

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра обладнання харчових технологій

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення та обґрунтування інноваційної конструкції безлопатевої

тістомісильної машини з використанням технологій швидкого прототипування

(комплексна тема)

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МОм - 61
 спеціальності 133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Жуковський А.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Кірічек В.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Стадник І.Я.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Ворошук В.Я.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Ворошук В.Я.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Марущак П.О.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль 2025

Анотація

В даній роботі було проведено використання адитивних технологій у використанні для швидкого прототипування (rapid prototyping) складних і функціональних деталей спроектованої тістомісильної машини. З огляду на специфічні особливості констуктивних деталей машини, вибрано оптимальні режими друку. Це дозволило покращити якість деталей, значно скоротити час її обробку. За рахунок простого прототипування виготовлено на 3Д друці збірну конструкцію машини. Проведено математичне та фізичне моделювання стадій замісу тіста робочим органом. Визначено основні критичні моменти робочих процесів при змішуванні компонентів у робочій камері машини. Встановлено «мертві» зони та побудовано графіки деформаційних впливів тіста на конструкцію багатогранної камери та барабана.

Ключові слова: перемішування, стадії, моделювання, адитивні технології.

Abstract

This work presents the use of additive technologies for rapid prototyping of complex and functional parts of a designed dough mixer. Given the specific features of the machine's structural parts, optimal printing modes were selected. This allowed improving the quality of parts and significantly reducing processing time. A prefabricated machine structure was manufactured using 3D printing using simple prototyping. Mathematical and physical modeling of the stages of dough mixing by the working body was carried out.

The main critical moments of the working processes during the mixing of components in the working chamber of the machine have been determined.

Dead zones have been established and graphs of the deformation effects of the dough on the design of the multi-faceted chamber and drum have been constructed.

Keywords: mixing, stages, modeling, additive technologies.

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет _____ інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)
Кафедра _____ обладнання харчових технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Ворошук В.Я.,
(підпис) (прізвище та ініціали)
« 27 » серпня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня _____ магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва спеціальності)
студенту _____ Жуковський А.В.
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення та обґрунтування інноваційної конструкції безопатевої
тістомісильної машини з використанням технології швидкого прототипування
Керівник роботи Стадник Ігор Ярославович, д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » серпня 2025 р. № 4/7-49

2. Термін подання студентом завершеної роботи « 18 » грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Етапи та алгоритм виготовлення деталей методом 3D-друку. Класифікація та технічні характеристики обладнання для 3D-друку. Параметри якості деталей, виготовлених 3D друком. Методика визначення параметрів якості поверхневого шару деталей. Методика контролю розмірних параметрів деталей, що виготовлені 3D друком. Методика обробки результатів експериментальних досліджень. Властивості досліджуваного середовища (тісто) та розрахунок навантажень. Фізико-механічні властивості досліджуваного середовища (тістової маси). Оптимізація параметрів 3D-друку критичного елемента (пластифікатора) методом аналізу ерархій (MAI). Аналіз оптимізації 3D-друку для бокових тінок. Аналіз оптимізації 3D-друку для задньої стінки моделі. Планування експерименту та виготовлення дослідної партії деталей. Розрахунок параметрів кодування та результати експериментальних вимірювань. Перелік посилань.

Загальний вигляд тістомісильної машини А1

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Заходи з охорона праці	Кравець О.І., к.т.н., доцент		
Заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С., старший викладач		
Нормоконтроль	Ворошук В.Я., к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Етапи та алгоритм виготовлення деталей методом 3D-друку	25.08.25	
2	Класифікація та технічні характеристики обладнання для 3D-друку	03.09.25	
3	Параметри якості деталей, виготовлених 3D друком	08.09.25	
4	Методика визначення параметрів якості поверхневого шару деталей	13.09.25	
5	Методика контролю розмірних параметрів деталей, що виготовлені 3D друком	17.09.25	
6	Методика обробки результатів експериментальних досліджень	23.09.25	
7	Властивості досліджуваного середовища (тісто) та розрахунок навантажень	27.09.25	
8	Фізико-механічні властивості досліджуваного середовища (тістової маси)	30.09.25	
9	Оптимізація параметрів 3D-друку критичного елемента (пластифікатора) методом аналізу єрархій (MAI)	05.10.25	
10	Аналіз оптимізації 3D-друку для бокових тінок	15.10.25	
11	Аналіз оптимізації 3D-друку для задньої стінки моделі	20.10.25	
12	Вплив технологічних режимів 3D друку на геометричну точність деталей.	05.11.25	
13	Планування експерименту та виготовлення дослідної партії деталей	10.11.25	
14	Розрахунок параметрів кодування та результати експериментальних вимірювань	17.11.25	
15	Перелік посилань	20.11.25	
16	Креслення А1	05.12.25	

