить просту в обслуговуванні та невибагливу щодо витратних матеріалів модель 3–D принтеру типу GRABER i3, яка якнайкраще підходить для проведення експериментальних досліджень, щодо можливості рециклінгу пластикових відходів в лабораторних умовах.

За численними дослідженнями людство щоденно споживає майже 60 млн. пластикових пляшок [10]. Таким чином постає закономірне питання їхньої утилізації. В час бурхливого розвитку 3D друку, якнайкраща альтернатива утилізації пластикових пляшок – є їхній рециклінг у витратний матеріал – філамент

У світі існує близько 150 видів пластмас, і для надання їм необхідних властивостей додають до 20 різних компонентів, більшість з яких є токсичними.

Типи пластику та їхні коди були визначені "Спілкою пластикової промисловості" (SPI), і ця система маркування широко використовується для позначення пакувальних матеріалів. У багатьох країнах таке маркування є обов’язковим та наведене на рисунку 3.1 [11].

Для ефективного сортування та переробки корисно знати сім основних видів пластику, які найчастіше застосовуються для пакування продукції.

Поліетилентерефталат (PET або ПЕТ) (рис.3.1 а) – це один із найпоширеніших термопластичних полімерів, що використовується для виробництва упаковки, особливо пляшок для напоїв. Він відомий своєю прозорістю, міцністю та легкістю, а також хорошими бар'єрними властивостями щодо газів і вологи.

Основні властивості:

- Висока прозорість та механічна міцність;
- стійкість до вологи та газів;

- легкість і жорсткість;
- добре піддається переробці;
- хімічна стійкість, але чутливість до високих температур;

Сфера застосування:

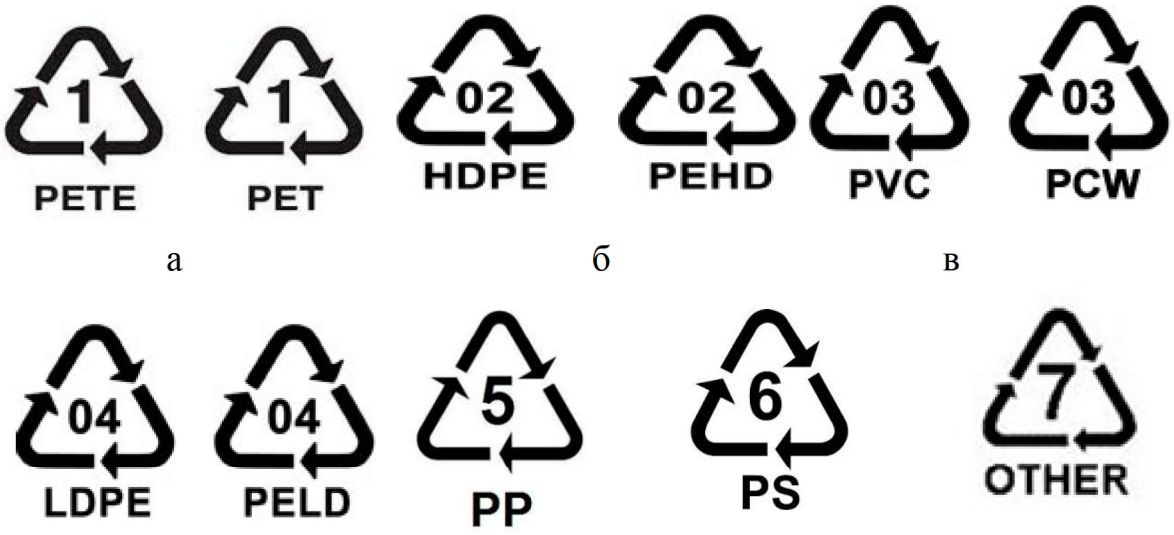
- пляшки для води, соків, газованих напоїв;
- контейнери для харчових продуктів (соуси, йогурти, упаковка для м'яса, овочів);
- упаковка для косметики, ліків та побутової хімії;
- синтетичні волокна (поліестер для одягу, килимів) ;
- плівки, з яких виготовляють термоусадкову упаковку .

PET довгий час вважався безпечним пластиком для харчових продуктів, але останні дослідження виявили можливе виділення бісфенолу А (BPA) та фталатів при нагріванні або багаторазовому використанні тари.

Нагрівання або тривале зберігання PET–пляшок під сонцем може спричинити вивільнення токсичних речовин у рідину. Вживання продуктів, що контактували з PET при високих температурах, може бути пов’язане з ризиком розвитку гормональних порушень, серцево–судинних захворювань і навіть онкологічних хвороб.

PET активно переробляється і використовується для виробництва вторинних товарів, таких як синтетичні волокна, нові пластикові пляшки, пакувальні матеріали. Однак, для ефективної переробки важливо правильно сортувати цей пластик.

Поліетилен високої щільності (HDPE – High–Density Polyethylene) (рис.3.1 б) – це термопластичний полімер, який відрізняється високою міцністю, жорсткістю та стійкістю до хімічних речовин. Він має меншу гнучкість, ніж поліетилен низької щільності (LDPE), але є міцнішим і стійкішим до механічних навантажень.



а б в

г д є ж

Рисунок 3.1 – Графічне маркування різних типів пластику: а – поліетилен терефталат (PET або ПЕТ); б – поліетилен високої щільності (PEHD, HDPE); в – полівінілхлорид (PVC або ПВХ); г – поліетилен низької щільності (PELD, LDPE); д – поліпропілен (PP, ПП); є – полістирол (PS, ПС); ж – пластик типу (Other)

Основні властивості:

- висока міцність і жорсткість;
- стійкість до вологи та хімічних речовин;
- відсутність токсичних домішок;
- добре піддається переробці;
- стійкий до ультрафіолетового випромінювання (при додаванні спеціальних стабілізаторів).

Застосування:

- пляшки для молока, соків, олії;
- каністри для побутової хімії, мийних засобів, шампунів;
- труби для водопостачання та газопроводів;
- пластикові ящики, контейнери, кришки для пляшок;
- пакети та мішки для продуктів;

– іграшки та меблі.

HDPE вважається одним із найбезпечніших видів пластику для харчових продуктів, оскільки не виділяє токсичних речовин при нормальних умовах використання. Його можна повторно використовувати та переробляти, що робить цей матеріал більш екологічним порівняно з багатьма іншими видами пластмас.

Полівінілхлорид (PVC або ПВХ)) (рис.3.1 в) – це один із найстаріших і найпоширеніших видів пластиків. Його виготовляють із вінілу та хлору, що робить цей матеріал міцним, довговічним і стійким до вологи та хімічних речовин. PVC може бути як жорстким, так і гнучким, залежно від доданих пластифікаторів.

Основні властивості:

- висока міцність і довговічність;
- стійкість до вологи, кислот, лугів;
- гнучкість або жорсткість (залежно від складу) ;
- добрі ізоляційні властивості;
- легкість у виробництві

Застосування:

- труби для водопостачання, каналізації, будівельні матеріали;
- віконні рами, лінолеум, шпалери Харчова плівка, пакування для таблеток і ліків;
- банківські картки, пластикові двері, жалюзі;
- штучна шкіра, дитячі іграшки;
- оболонка електропроводів.

Безпечність та екологічні аспекти:

PVC є одним із найбільш токсичних видів пластику. У його складі можуть міститися шкідливі добавки, зокрема фталати та свинець. При нагріванні або горінні ПВХ виділяє діоксини – небезпечні канцерогенні речовини, що можуть накопичуватися в організмі та викликати серйозні захворювання.

Через складний хімічний склад переробка ПВХ є проблематичною. Хоча теоретично цей пластик можна вторинно використовувати, у багатьох країнах його переробка економічно невигідна, а спалювання спричиняє забруднення довкілля.

Поліетилен низької щільності (LDPE – Low–Density Polyethylene)) (рис.3.1 г) – це м'який, гнучкий і водночас міцний пластик, що добре витримує механічні навантаження. Він має високу стійкість до вологи та хімічних речовин, що робить його ідеальним для виробництва пакувальних матеріалів.

Основні властивості:

- гнучкість та еластичність;
- стійкість до вологи та хімічних речовин;
- висока ударостійкість;
- погана прозорість (часто має матову структуру);
- піддається переробці, але складніше, ніж PET або HDPE;

Застосування:

- поліетиленові пакети, мішки для сміття;
- харчова плівка, упаковка для хліба та заморожених продуктів;
- пластикові пляшки для косметики та миючих засобів;
- труби, кабельна ізоляція;
- внутрішнє покриття картонних стаканчиків для напоїв.

Безпечність та екологічні аспекти:

LDPE вважається відносно безпечним для харчових продуктів, оскільки не містить токсичних домішок, таких як бісфенол А (BPA) чи фталати. Однак при нагріванні може виділяти шкідливі речовини, тому не рекомендується використовувати його для гарячої їжі та напоїв.

Переробка LDPE є складнішою порівняно з іншими видами поліетилену (PET, HDPE), оскільки цей пластик має низьку щільність і легко забруднюється. Проте він може бути повторно використаний для виробництва пакетів, плівки та деяких будівельних матеріалів.

Поліпропілен (PP – Polypropylene)) (рис.3.1 д)– це термопластичний полімер, який відрізняється високою міцністю, термостійкістю та хімічною інертністю. Завдяки цим властивостям він широко використовується у виробництві харчової упаковки, медичних виробів та побутових товарів.

Основні властивості:

- висока термостійкість (витримує кип'ятіння);
- стійкість до жирів, кислот і лугів;
- висока міцність і жорсткість;
- легкість та стійкість до ударів;
- добре піддається переробці;

Застосування:

- контейнери для харчових продуктів (бокси, стаканчики для йогуртів, пляшки);
- кришки для пляшок, упаковка для соусів, кетчупів;
- медичні шприци, пробірки, захисні маски;
- автомобільні деталі (бампери, панелі) ;
- тканини (нетканий поліпропілен у масках, сумках, меблях) ;
- труби, будівельні матеріали.

Поліпропілен вважається одним із найбезпечніших пластиків для харчових продуктів, оскільки не містить шкідливих речовин, таких як BPA або фталати. Він добре переносить нагрівання, що дозволяє використовувати його для контейнерів, які можна мити в посудомийній машині або нагрівати в мікрохвильовці.

PP добре піддається переробці, що робить його екологічно прийнятнішим за багато інших видів пластику. Проте через високу хімічну стійкість він довго розкладається в природному середовищі.

Полістирол (PS – Polystyrene)) (рис.3.1 є) – це термопластичний пластик, який використовується в різних галузях завдяки своїй низькій вартості, легкості та

здатності до легкої обробки. Полістирол може бути як твердим, так і пінопластовим (псевдопластик), в залежності від технології виробництва.

Основні властивості:

- легкий та прозорий матеріал;
- дешевий і легко оброблюваний;
- добре піддається фарбуванню та нанесенню друку;
- мала механічна міцність (легко ламається);
- погано витримує вплив ультрафіолетових променів і високих температур.

Застосування:

- упаковка для продуктів харчування (контейнери для їжі, одноразові стаканчики та тарілки);
- пластикові ложки, виделки та ножі;
- прозорі пластикові пакети, коробки;
- виготовлення дитячих іграшок, канцелярських товарів;
- пінопласт (для ізоляційних матеріалів, упаковки, будівництва);
- декоративні елементи та упаковка для побутової техніки.

Полістирол є менш безпечним у порівнянні з іншими пластиками, особливо в формі пінопласту. При спалюванні або нагріванні він може виділяти токсичні речовини, такі як стирол, який є потенційно канцерогенним. Крім того, полістирол не дуже стійкий до впливу високих температур, тому не рекомендується використовувати його для гарячих продуктів чи напоїв.

Пінопласт з полістиролу важко переробляється і є одним із основних забруднювачів навколишнього середовища, оскільки він не розкладається швидко в природі і може тривалий час забруднювати екосистеми.

Категорія "Інше" (рис.3.1 ж) включає в себе всі види пластику, які не підпадають під визначення типів, позначених іншими кодами за системою SPI (Спілка пластикової промисловості). Це включає в себе різноманітні комбінації

пластиків, а також нові та менш поширені пластмаси, які мають особливі властивості або використовуються для специфічних застосувань. Найбільш відомими пластиками в цій категорії є полікарбонат (PC), поліамід (PA), акрил (PMMA) та інші композитні матеріали.

Основні властивості:

- властивості залежать від конкретного матеріалу в категорії "Інше";
- можуть мати високу міцність і термостійкість;
- деякі з них можуть бути більш стійкими до впливу ультрафіолету або агресивних хімічних речовин;
- зазвичай добре піддаються обробці та фарбуванню.

Застосування:

Полікарбонат (PC) – використовується для виготовлення прозорих панелей, вікон, захисних екранів (наприклад, у мобільних телефонах), дисків для комп'ютерних іграшок, а також для медичних інструментів.

Поліамід (PA) – відомий також як нейлон. Використовується для виготовлення текстильних волокон, технічних деталей (шестерні, підшипники) та автомобільних компонентів.

Акрил (PMMA) – відомий як органічне скло, застосовується для виготовлення рекламних конструкцій, віконних панелей, декоративних елементів.

Полиуретан (PU) – застосовується для виробництва гнучких та жорстких пінопластів, ізоляційних матеріалів і товарів для здоров'я (наприклад, взуття).

Пластики з категорії "Інше" можуть мати різні характеристики і, відповідно, різний рівень безпеки.

Наприклад, полікарбонат (PC) містить в собі бісфенол А (BPA), який може виділятися при нагріванні, що робить цей матеріал менш безпечним для контакту з харчовими продуктами. Нейлон (PA) може містити шкідливі добавки, якщо його неправильно обробляти. Акрил та полиуретан мають обмежену стійкість до УФ–

випромінювання, тому можуть руйнуватися під сонцем або в агресивних середовищах.

Щодо переробки, ці пластики мають різний рівень складності впереробці залежно від складу та додаткових компонентів, але загалом багато з них можуть бути перероблені за допомогою спеціальних процесів.

Проаналізувавши все вищесказане дійшли висновку, що для відпрацювання технологічного процесу рециклінгу матеріалу пластикових пляшок, з огляду на його технологічність та розповсюдженість, як найкраще підходить пластик типу PET–1

3.2 Теоретичне підґрунтя створення лабораторного обладнання для рециклінгу пластикових пляшок

З урахуванням широкого застосування процесів прокатки та волочіння у металургійній та переробці пластикової продукції, з'явилася необхідність створення пристрою, який інтегрує ці процеси для обробки пластикової штаби. Основна ідея полягає у використанні нагрівального елемента, через який прокатуватиметься пластикова штаба з метою покращення пластичності матеріалу та досягнення заданих характеристик кінцевого продукту.

Процес прокатки пластику через нагрівальний елемент має кілька ключових переваг, включаючи підвищення точності регулювання товщини штаби, покращення механічних властивостей матеріалу за рахунок оптимального розподілу температури та мінімізацію дефектів у процесі виробництва. Нагрівання пластику перед його пропусканням через систему, що за своїм функціональним призначенням, якнайбільше приближена до волочильного інструменту (рис.3.2), дозволяє знизити опір деформації, що сприяє отриманню більш рівномірної та якісної продукції.

Важливим аспектом розробки пристрою є визначення параметрів, таких як температура нагріву, швидкість витягування штаби та тиск, які мають бути точно налаштовані для досягнення бажаних характеристик матеріалу.

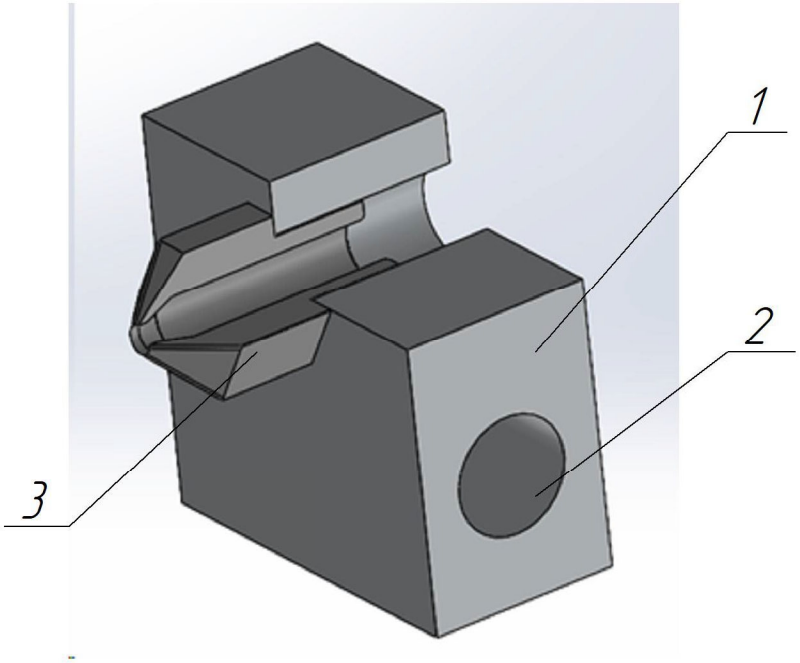


Рисунок 3.2 – 3D модель запропонованого пристрою для рециклінгу пластикової штаби: 1 – корпус, 2 – нагрівальний елемент, 3 – сопло (волочильний інструмент)

Точні розрахунки та контроль цих параметрів необхідні для запобігання перегріву матеріалу та його пошкодження, а також забезпечення стабільності процесу на всіх етапах.

Система управління температурою та рівномірний розподіл тепла по робочій поверхні пристрою відіграють ключову роль у покращенні якості прокатки. Пропонований пристрій сприятиме підвищенню ефективності процесу переробки пластмас, поліпшенню якості продукції та зниженню виробничих витрат.

Керуючись теорію рівності об'ємів розглянемо схему 3D моделі технологічного процесу рициклінгу пластику, яку наведено на рисунку 3.3.

Аналіз схеми вказує на те, що за аналогією з рівностей об'ємів при прокатці та волочінні можна скористатися рівністю площ, а саме площа матеріалу, що

входить до сопла має дорівнювати площі поперечного перерізу матеріалу що виходить з сопла:

$$S_Ш = S_Ф, мм^2 \quad (3.1)$$

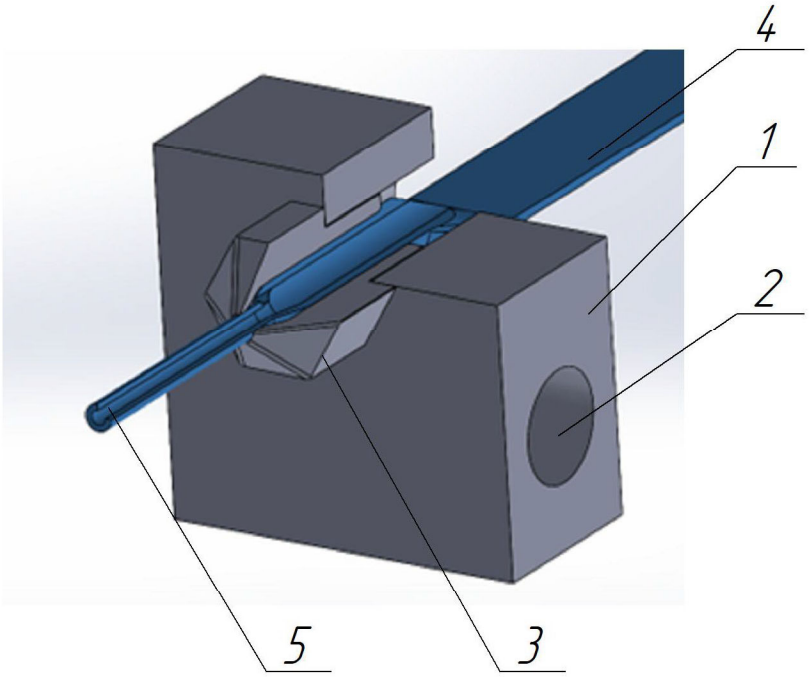


Рисунок 3.3 – 3D модель запропонованого пристрою для рециклінгу пластикової штаби: 1 – корпус, 2 – нагрівальний елемент, 3 – сопло (волочильний інструмент), 4 прямокутна пластикова штаба на вході до сопла, 5 філамент круглого поперечного перерізу при виході з сопла