Студент

(підпис)

Жуковский В.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Стадник І.Я.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра обладнання харчових технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ворошук В.Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 27 » серпня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва спеціальності)

студенту Кірічек В.А.
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення та обґрунтування інноваційної конструкції безлопатевої тістомісильної машини з використанням технології швидкого прототипування

Керівник роботи Стадник Ігор Ярославович, д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » серпня 2025 р. № 4/7-49

2. Термін подання студентом завершеної роботи « 18 » грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити) Анотація. Вступ. 1. Загально-технічна частина 1.1. Аналіз вихідної інформації для розробки дипломної роботи. Адитивне виробництво у контексті технологічної трансформації та його економічне значення. Фотополімерні методи адитивного виробництва: Стереолітографія (SLA). Переваги та обмеження адитивного виробництва (AB). Області використання адитивного виробництва (AB). Вибір матеріалів для адитивного виробництва. Шляхи конструювання та технологія проєктування вузлів і деталей машини. Інтеграція принципів АМ у конструювання вузлів тістомісильної машини. Особливості та доцільність застосування технології FDM для виготовлення дослідних деталей. Класифікація та причини виникнення технологічних похибок FDM-друку. Перелік посилань.

Загальний вигляд тістомісильної машини А1

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Заходи з охорона праці	Кравець О.І., к.т.н., доцент		
Заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С., старший викладач		
Нормоконтроль	Ворошук В.Я., к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Анотація. Вступ.	27.08.25	
2	Загально-технічна частина 1.1. Сутність та	01.09.25	
3	історія розвитку на основі адитивного виробництва	06.09.25	
4	Адитивне виробництво у контексті технологічної трансформації та його економічне значення	11.09.25	
5	Фотополімерні методи адитивного виробництва: Стереолітографія (SLA)	16.09.25	
6	Переваги та обмеження адитивного виробництва (AB)	21.09.25	
7	Області використання адитивного виробництва (AB).	26.09.25	
8	Вибір матеріалів для адитивного виробництва	29.09.25	
9	Шляхи конструювання та технологія проєктування вузлів і деталей машини	02.10.25	
10	Інтеграція принципів АМ у конструювання вузлів тістомісильної машини.	20.10.25	
11	Особливості та доцільність застосування технології FDM для виготовлення дослідних деталей	25.11.25	
12	Класифікація та причини виникнення технологічних похибок FDM-друку	10.12.25	

Студент

(підпис)

Кірічек В.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Стадник І.Я.

(прізвище та ініціали)

Зміст

Анотація	2
Зміст.....	8
Вступ	14
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	16
1.1. Сутність та історія розвитку на основі адитивного виробництва	16
1.2. Адитивне виробництво у контексті технологічної трансформації та його економічне значення.....	21
1.2.1. Фотополімерні методи адитивного виробництва: Стереолітографія (SLA)	25
1.2.2. Технологія Laser-aided Direct Metal Tooling (DMT).....	30
1.2.3. Переваги та обмеження адитивного виробництва (AB).....	32
1.3. Області використання адитивного виробництва (AB).....	35
1.3.1. Вибір матеріалів для адитивного виробництва	37
1.4. Шляхи конструювання та технологія проектування вузлів і деталей машини	39
1.4.1. Аналіз конструкцій тістомісильних машин та обґрунтування інноваційного підходу.....	39
1.4.2. Концептуальні засади "цифрового" виробництва та адитивні технології у контексті модернізації харчового обладнання	42
1.4.3. Інтеграція принципів АМ у конструювання вузлів тістомісильної машини.....	44
Висновки до розділу 1	47
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ 3D ДРУКУ	49
2.1. Особливості та доцільність застосування технології FDM для виготовлення дослідних деталей.....	49
2.1.1. Класифікація та причини виникнення технологічних похибок FDM-друку	51

2.2. Етапи та алгоритм виготовлення деталей методом 3D-друку	53
2.2.1. Застосування 3D-друку у приладобудуванні: від прототипування до функціональних компонентів	57
2.3. Класифікація та технічні характеристики обладнання для 3D-друку	59
2.4. Програмне забезпечення у процесі 3D-друку	66
Висновки до розділу 2	69
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ 3D ДРУКУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ	71
3.1. Параметри якості деталей, виготовлених 3D друком	72
3.2. Методика визначення параметрів якості поверхневого шару деталей	74
3.3. Методика контролю розмірних параметрів деталей, що виготовлені 3D друком	78
3.4. Методика обробки результатів експериментальних досліджень	79
Висновки до розділу 3	83
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ 3D ДРУКУ ТА ЇХ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЗІБРАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ МОДЕЛІ	85
4.1. Властивості досліджуваного середовища (тісто) та розрахунок навантажень	85
4.1.1. Фізико-механічні властивості досліджуваного середовища	90
(тістової маси)	90
4.2. Оптимізація параметрів 3D-друку критичного елемента (пластифікатора) методом аналізу єрархій (MAI)	93
4.2.1. Постановка адачі та визначення критичного елемента	94
4.2.2. Формалізація задачі Методом Аналізу Ієрархій (MAI)	96
4.2.3. Аналіз оптимізації 3D-друку для бокових тінок	98
4.2.4. Аналіз оптимізації 3D-друку для задньої стінки моделі	103
4.3. Вплив технологічних режимів 3D друку на геометричну точність деталей	106
4.3.1. Планування експерименту та виготовлення дослідної партії деталей	108

4.3.2. Методика вимірювання та планування багатофакторного експерименту	110
4.3.3. Розрахунок параметрів кодування та результати експериментальних вимірювань	112
4.4. Оновлені результати експериментальних вимірювань та перерахунок моделей	114
4.5. Графічний аналіз залежності геометричних параметрів	117
4.6. Аналіз 3D-друку та оптимізація параметрів при проектуванні тістомісильної машини.....	122
Висновки до розділу 4	125
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТІСТОМІСА	127
5.1. Аналіз розрахункової моделі "Робочий орган"	127
5.2. Розрахунок вала	130
5.2.1. Перевірочний розрахунок вала	133
5.2.2. Загальний розрахунок вала	137
5.3. Розрахунок та підбір підшипників кочення	138
5.3.1. Розрахунок шпоночного з'єднання	142
5.4. Моделювання навантажень на робочий орган	144
5.4.1. Розрахунок робочого органу	149
5.5. Забезпечення монтажу та герметичності корпусу камери	151
5.5.1. Проведення кінцево-елементного аналізу (FEA) робочої камери при моделюванні навантаження	152
5.5.2. Результатом гідродинамічного моделювання (CFD).....	156
5.5.3. Результатом гідродинамічного моделювання (CFD) при утворенні маси тіста	159
5.5.4. Графіки залежність ітерацій моделювання у процесі замісу тіста.....	161
Висновки до розділу 5	166
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	167
6.1. Охорона праці	167

6.1.1. Аналіз виробничого травматизму.....	167
6.1.2. Заходи щодо техніки безпеки і промислової санітарії.	168
6.2. Розроблення заходів захисту роботи від повеней.	171
Висновки до розділу 6	175
ВИСНОВКИ	176
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	178

Вступ

Адитивні технології (АТ) є сьогодні ключовою та динамічною галуззю сучасного виробництва, що трансформує підходи до створення продукції. Незважаючи на те, що наразі їхня частка у «великому» серійному виробництві заводів і фабрик залишається відносно невеликою, вони вже стали невіддільною частиною інноваційних процесів.

На сучасному етапі адитивні технології найбільш активно використовуються для швидкого прототипування (rapid prototyping) складних і функціональних деталей, а також широко застосовуються підприємцями та ентузіастами для створення унікальної або індивідуалізованої продукції. З огляду на специфічні особливості отриманих зразків, критично важливим є вибір оптимальних режимів друку. Це дозволяє не лише покращити якість кінцевої деталі, але й значно скоротити час на її подальшу обробку (постобробку). Адитивне виробництво вже вийшло за межі простого прототипування і використовується для виготовлення самодостатніх деталей, компонентів та механізмів.