Таким чином, якщо в сопло входить штаба прямокутного поперечного перерерізу вона має площу поперечного перерізу, яка розраховується за формулою:

$$S_ш = a \cdot t, мм^2 \quad (3.2)$$

де a – ширина штаби, мм

t – товщина штаби, мм

а площа філаменту розраховується як :

$$S_{ф}=\frac{\pi*d^2}{4},мм^2 \quad (3.3)$$

де d – діаметр філаменту. Приймаємо рівним вихідному діаметру сопла, мм

Вирішуючи спільно ці два рівняння можна визначити ширину пластиковой штаби за умови стовідсоткового заповнення профіля філаменту:

$$a=\frac{\pi d}{4t},мм \quad (3.4)$$

так як в екпериментальній частині буде використовуватися пластикова пляшка з товщиною стінки 0,4 мм, а вихідний діаметр сопла дорівнює 1,5 мм тоді ширина пластиковой штаби дорівнює:

$$a=\frac{3,14\cdot 1,5^2}{4\cdot 0,3}=4,1 \text{ мм}$$

З огляду на те, що процесс буде відбуватися постійним підігрівом але планується без розплавлення пластику стовідстокового заповнення вихідного профілю сопла досягти буде неможливо, тому приймаємо початкову ширину штаби 4 мм

3.3 Аналіз можливих перешкод для відпрацювання технологічного процесу рециклінгу пластмас в лабораторних умовах

Процес рециклінгу пластмас є важливою складовою стратегії зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, однак він стикається з рядом

труднощів та викликів, особливо у лабораторних умовах, де завжди є потреба в точності, контролі і спеціалізованих технологіях. Серед основних проблем, що виникають при лабораторному рециклінгу пластмас, можна виокремити такі:

Однією з основних проблем є різноманітність типів пластмас і їх комбінацій у відходах. Багато пластикових виробів складаються з кількох типів пластиків, що значно ускладнює їх сортування та подальшу переробку. В лабораторних умовах зазвичай важко ефективно відокремити один тип пластику від іншого, що може призвести до погіршення якості переробленого матеріалу.

Пластикові відходи часто містять домішки, такі як фарби, клеї, метали або інші сторонні матеріали. Ці домішки можуть ускладнити процес переробки, а також вплинути на якість перероблсного матсріалу. У лабораторних умовах нсобхідно мати спеціалізоване обладнання для ефективного видалення таких забруднень.

Пластики мають різні температурні властивості, що означає, що кожен тип пластику вимагає своєї температури для плавлення або переробки. Некоректний температурний режим може призвести до розкладу матеріалу, утворення токсичних газів або погіршення механічних властивостей матеріалу. У лабораторії важливо мати точні термоконтролери і систему автоматичного регулювання температури для забезпечення стабільності процесу.

Перероблені пластикові матеріали часто потребують подальшої обробки, такої як формування у вигляді гранул або пластичних мас для подальшого використання. У лабораторних умовах створення оптимальних умов для такої обробки є складним завданням через необхідність постійного контролю якості, розміру та форми гранул.

Деякі види пластику при переробці можуть виділяти шкідливі гази або токсичні компоненти, особливо коли температура перевищує допустимі межі. Це може становити загрозу для здоров'я та навколишнього середовища. Лабораторії повинні бути оснащені відповідними системами вентиляції та очищення повітря для забезпечення безпечної роботи.

В лабораторних умовах ефективність і економічна доцільність рециклінгу можуть бути обмеженими через високі витрати на енергію та обладнання, а також складність технологічного процесу. Рециклінг пластмас вимагає значних інвестицій в апаратуру та оптимізацію процесів, що може бути важким завданням для лабораторій з обмеженими ресурсами.

Пластикові матеріали можуть зазнати механічної або хімічної деградації під час переробки, що значно знижує їх якість. Пластики, які вже використовувались, можуть мати внутрішні пошкодження або зміни в молекулярній структурі, що знижує їх потенціал для повторного використання.

Багато видів пластмаси містять хімічні добавки, такі як пластифікатори, стабілізатори, барвники чи антиоксиданти, які додаються для покращення властивостей матеріалу. При рециклінгу пластмаси ці добавки можуть взаємодіяти між собою, створюючи нові сполуки або токсичні продукти розкладу. Лабораторії повинні вивчати вплив цих компонентів на процес переробки та розробляти методи, що дозволяють знижувати небезпеку утворення шкідливих сполук.

Під час рециклінгу пластик може зазнавати деформацій, таких як в'язкість, скорочення або зміна механічних властивостей через багатократні цикли нагріву та охолодження. Це може призвести до нерівномірної товщини та погіршення якості переробленого матеріалу. Проблема полягає в тому, що з кожним циклом використання пластик може ставати менш придатним для подальшої переробки, і тому важливо розробляти нові технології, які дозволяють уникнути цього процесу.

Не всі лабораторії мають необхідну інфраструктуру для повного циклу рециклінгу пластмас – від сортування до переробки в кінцевий продукт. Часто лабораторії зосереджуються лише на окремих етапах цього процесу, що може ускладнити проведення повноцінних досліджень. Недостатня кількість спеціалізованих установок для очистки та гранулювання матеріалу також обмежує ефективність переробки на етапі лабораторних досліджень.

Для забезпечення повторюваності та стабільності результатів лабораторного рециклінгу необхідно розробити чіткі стандарти і процедури для кожного типу пластмаси, що підлягає переробці. Однак через велику різноманітність матеріалів і відсутність універсальних стандартів, створення таких процесів залишається складним завданням. Це також стосується відсутності глобальних норм для утилізації та переробки пластмас у лабораторіях.

Контроль якості є важливим етапом рециклінгу, оскільки перероблений пластик може мати різні властивості, залежно від умов обробки, технології та типу вихідного матеріалу. Це створює додаткові виклики для лабораторій, які повинні оцінити механічні, хімічні та фізичні властивості перероблених матеріалів для визначення їх придатності для подальшого використання. Необхідні точні методи вимірювання та аналізу для оцінки якості продукції.

Незважаючи на те, що рециклінг пластмас є екологічно важливим, лабораторні дослідження можуть призвести до утворення відходів та забруднення через використання токсичних матеріалів у процесах переробки. Наприклад, виділення летючих органічних сполук (ЛОС) чи інших небезпечних речовин може негативно вплинути на навколишнє середовище, якщо не вжити відповідних заходів контролю. Для мінімізації цього ризику необхідно розробити ефективні методи нейтралізації таких речовин та їх утилізацію.

3.4 Методика виконання експериментальної частини

Рециклінг пластмас у лабораторних умовах є складним та багатогранним процесом, який стикається з численними труднощами, від розмаїття матеріалів до технічних і економічних обмежень. Проте, з правильними підходами до сортування, очищення, контролю температури та використання спеціалізованого обладнання можна значно покращити ефективність переробки і зробити цей процес більш сталим та екологічно безпечним.

В ході експерименту для переробки використовувалися пластикові пляшки різних виробників, що мають різні форми, розміри та відтінки кольорів. Ці характеристики відіграють важливу роль, тому що пластик, що використовується в пляшках, може відрізнятися за складом та добавками, що впливає на його властивості при переробці.

У всіх випадках основним матеріалом пляшок був поліетилентерефталат (PET 1). Цей тип пластику широко застосовується у виробництві упаковки для напоїв і має ряд особливостей:

- Висока міцність та зносостійкість.
- Хороша термопластичність, що робить її придатною для переробки.
- Схильність до гідролітичного розкладання при високій температурі та вологості.
- Можливість зміни хімічних властивостей залежно від присутніх барвників та інших добавок.

Колір пляшок є важливим фактором при переробці, оскільки пофарбовані та прозорі варіанти можуть по–різному реагувати на нагрівання та формування. Зокрема, прозорий PET найчастіше містить менше домішок, ніж кольоровий, що може покращити якість переробленого матеріалу. У ході експерименту було вирішено враховувати ці відмінності під час аналізу отриманих результатів.

Перед переробкою пластикові пляшки проходять кілька етапів підготовки, щоб очистити їх від забруднень, видалити етикетки та клей, а також підготувати до подальшої переробки.

На першому етапі пляшки ретельно промиваються водою для видалення бруду, пилу та залишків рідини. Для покращення якості очищення можна використовувати теплу воду та м'які миючі засоби. Після промивання пляшки промиваються чистою водою та висушуються.

Етикетки видаляються вручну або механічним способом. Ручне зняття – етикетка знімається вручну, якщо вона приклеєна слабким клеєм.Однак після

зняття етикетки на поверхні пляшки часто залишається клей. Для його видалення можна використовувати такі методи:

- Замочування в гарячій воді (50–70°C) із миючим засобом – допомагає розм'якшити клей та полегшує його видалення.
- Використання спеціальних розчинників (спирт, ацетон, уайт–спірит) ефективно видаляє залишки клею, але застосовується з обережністю, щоб не пошкодити пластик.
- Механічне видалення (металевий або пластиковий скребок, абразивна губка) – використовується для сильного зчеплення клею з поверхнею пляшки.

Найбільш ефективним способом є комбінація гарячої води та механічного видалення, оскільки це знижує ризик пошкодження пластику та забезпечує повне видалення клею.

Після видалення етикеток горловина пляшки підключається до спеціального адаптера, який з'єднується з компресором. Усередині пляшки створюється тиск 15–18 psi (1,04–1,24 бар). Цей процес використовується для:

- Випрямлення деформованих пляшок перед подальшою переробкою.
- Перевірка цілісності пластику перед переробкою.

Далі підготовлені пляшки переходять до наступного етапу переробки – теплова обробка пляшок

Після надування пляшок до тиску 15–18 psi (1,04–1,24 бар), без скидання тиску, вони піддаються тепловому впливу за допомогою будівельного фена.

Температура фена встановлюється відповідно до температури деформації PET–пластику, яка зазвичай знаходиться в діапазоні 70–120°C. У процесі нагрівання пластик розм'якшується, і пляшка починає змінювати свою форму.

Основна мета цього етапу:

- Випрямлення нерівностей та складок, що виникають після збирання та зберігання пляшок.

– Попереднє формування, що робить подальшу переробку простіше та ефективніше.
– Підвищення однорідності матеріалу, оскільки нагрівання дозволяє пластмасі рівномірно розподілятися під тиском.

Завдяки внутрішньому тиску пляшка стає рівною, що полегшує наступні процеси.

У процесі експерименту використовувалося таке устаткування:

Портативний акумуляторний компресор Xiaomi Mi Portable Air Pump 2

Цей компактний компресор використовувався для подачі стисненого повітря до пляшок перед їх термічною обробкою. Його переваги:

- Автономна робота завдяки вбудованому акумулятору.
- Можливість точного регулювання тиску, що є важливим для рівномірного випрямлення пляшок.
- Компактність та зручність у використанні.

Технічний фен Bosch Professional GHG

Використовувався для нагріву PET–пляшок з метою їхнього попереднього формування. Основні характеристики:

- Можливість регулювання температури, що дозволяє підлаштовуватись під температуру деформації PET.
- Висока потужність нагріву, що забезпечує швидке та рівномірне прогрівання матеріалу.
- Надійність та довговічність, характерні для професійного інструменту.установка з переробки пластику

Установка для переробки пластику

Пристрій використовувався для переробки підготовленого PET–пластику. Основні особливості та складові частини установки будуть детально описані у наступному розділі, включаючи схеми, для кращого розуміння технологічного процесу.

3.5 Результати проведення експерименту по рециклінгу пластику

У ході проведеного експерименту з переробки пластику було досягнуто ряду ключових результатів, які продемонстрували ефективність обраних методів переробки та дозволили оцінити вплив різних факторів на кінцевий продукт.

У ході переробки пластикових пляшок в рамках даної студентської роботи було виявлено, що колір PET–пластика помітно впливає на процес переробки та якість отриманого матеріалу.

Різні барвники – пляшки різних виробників містять різні пігменти, які можуть змінювати фізико–хімічні властивості PET–пластику, включаючи температуру плавлення, в'язкість та міцність.

Додаткові добавки – у кольоровому PET можуть бути стабілізатори та модифікатори, що впливають на процес деформації та формування.

Прозорий PET нагрівається рівномірно та легше піддається термообробці.

Кольоровий PET може нагріватися нерівномірно, що ускладнює термоформування і вимагає точного контролю температури.

У процесі переробки з'ясувалося, що змішування PET–пляшок різних кольорів призводить до отримання неоднорідного матеріалу.

Це особливо важливо при отриманні філаментоподібної заготовки, оскільки кольорові домішки можуть змінювати механічні властивості та вплинути на зовнішній вигляд кінцевого продукту.

Вплив на якість переробленого пластику Кольорові добавки вплинули на міцність та еластичність отриманого філаменту, що вимагало регулювання температури та швидкості протяжки.

Деякі кольорові пляшки гірше зазнавали термічної деформації, що впливало на рівномірність структури переробленого матеріалу.

У процесі переробки пластикових пляшок було виявлено, що більшість із них мають різну форму та рельєфний візерунок, що створює певні складнощі у

переробці. Для усунення цих особливостей пляшки попередньо надуваються до встановленого тиску, а потім зазнають термічного впливу. Цей процес дозволяє вирівняти поверхню, прибрати специфічні візерунки та полегшити подальшу переробку.

На рисунку 3.4 представлені пляшки різної форми та з рельєфними візерунками до та після обробки, демонструючи ефективність даного методу.



Рисунок 3.4 – Фото пляшкок різних розмірів та візерунками на самих пляшках



Рисунок 3.5 – Підготовка пляшки до термічної обробки та надування до тиску 14 psi.

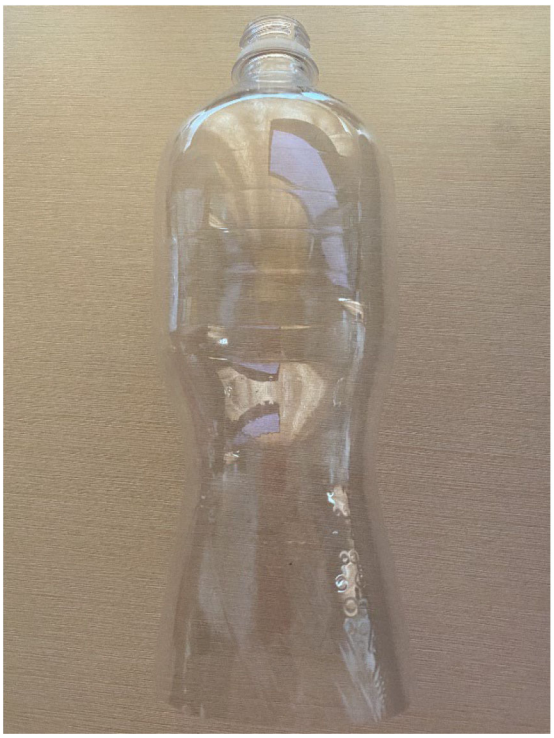


Рисунок 3.6 – Пляшка після надування до 14 psi, термічної обробки та часткового нарізування на чверть

Після цього етапу починається процес переробки пластику на установці. На наступному етапі пластик простягається через нагрівальний елемент і формується трубчасту заготовку, яка потім намотується на барабан.

Нижче представлені результати протягування пластику. Всі зображення виконані у форматі 3D–моделювання, оскільки в наявності відсутнє обладнання, здатне здійснювати макрозйомку з необхідним рівнем деталізації.

Температурні режими протяжки PET–пластику та їх вплив на переробку

В ході експерименту вивчався вплив температури на процес протяжки PET–пластику в діапазоні 120–260 °C. Аналіз показав, що температура значно впливає на плинність матеріалу, його механічні властивості і рівномірність формування.

1. Температурний діапазон 120–160 ° C

При нагріванні до 120–160 ° C пластик розм'якшувався, проте не досягав стану, необхідного для рівномірного протягу. Це призводило до появи внутрішніх

напружень, розривів та дефектів поверхні. Формування нитки у цьому діапазоні відбувалося нерівномірно, що впливало механічну міцність (рисунок 3.7).

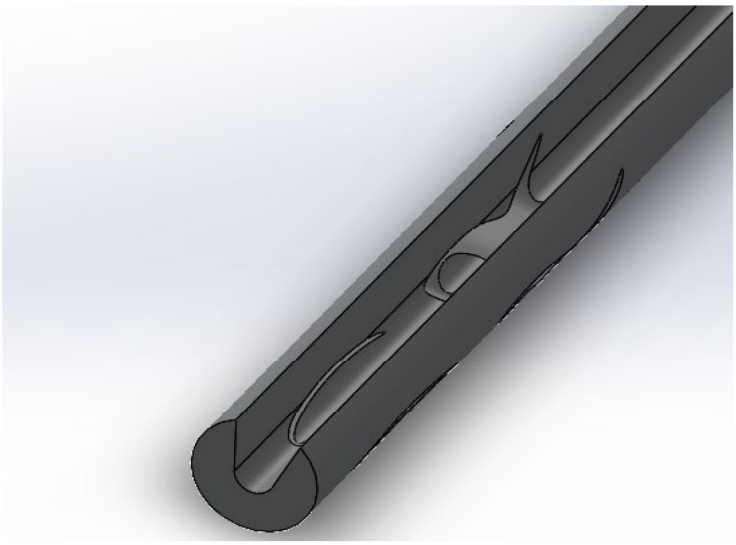


Рисунок 3.7 – Зображення пластику, протягнутого при 120–160 ° С, з дефектами.

2. Температурний діапазон 160–200 ° С

У зазначеному температурному діапазоні спостерігалася оптимальна поведінка матеріалу. PET–пластик набував достатньої пластичності, забезпечуючи рівномірне формування без значних внутрішніх напружень. Готова заготівля мала гладку поверхню та зберігала високу міцність (рисунок 3.8).

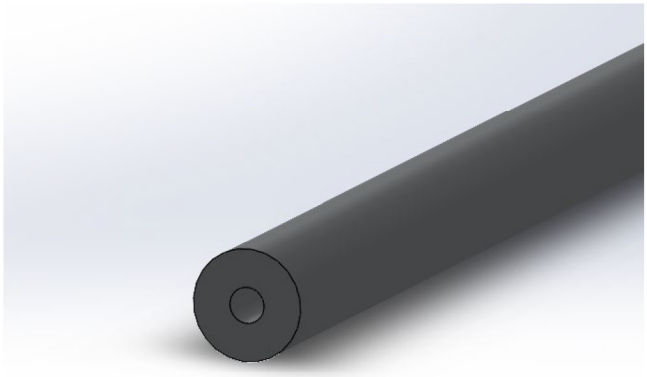


Рисунок 3.8 – Зображення пластикової нитки, протягнутої при 160–200 ° С, з рівновісною структурою

3. Температурний діапазон 200–230 ° C

При температурах вище 200°C матеріал ставав надмірно текучим, що могло призводити до утворення мікропор та зміни механічних властивостей. В окремих випадках спостерігалися ознаки перегріву, що виражалося у появі бульбашок та підвищеної крихкості.



Рисунок 3.9 Зображення пластику, протягнутого при 200–230 ° C, з дефектами структури пластику.

4. Температурний діапазон 230–260 ° C

При досягненні 230–260 ° C відбувалося розкладання PET–пластику з виділенням газоподібних сполук (рис.3.10). Це призводило до зміни кольору, погіршення механічних властивостей та появи пористості у структурі. Візуально можна було спостерігати почорніння матеріалу, що свідчить про його часткове окислення.