За останні роки досягнення в галузі АТ дозволили суттєво розширити номенклатуру матеріалів, доступних для 3D-друку. На ринку представлені технології, що використовують:

- Полімерні матеріали (пластики);
- Фотополімерні смоли;
- Метали.

Хоча висока вартість обладнання для металевого друку обмежує його широке застосування, технології друку пластиками та фотополімерами є значно

доступнішими та поширенішими, що робить їх основними інструментами для швидкого прототипування (FDM, SLA/DLP, тощо).

На жаль, отримання ідеальних геометричних параметрів та якості поверхні деталі одразу після друку є практично неможливим. На якість отриманої продукції впливає комплекс взаємопов'язаних факторів: від точності початкових налаштувань та режимів друку (швидкість, температура, товщина шару) до специфічних властивостей використовуваних матеріалів та впливу параметрів зовнішнього середовища.

Таким чином, дослідження, спрямовані на вивчення та підвищення якості деталей, отриманих за допомогою адитивного виробництва, шляхом оптимізації технологічних режимів і постобробки, є на сьогоднішній день надзвичайно актуальною науково-технічною темою.

РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Сутність та історія розвитку на основі адитивного виробництва

Перед сучасними виробничими підприємствами завжди стоїть завдання оптимізації технологічних процесів з метою зниження вартості виготовлення, водночас покращуючи експлуатаційні та конструктивні характеристики виробів. Традиційно ця оптимізація реалізується через низку підходів, зокрема: модернізацію методів обробки (впровадження прогресивних методів), автоматизацію технологічних процесів (зниження вимог до кваліфікації персоналу), вдосконалення методів отримання заготовок та оптимізацію конструкції виробу.

Одним із класичних шляхів підвищення ефективності є зниження маси деталі та спрощення вузлів через зменшення кількості окремих елементів та їх з'єднань. Однак, такий підхід часто призводить до суттєвого ускладнення геометрії виробу, що висуває особливі, часто непідйомні, вимоги до традиційних (субтрактивних) технологій виготовлення.

Саме для вирішення цих протиріч було розроблено адитивні технології (АТ), які є інноваційним підходом до створення об'ємних об'єктів шляхом пошарового нарощування матеріалу. Історія сучасних адитивних технологій бере свій початок із середини ХХ століття. Ключовим етапом стало винайдення стереолітографії (Stereolithography, SLA).

Концептуально метод, що використовує світлочутливий полімер, який твердне під впливом світла, був описаний Отто Джоном Мюнцлавом ще у 1951 році. Проте промислового значення технологія набула завдяки Чарльзу Халлу, який у 1984 році запатентував SLA та заснував компанію 3D Systems [1].

Установка Халла дозволяла послідовно затверджувати тонкі шари рідкого фотополімеру, формуючи об'ємну модель.

Починаючи з 1980-х років, наукові досягнення регулярно призводили до створення нових та вдосконалення існуючих методів АВ. Масове впровадження 3D-друку для широких мас кінцевих користувачів та малих підприємств стало можливим на початку 2000-х і 2010-х років завдяки закінченню терміну дії низки ключових патентів та зниженню вартості обладнання.

Сьогодні адитивні технології увійшли у повсякденне життя та довели свою стратегічну цінність у кризових ситуаціях. Одним із найбільш яскравих прикладів, що демонструють гнучкість та оперативність АТ, є їхнє застосування під час глобального піку епідемії COVID-19.

Команда італійських стартаперів оперативно використала 3D-друк для виготовлення клапанів Вентурі, необхідних для медичних апаратів штучної вентиляції легенів. Ця ініціатива була швидко підтримана іншими країнами, що дозволило врятувати значну кількість життів. Іншим прикладом є швидке виробництво ергономічних затискачів для захисних масок, що значно полегшило умови праці медичного персоналу [2, 3].

Таким чином, адитивне виробництво зарекомендувало себе як технологія, що здатна не лише оптимізувати традиційні виробничі процеси, але й забезпечувати швидке та гнучке реагування на критичні потреби суспільства. Під терміном адитивні технології (АТ), або 3D-друк, розуміють отримання деталі методом пошарового нарощування. Усі підвиди АТ, незважаючи на значні відмінності в механізмах фіксації, ґрунтуються на єдиному принципі: послідовне формування виробу шляхом нанесення та зв'язування окремих шарів матеріалу. Розвиток цієї галузі за останні роки дозволив використовувати надзвичайно широкий спектр

сировини, починаючи від полімерів і композитів до легкоплавких та тугоплавких сплавів металів.