Рисунок 3.10 – Пластик після перегріву (230–260 ° С) з ознаками термічного руйнування.

Таким чином можна зробити висновок, що оптимальним температурним діапазоном для рециклінгу пластикових пляшок з PET–пластику методом протяжки для формування філаменту для 3D друку є 160–200°С. За цих температур матеріал зберігає високі механічні властивості, рівномірно формується і не піддається термічній руйнації. Температури вище 220°С підвищують плинність, але можуть спричинити утворення дефектів. При перевищенні 230°С переробка стає неефективною через розкладання матеріалу та втрати міцності.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА В ГАЛУЗІ

4.1 Виявлення та оцінка шкідливих факторів виробничого середовища

Під час експлуатації 3D–принтерів та установки для переробки пластикових відходів оператор піддається впливу ряду небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Такі фактори можуть негативно впливати на стан здоров'я працівників і призводити до травм, опіків або отруєнь.

До основних небезпечних факторів належать:

- Механічні фактори – рухомі елементи принтера (ремені, напрямні, екструдери), обертові частини дробарки або вала шнека в установці для переробки пластику. Потрапляння рук або сторонніх предметів може призвести до защемлення або травм.

  Електричні фактори – ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції дротів, контактів, нагрівальних елементів. Робоча напруга обладнання – 12–24 В постійного струму, проте джерело живлення підключене до мережі 220 В.
- Термічні фактори – гарячі поверхні екструдера, сопла або нагрівального столу (до 250–300 °С), що можуть спричинити опіки.
- Хімічні фактори – під час плавлення ABS, PETG або фотополімерів виділяються леткі органічні сполуки (стирол, формальдегід, феноли), які можуть подразнювати дихальні шляхи, очі та шкіру.
- Пилові фактори – дрібнодисперсний пластик, що утворюється під час подрібнення або шліфування деталей.
- Шум і вібрація – двигуни та вентилятори 3D–принтерів створюють шум до 70–80 дБ, а переробне обладнання (дробарка, гранулятор) може створювати до 90 дБ.

- Світлове випромінювання – ультрафіолетові джерела у SLA і DLP–принтерах шкідливі для очей і шкіри при безпосередньому контакті.

Виявлені фактори підлягають постійному контролю та мінімізації шляхом застосування організаційних, технічних та індивідуальних засобів захисту.

4.2 Заходи захисту від впливу шкідливих факторів виробничого середовища

Для зниження рівня впливу шкідливих факторів застосовуються організаційні, технічні та індивідуальні заходи безпеки:

- Проведення інструктажів з охорони праці (вступний, первинний, повторний).
- Забезпечення заземлення електрообладнання і справності електричних мереж.
- Використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ):
  - захисні окуляри або щитки – при роботі з ультрафіолетовими принтерами;
  - рукавички – при контакті з гарячими або гострими деталями;
  - респіратори класу FFP2–FFP3 – при роботі з ABS або при переробці пластику;
  - спецодяг із бавовняної тканини, що не підтримує горіння;
  - беруші або навушники – при роботі з обладнанням, яке створює шум понад 80 дБ.
- Забезпечення локальної витяжної вентиляції в зоні друку або плавлення пластмаси.
- Застосування екранування джерел УФ-випромінювання.
- Регулярне технічне обслуговування обладнання для запобігання перегріву або короткого замикання.

– Проведення медичних оглядів працівників, які контактують із шкідливими речовинами.

Дотримання цих заходів гарантує безпечні умови праці і знижує ризики травматизму.

4.3 Технічні рішення по гігієні праці та виробничій санітарії

Раціональне планування робочого місця, система вентиляції, освітлення та контроль шуму мають важливе значення для створення комфортних і безпечних умов праці.

Приміщення для експлуатації 3D–принтерів і переробного обладнання повинно бути сухим, теплим і добре вентильованим. Опалення може бути водяним або електричним, із підтриманням температури 18–25 °С і вологості не більше 70 %.

Для видалсння шкідливих випарів ABS, HIPS або фотополімсрів обов'язково встановлюється місцева витяжна вентиляція над зонами друку, плавлення або очищення моделей.
Повітрообмін повинен становити не менше 3–5 крат за годину.
У разі використання ізопропілового спирту для промивання деталей (SLA–друк) вентиляційна система повинна бути вибухобезпечною.

Освітлення робочого місця повинно відповідати нормам ДБН В.2.5–28:2006.
Рівень освітленості – не менше 300 лк.
Природне освітлення забезпечується через вікна, розташовані з північної або північно–східної сторони.
Для штучного освітлення рекомендується використовувати LED–світильники з нейтральним білим спектром (4000–4500 К), що не спотворюють кольори і не мерехтять.

Світильники повинні бути закриті розсіювачами, щоб запобігти осліпленню працівника. У зонах роботи SLA–принтерів освітлення повинно бути захищене від ультрафіолету.

Шум у приміщенні не повинен перевищувати 80 дБ, а рівень вібрації – 75 дБ. Джерелами шуму є двигуни, охолоджувальні вентилятори, компресори, редуктори. Для зменшення шуму застосовують:

- гумові або силіконові демпфуючі прокладки під обладнанням;
- антивібраційні основи під принтерами і дробарками;
- шумоізоляційні панелі на стінах приміщення;
- планування режиму роботи, щоб не перевантажувати приміщення одночасною роботою багатьох пристроїв.

Регулярний контроль шуму та вібрації проводиться відповідно до ДБН В.1.2-10:2021.

4.4 Техногенна безпека

Техногенна безпека передбачає попередження аварій, пожеж, витоків небезпечних речовин і забезпечення стабільної роботи обладнання.

Під час роботи 3D–принтерів та установки переробки пластику застосовуються нагрівальні елементи, електродвигуни та горючі матеріали, тому важливо дотримуватися вимог НАПБ А.01.001–2014.

Основні заходи:

- розміщення принтерів на негорючих основах;
- наявність вогнегасників ВП–5 або ВВК–2 біля кожного робочого місця;
- регулярна перевірка справності електричних мереж;
- заборона використання пошкоджених кабелів, розеток, подовжувачів;
- заборона паління та зберігання легкозаймистих рідин у робочій зоні;
- відключення обладнання після завершення роботи.

У разі займання пластикових матеріалів забороняється гасити водою – використовуються тільки порошкові або вуглекислотні засоби.

Можливі аварійні ситуації:

- коротке замикання електричних кіл;
- перегрів екструдера або нагрівального столу;
- витік фотополімерної смоли або займання пластику;
- зупинка вентиляторів і порушення вентиляції.

Алгоритм дій персоналу при аварії:

1. Відключити електроживлення обладнання.
2. Евакуювати персонал з приміщення.
3. Повідомити відповідального за тсхногснну бсзпску.
4. Розпочати локалізацію пожежі або витоку згідно з інструкцією.
5. Не допускати повторного ввімкнення систем до усунення причин аварії.

На підприємстві має бути розроблений план ліквідації аварій (ПЛАС), який містить дії персоналу, порядок оповіщення та евакуації.

Заземлення електрообладнання – обов'язкова вимога ПУЕ та ДСТУ EN 60204–1:2015.

Установка для переробки пластикових відходів та 3D–принтери працюють від мережі 220 В, тому всі металеві частини, які можуть опинитися під напругою, повинні бути заземлені.

Мета заземлення:

- забезпечити безпеку персоналу при пошкодженні ізоляції;
- запобігти статичній електриці при переробці пластмас;
- підвищити надійність електроустановок.

Розрахунок заземлення здійснюється виходячи з питомого опору ґрунту (ρ) і допустимого опору заземлювального пристрою ($R \leq 4$ Ом).

Для невеликих лабораторій допускається використання контурного заземлення,

що складається з трьох сталевих стрижнів довжиною 2–3 м, з'єднаних смугою перерізом не менше 40×4 мм.

Перевірка стану заземлення проводиться щорічно вимірюванням опору мегомметром.

Заземлювальні провідники повинні бути надійно з'єднані з корпусами обладнання болтовим або зварним способом.

Забезпечення охорони праці та техногенної безпеки при роботі з 3D–принтерами та установками для переробки пластикових відходів є обов'язковою умовою ефективної і безпечної діяльності.

Виконання вимог щодо вентиляції, освітлення, електробезпеки, пожежного захисту, організації робочих місць і скологічного контролю дозволяє мінімізувати ризики виробничих травм і аварій, забезпечуючи стабільну роботу обладнання та збереження здоров'я працівників.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було досліджено процеси переробки пластикових відходів та розроблено комплекс лабораторного обладнання, призначений для перетворення ПЕТ-пластика на філамент для подальшого використання у 3D друці деталей металургійного обладнання. Проведені аналітичні, розрахункові та експериментальні дослідження дозволили сформулювати такі узагальнені висновки:

1. Огляд науково–технічних рішень засвідчив, що сучасні технології 3D друку є високоперспективним інструментом як для виготовлення прототипів, так і для безпосереднього виробництва деталей. Модернізація базових 3D принтерів, зокрема Creality Ender 3, дозволяє суттєво розширити можливості лабораторних досліджень та підвищити якість отриманих виробів.

2. Проаналізовано принципи роботи з ПЕТ-пластиком, встановлено закономірності його термічного формування, а також визначено вплив температури, швидкості нагріву та механічного натягу на якість отриманого філаменту. ПЕТ пластик відзначається високою термопластичністю, однак потребує ретельної підготовки для уникнення деградації матеріалу.

3. Створено експериментальну установку для переробки пластикових пляшок, яка містить модуль нарізання штаби, нагрівальний вузол, систему стабілізації температури, намотувальний механізм та живильні елементи. Усі основні конструктивні деталі були виготовлені за допомогою 3D друку з ABS-пластика, що підтвердило можливість використання адитивних технологій у проєктуванні спеціалізованого обладнання.