Серед усього різноманіття методів АВ, технологія моделювання методом пошарового наплавлення (Fused Deposition Modeling — FDM, або Fused Filament Fabrication — FFF) є найбільш розповсюдженою та комерційно доступною. Часто, коли використовують загальний термін «3D-друк», мають на увазі саме технологію FDM (рис.1.1).

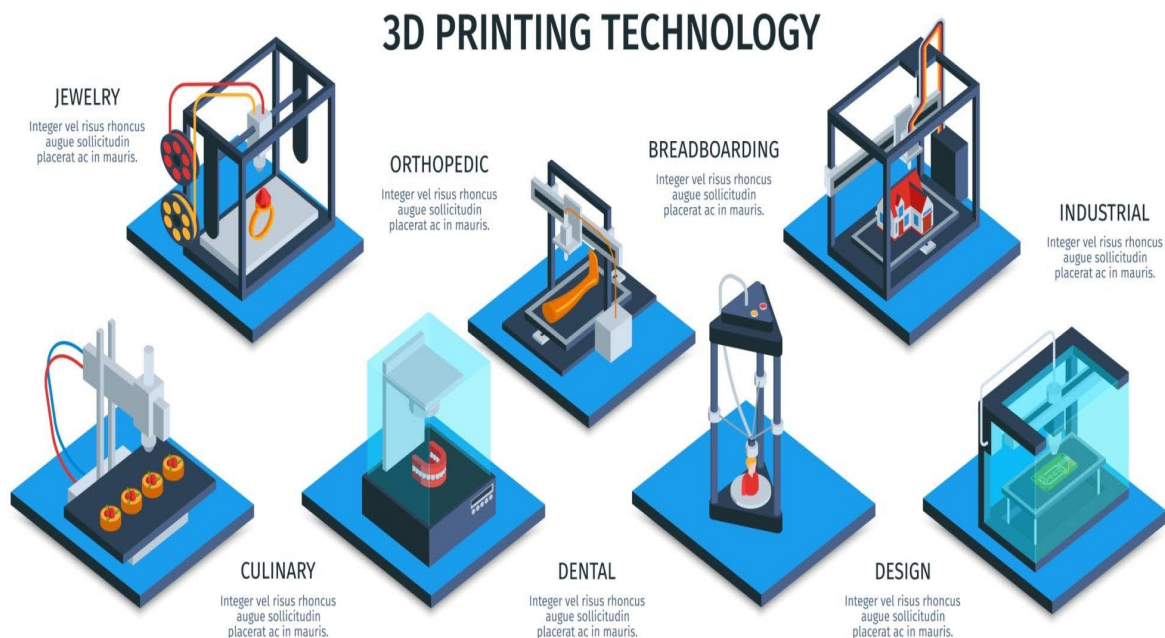


Рис. 1.1. Схема технології моделювання методом пошарового наплавлення

Принцип роботи FDM Getty Images.:

1. *Подача матеріалу:* Полімерний філамент (пластиковий дріт) подається з котушки до екструдера.
2. *Наплавлення:* Усередині екструдера матеріал розігрівається до температури плавлення.

3. Пошарове формування: за допомогою сопла з точним отвором малого діаметру розплавлений пластик видавлюється (екструдується) на робочу платформу.
4. Координатне переміщення: Сопло виконує переміщення у площині XY згідно з керуючою програмою, формуючи перший шар.
5. Нарощування: Після завершення шару, екструдер або платформа піднімається/опускається на товщину шару, і процес повторюється до повного виготовлення об'ємної моделі.

Переваги широкого впровадження FDM. Технологія FDM набула такого значного поширення завдяки кільком ключовим факторам: доступність, простоті конструкції, економічній доступності, широкому виборі матеріалів. Тому FDM є однією з перших запатентованих технологій АВ, що після закінчення дії патентів стала відкритою для масового розвитку. За принципом друку FDM є однією з найпростіших технологій, що дозволяє інженерам-ентузіастам відносно легко збирати власні пристрої.

Відносна дешевизна FDM-обладнання зробила комерційні рішення доступними практично у всіх цінових категоріях, стимулюючи ринок. На ринку представлено величезний асортимент термопластиків (PLA, ABS, PETG, Nylon та ін.), що дозволяє обрати матеріал, який найкраще відповідає технічним вимогам до готової моделі. Ця універсальність дозволяє друкувати практично будь-яким полімером у вигляді прутка.

Переваги та обмеження FDM:

- Міцність та зносостійкість: Отримувані вироби є досить міцними та зносостійкими, особливо при використанні інженерних пластиків.

- Низька вартість: Вартість як обладнання, так і витратних матеріалів (філаментів) є відносно низькою.
- Простота обробки: Використовувані матеріали легко піддаються постобробці без необхідності у спеціалізованому дорогому обладнанні. Більшість некритичних дефектів друку, за винятком розшарування, можуть бути виправлені на цьому етапі.

Водночас, FDM має і суттєві недоліки [4]:

- Низька точність: Точність друку (0.1-0.2 мм) є нижчою порівняно з іншими методами, особливо фотополімерними.
- Вимоги до постобробки: для досягнення заданих параметрів якості поверхні та високої точності більшість FDM-деталей вимагають обов'язкової додаткової обробки.

Основні матеріали, що використовуються в FDM є:

- Акрилонітрилбутадієнстирол (ABS), що характеризується високими показниками міцності та термостійкості. Вимагає використання робочого столика з підігрівом та захисного кожуха для запобігання різкому зональному охолодженню, що може спричинити деформацію (варпінг) моделі.
- Полілактид (PLA) із-за низької температури плавлення та довший період застигання, не вимагає підігріву столика, що спрощує процес друку. Проте, характеризується нижчою міцністю та термостійкістю, ніж ABS.
- Полівінілацетат (PVA) часто використовується переважно для друку підтримок, оскільки є розчинним у воді, що значно спрощує відділення допоміжних структур від готової деталі.

1.2. Адитивне виробництво у контексті технологічної трансформації та його економічне значення

Сучасний етап глобального технологічного розвитку асоціюється з елементами Четвертої промислової революції (Industry 4.0) та Шостого технологічного укладу. Інновації в галузі нанотехнологій, робототехніки, домінування цифрового середовища та використання композитних матеріалів створюють передумови для вирішення глобальних проблем людства та забезпечують технологічну безпеку та незалежність країни.

Флагманом цих передових досягнень є адитивне виробництво (AB), або 3D-друк — технології пошарового синтезу, що є найбільш динамічним напрямом "цифрового" виробництва [1].

Історично AB застосовувалося виключно для швидкого прототипування (Rapid Prototyping), дозволяючи інженерам значно прискорити проєктні операції та заощадити ресурси. Із появою нових методів та розширенням сировинної бази, 3D-друк перетворився на повноцінний інструмент для виробництва кінцевих компонентів і готової продукції у таких критичних секторах, як аерокосмічна, авіаційна та автомобільна промисловість, медицина та сфера оборони [2].

Економічні показники підтверджують ефективність AB: технології можуть збільшити прибутковість виробництва окремої одиниці продукції в середньому на 23% і знизити бар'єри для організації виробництва на 90%. Це робить AB ідеальним для дрібносерійного та персоналізованого виготовлення товарів, скорочуючи як час, так і вартість виробничого циклу.

Варто зазначити, що незважаючи на зовнішню автоматизацію, успішне впровадження АВ вимагає високого рівня міждисциплінарної експертизи. Фахівці повинні володіти глибокими знаннями у сфері матеріалознавства, процесів обробки матеріалів концентрованими потоками енергії, інженерної механіки (міцності) та метрології для забезпечення належної якості та функціональності виготовлених виробів.

Існує широкий спектр методів адитивного виробництва, які класифікуються відповідно до їхнього принципу дії (фотополімеризація, спікання, екструзія) та типу використовуваних витратних матеріалів. Основні методи АВ та їх відмінності наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Класифікація основних методів адитивного виробництва (АВ)