4. Розрахункова частина роботи підтвердила правильність добору електроприводів, редукторів, передач, нагрівальних елементів та електроніки, що забезпечило стабільну роботу установки та дає змогу регулювати параметри переробки у широкому діапазоні.

5. Проведені експериментальні дослідження показали, що:
   - оптимальна температура переробки ПЕТ знаходиться у межах, що забезпечують плавлення без термічної деградації матеріалу;
   - швидкість намотування суттєво впливає на рівномірність філаменту, а отже на якість 3D друку;
   - отриманий філамент має достатню однорідність та міцність для використання у побутових і навчальних 3D принтерах;
   - кінцево-елементний аналіз надрукованих деталей підтвердив можливість практичного застосування деталей зі вторинного ПЕТ у малонавантажених вузлах металургійного обладнання.

6. У розділі з охорони праці визначено основні шкідливі та небезпечні фактори, притаманні процесам переробки пластику та роботі 3D принтера, а також розроблено комплекс заходів щодо забезпечення техногенної та пожежної безпеки, вентиляції, заземлення обладнання та захисту персоналу.

7. Подальше вдосконалення установки рекомендується здійснювати за такими напрямами:
   - впровадження автоматичного контролю товщини філаменту в реальному часі;
   - модернізація системи охолодження філаменту для підвищення його рівномірності;
   - використання більш точних датчиків температури.

8. Для підвищення якості філаменту варто забезпечити:
   - попереднє сушіння ПЕТ–сировини для зменшення вологовмісності;
   - стабілізацію температури нагрівального блоку;
   - застосування більш точних приводів для намотувального механізму.

9. Доцільним є розширення спектра сировини, включаючи інші типи пластикових відходів (HDPE, PP), з попередньою оцінкою можливості їх сумісності з технологією екструзії.

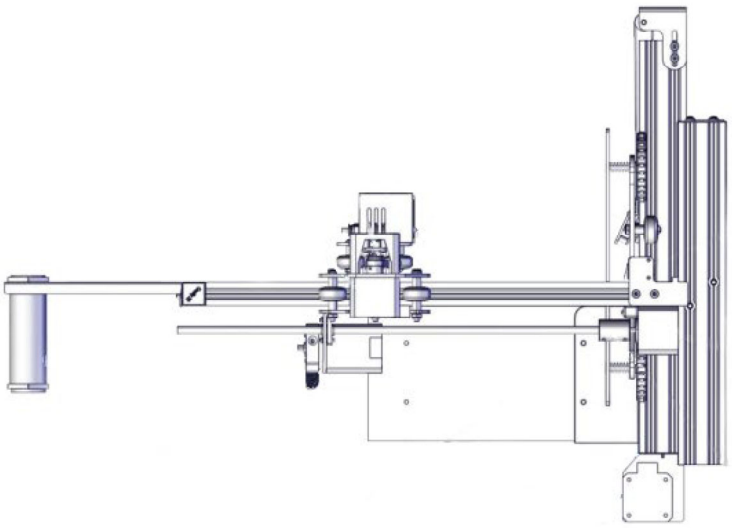
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

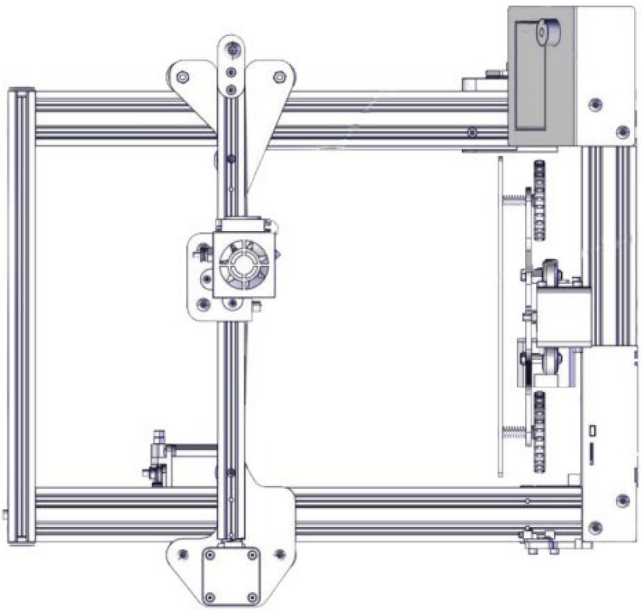
1. Chung K.–C., та ін. Технології 3D–друку, застосовані у виробництві авіаційних компонентів. Modern Physics Letters B. 2020. Vol. 34, № 07n09. P. 2040018. DOI: https://doi.org/10.1142/s0217984920400187
2. Gebhardt A., Kessler J., Thurn L. Застосування адитивного виробництва. У: 3D Printing. München, 2018. P. 101–136. DOI: https://doi.org/10.3139/9781569907030.004
3. Choi J.–W., Kim H.–C. Технології 3D–друку: огляд. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers. 2015. Vol. 14, № 3. P. 1–8. DOI: https://doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.3.001
4. Dall'Agnol G., Sagawa J. K., Tavares Neto R. F. Планування для адитивного виробництва: огляд літератури. Gestão & Produção. 2022. Vol. 29. DOI: https://doi.org/10.1590/1806–9649–2022v29e1922
5. Pan Y., та ін. 3D–друк у будівництві: сучасний стан та застосування. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170–021–07213–0
6. Das S., Bourell D. L., Babu S. S. Металеві матеріали для 3D–друку. MRS Bulletin. 2016. Vol. 41, № 10. P. 729–741. DOI: https://doi.org/10.1557/mrs.2016.217
7. Iftekar S. F., та ін. Досягнення та обмеження матеріалів і технологій 3D–друку: критичний огляд. Polymers. 2023. Vol. 15, № 11. P. 2519. DOI: https://doi.org/10.3390/polym15112519
8. Ivakhnenko O., Khudiakov R., Vernydub M., Dernovyi O., Skrypka R. Аналіз конструктивних особливостей обладнання та видів витратних матеріалів для 3D–друку. Матеріали XI Міжнародної науково–практичної конференції "Modern generation: current problems, experience, development prospects". Seville: ISG, 2024. С. 339–341. URL: https://isg–konf.com/uk/modern–generation–current–problems–experience–development–prospects/

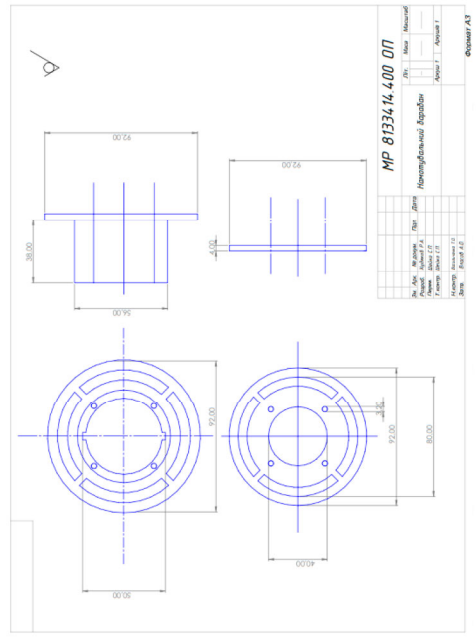
9. Ivakhnenko O., Khudiakov R., Vernydub M., Dernovyi O., Skrypka R. Огляд технічних рішень з модернізації 3D–принтерів у лабораторних умовах. Матеріали XII Міжнародної науково–практичної конференції “Prospective directions of modern science and education in the world”. Rotterdam: ISG, 2024. С. 362–363. URL: https://isg–konf.com/uk/prospective–directions–of–modern–science–and–education–in–the–world/
10. School Recycling World. Лише одна пластикова пляшка в день? Що тут такого? 2020. URL: https://schoolrecyclingworld.org/2020/02/07/лише–одна–пластикова–пляшка–в–день–що–т/
11. Консалтингова група “Сім Променів”. Види пластику – маркування. URL: https://7promeniv.com.ua/vidkhody/vtorresursy/198–plastyk/1854–vydy–plastyku–markuvannia.html
12. ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною здоров’я та безпекою праці».
13. ДБН В.2.5–28:2006 «Природне і штучне освітлення».
14. ДСанПіН 3.3.2.007–98 «Державні санітарні правила і норми мікроклімату виробничих приміщень».
15. НАПБ А.01.001–2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».
16. ГОСТ 12.1.003–83 «Шум. Загальні вимоги безпеки».
17. ДСТУ EN 60204–1:2015 «Безпечність машин. Електрообладнання машин».
18. ДСТУ 4462.3:2005 «Відходи. Класифікація небезпечних відходів».
19. Методичні рекомендації з безпечної експлуатації 3D–принтерів. Мінекономіки України, 2022.
20. Технічна документація виробників 3D–принтерів (Anycubic, Creality, Prusa, Formlabs).
21. Наукові публікації з питань охорони праці при адитивному виробництві, 2020–2024 рр.

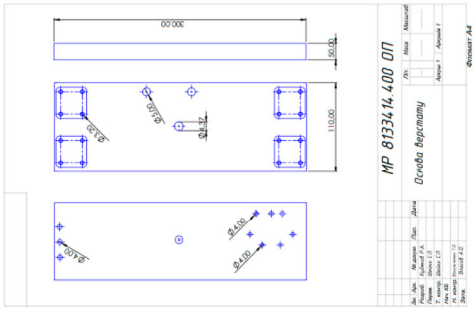
22. Павліще В. Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин : підручник. Київ : Вища шк., 1993. 556 с.
23. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. Основи конструювання та розрахунок деталей машин : підручник. Харків : НТМТ, 2014. 592 с.
24. Бойко В. В., *Кроль О. С.* Дослідження механічних характеристик виробів, отриманих методом FDM–друку. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 4 (245). С. 12–16.
25. ДСТУ 2221–93. Передачі зубчасті циліндричні. Розрахунок на міцність. [Чинний від 1994–01–01]. Київ : Держстандарт України, 1993. 55 с.
26. ДСТУ 2974–94 (ГОСТ 11262–80). Пластмаси. Метод визначення властивостей на розтяг. [Чинний від 1995–01–01]. Київ : Держстандарт України, 1994. 18 с.
27. Григор'єв А. М., Петренко А. О. Технології адитивного виробництва : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. 180 с.

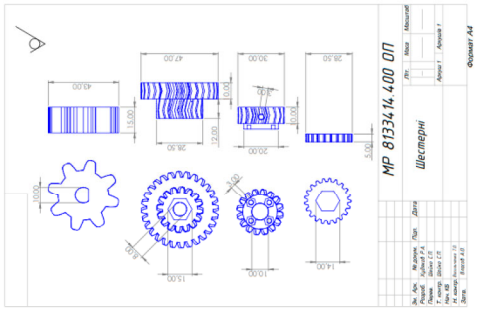
ДОДАТКИ

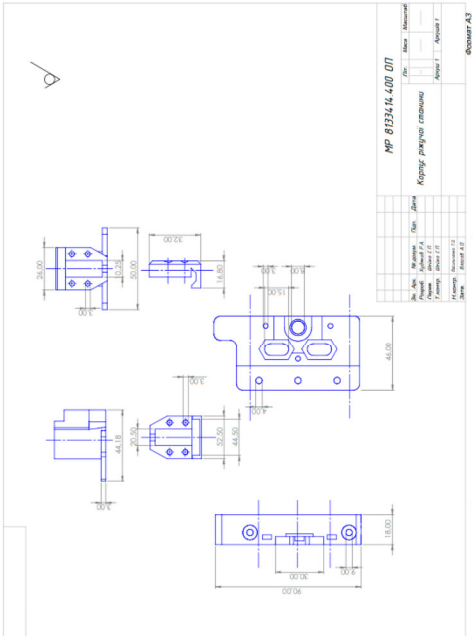


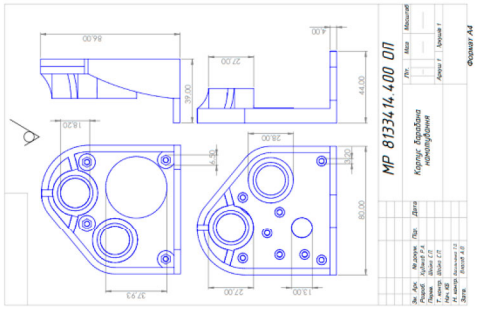


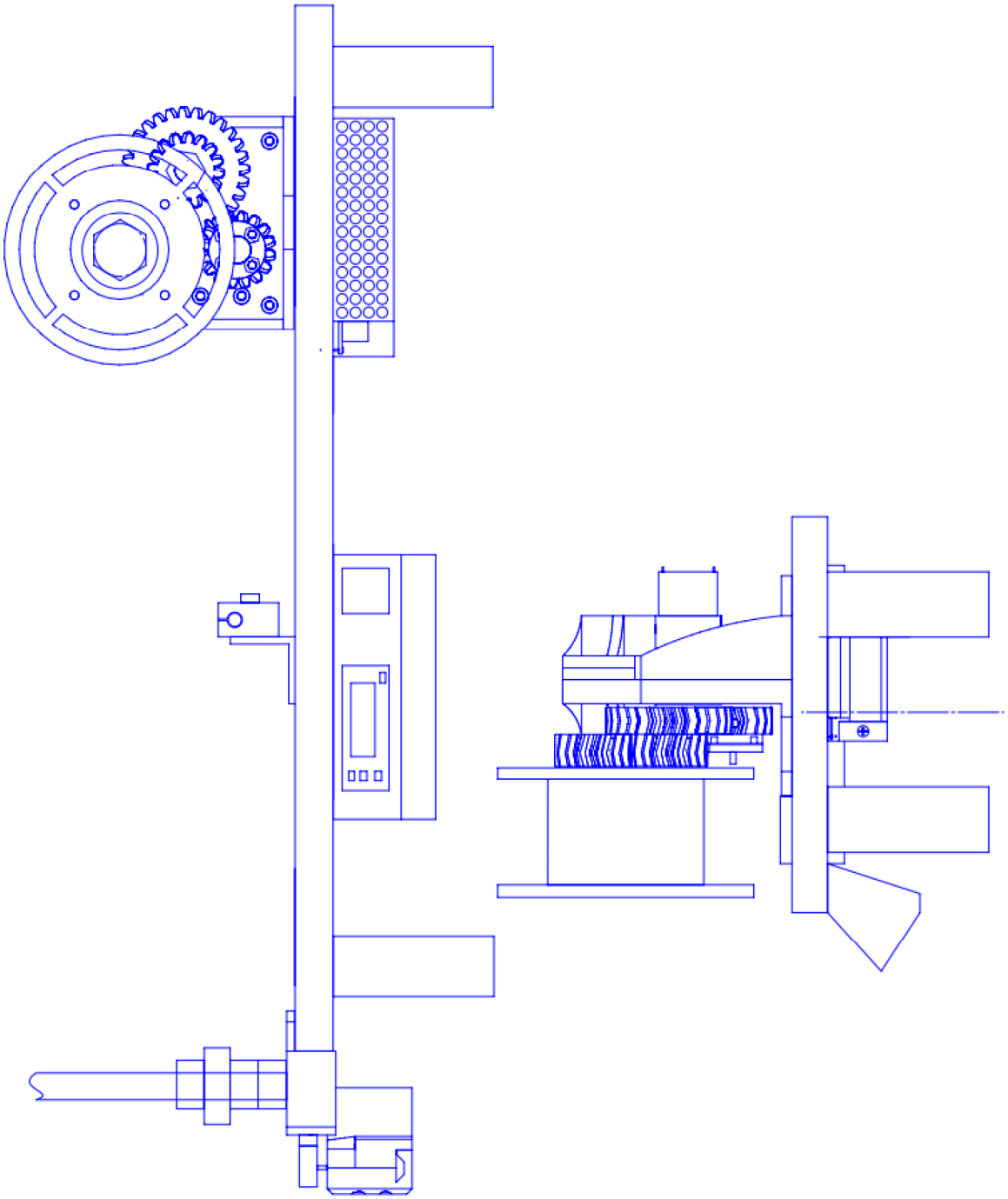

МР 8133414.400 ОП
Накладний барабан
Формат А3


МР 8133414.400 ОП
Основа верстату
Формат А4


МР 8133414.400 ОП
Шестерні
Формат А4


МР 8133414.400 ОП
Корпус ріжучої головки
Формат А3


МР 8133414.400 ОП
Корпус барабана намагніченого
Формат А4



АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ЕКСТРУЗІЇ НА ЯКІСТЬ ФІЛАМЕНТУ (rPET)

Рис. 1. Залежність відхилення діаметра від температури

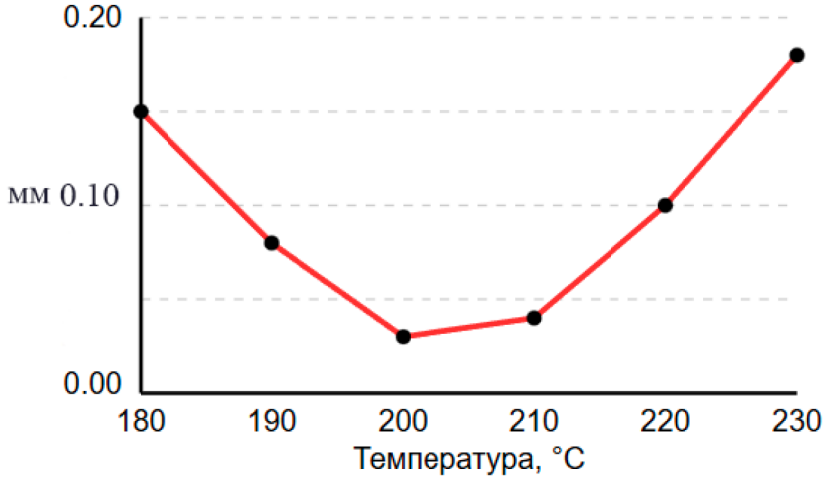
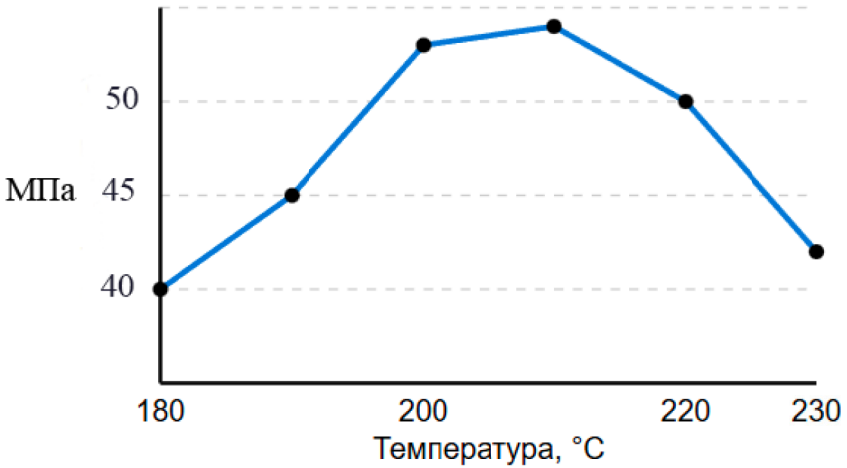


Рис. 2. Залежність міцності на розрив від температури



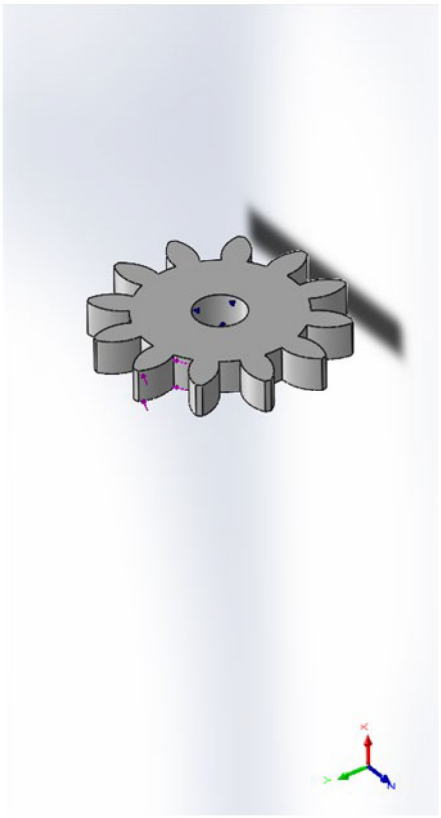
Оптимальна зона: 200-210 °C

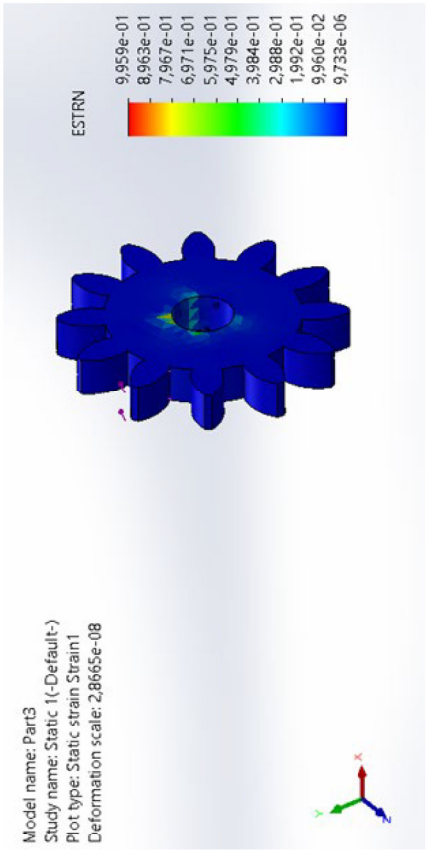
Таблиця 1. Експериментальні дані випробувань зразків

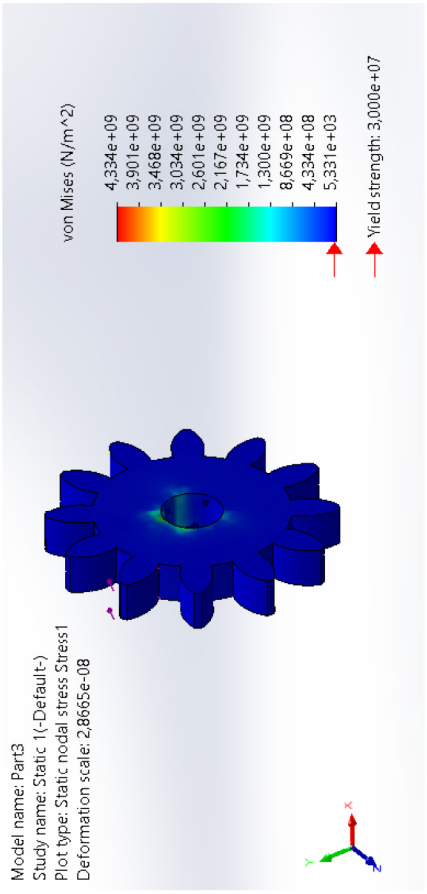
Параметр	190 °C	210 °C (Опт.)	230 °C
Сер. діаметр (мм)	1.68 ± 0.08	1.75 ± 0.04	1.82 ± 0.15
Міцність (МПа)	40.5	58.2	35.4

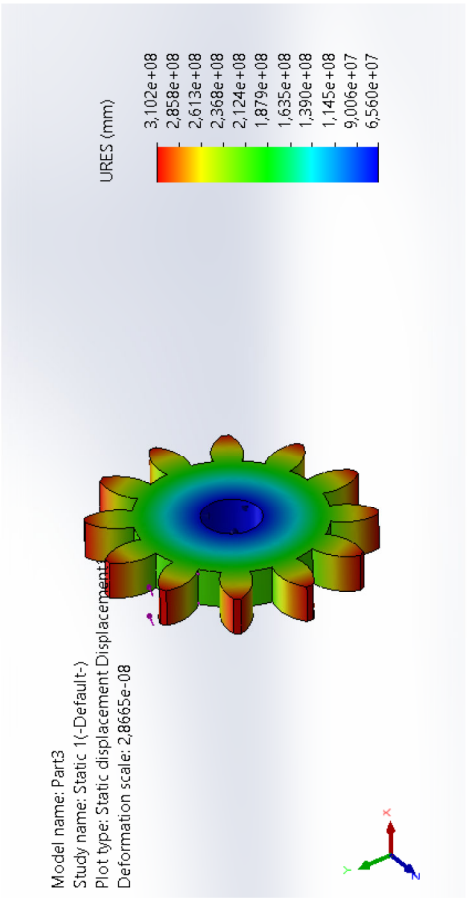
ВИСНОВОК:

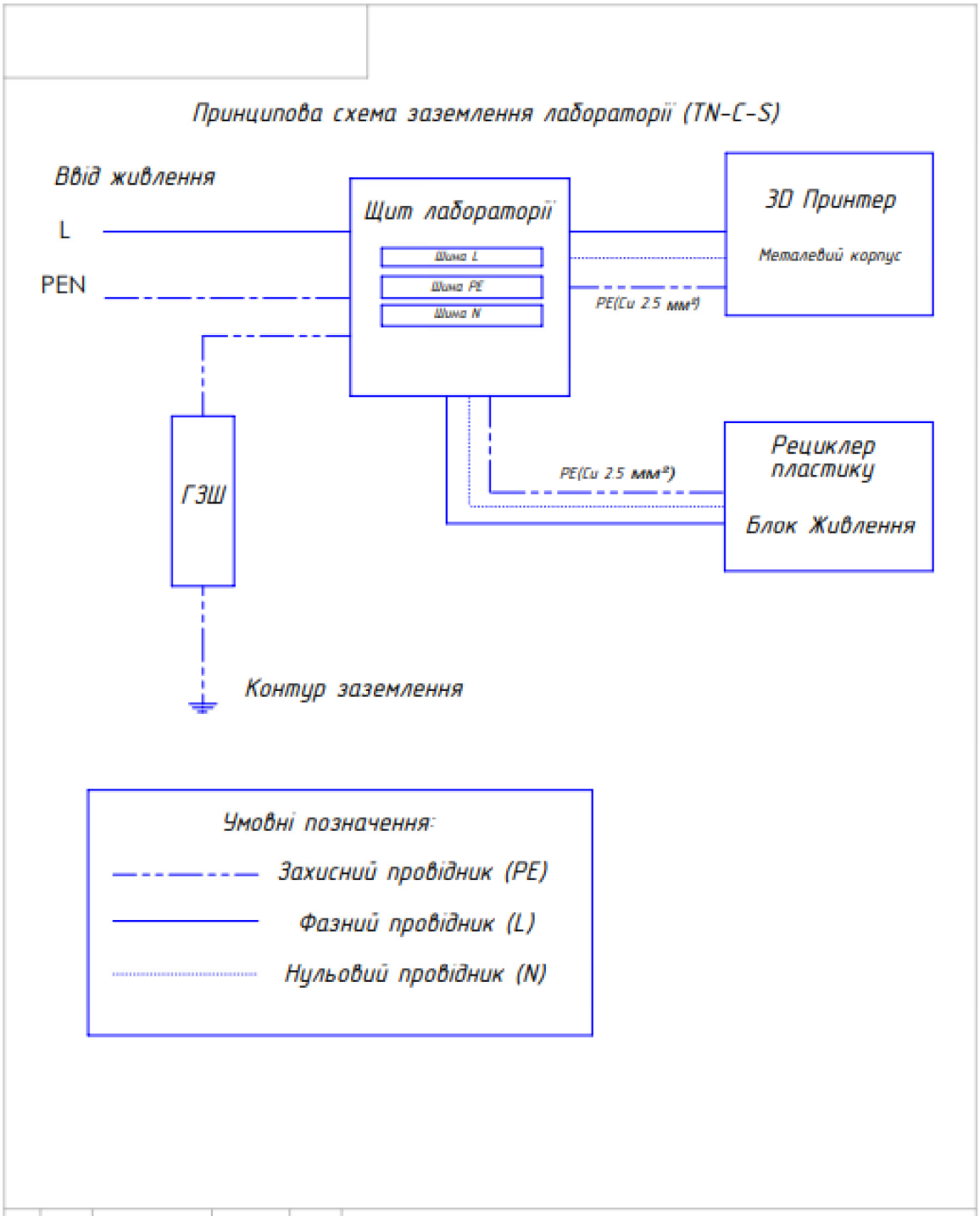
Експериментально встановлено, що оптимальна температура екструзії для даного типу пластику становить 205-210 °C
При цій температурі досягається максимальна міцність на розрив (58 МПа) та найменше відхилення діаметра (± 0.04 мм)




ESTRN
9,959e-01
8,963e-01
7,967e-01
6,971e-01
5,975e-01
4,979e-01
3,984e-01
2,988e-01
1,992e-01
9,960e-02
9,733e-06
Model name: Part3
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static strain Strain1
Deformation scale: 2,8665e-08


von Mises (N/m^2)
4,334e+09
3,901e+09
3,468e+09
3,034e+09
2,601e+09
2,167e+09
1,734e+09
1,300e+09
8,669e+08
4,334e+08
5,331e+03
Yield strength: 3,000e+07
Model name: Part3
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 2,8665e-08


URES (mm)
3,102e+08
2,858e+08
2,613e+08
2,368e+08
2,124e+08
1,879e+08
1,635e+08
1,390e+08
1,145e+08
9,006e+07
6,560e+07
Model name: Part3
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 2,8665e-08



					МР 8133414.400 ОП			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Принципова схема заземлення лабораторії (TN-C-S)	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.		Худяков Р.А.				–		
Перев.		Шейко С.П.						
Т. контр.		Шейко С.П.				Аркуш 1	Аркушів 1	
Нач. КБ								
Н. контр.		Васильченко Т.О						
Затв.		Власов А.О.						

Формат А1