Група методів	Технологія (скорочення)	Принцип дії	Використовувані матеріали
1. Екструзійний	Моделювання методом пошарового наплавлення (FDM / FFF)	Матеріал подається через сопло, розплавляється та видавлюється шар за шаром.	Термопластики (PLA, ABS, PETG, Nylon), гнучкі полімери, композити з волокнами.
2. Порошковий	Вибіркове лазерне спікання (SLS)	Лазер спікає (частково плавить) порошкові частинки в потрібній області.	Порошкові термопластики (PA 12, TPU).
	Вибіркове лазерне плавлення (SLM)	Лазер повністю плавить порошок, формуючи щільний металевий шар.	Металеві сплави (Titan, Al, нержавіюча сталь, CoCr).
	Пряме лазерне спікання металів (DMLS)	Схожий на SLM, але може використовувати суміші з частковим плавленням.	Майже будь-які металеві сплави.
	Електронно-променево плавлення (EBM)	Використовує електронний промінь у вакуумі для плавлення металевого порошку.	Титанові сплави, спеціалізовані тугоплавкі сплави.
	Вибіркове теплове спікання (SHS)	Використовує тепловий елемент замість лазера/променя.	Порошкові термопластики.

Група методів	Технологія (скорочення)	Принцип дії	Використовувані матеріали
3. Полімеризація	Стереолітографія (SLA)	Ультрафіолетовий (УФ) лазер вибірково засвічує рідкий фотополімер у ванні.	Фотополімери (смоли), що твердіють під впливом УФ.
	Цифрова світлодіодна проекція (DLP)	Використовує цифровий проектор для одночасного засвічування всього шару смоли.	Фотополімери (смоли) з високою швидкістю полімеризації.
4. Струминний	Струминний тривимірний друк (3DP / Binder Jetting)	Друк рідким сполучним матеріалом (біндером) на шар порошку (гіпс, пісок, метал).	Гіпс, піщані суміші, порошкові пластики, металеві порошки.
5. Дротовий	Електронно-променеве плавлення дротом (EBFD / WAAM)	Електронний промінь плавить металевий дріт (принцип зварювання) для нанесення великих об'ємів.	Майже будь-які металеві сплави (переважно для великих деталей).
6. Ламінування	Виготовлення об'єктів методом ламінування (LOM)	Склеювання, зварювання або фіксація послідовних шарів листового матеріалу.	Папір, металева фольга, пластикова плівка.

Ця таблиця відображає основні технологічні підходи до адитивного виробництва згідно з класифікацією ASTM (стандарт ISO/ASTM 52900), де ключові відмінності полягають у механізмі фіксації матеріалу. Оскільки магістерська робота присвячена тістомісильній машині, що вимагає великих, функціональних деталей, контактуючих з харчовими продуктами, найрелевантнішими методами, які варто згадати в обговоренні, є:

- FDM/FFF: найдоступніший, використовує харчові термопластики (наприклад, PLA, PETG) — ідеально для прототипування та деяких кінцевих деталей.
- SLS: створює міцні, функціональні пластикові деталі (наприклад, з нейлону) без потреби у підтримках, що може бути корисним для складних внутрішніх механізмів.

Аддитивне виробництво (AB), або 3D-друк, є не лише ключовим компонентом сучасного технологічного укладу, але й стратегічною основою для забезпечення технологічної безпеки та незалежності країни. Системне впровадження AB у наукомісткі галузі здатне здійснити революційний прорив у сферах економіки, медицини, аерокосмічної та оборонної промисловості.

Комерційна доступність 3D-друку кардинально змінила виробничі процеси. Історично технологія застосовувалася для швидкого прототипування, забезпечуючи значну економію часу та фінансових ресурсів на етапі проєктування. Сьогодні ж, із розширенням асортименту функціональної сировини, AB активно інтегрується у виробництво кінцевих компонентів і готової продукції [2].

Ключові економічні переваги впровадження AB є визначальними:

- Збільшення прибутковості виробництва окремої одиниці продукції в середньому на 23%. Це досягається завдяки топологічній оптимізації конструкцій, мінімізації відходів та скороченню логістичних витрат.
- Зниження бар'єрів для організації локалізованих виробництв до 90%, що має критичне значення для розвитку малого та середнього бізнесу та децентралізації виробничих ланцюгів.

Можливість економічно вигідного дрібносерійного та персоналізованого виробництва робить 3D-друк ідеальним рішенням для розробки інноваційного обладнання, зокрема тістомісильної машини, де потрібна гнучкість конструктивних рішень та швидке виготовлення унікальних компонентів.

Технологічна класифікація AB базується на методі нанесення шарів (плавлення, спікання, фотополімеризація, склеювання) та типі витратних

матеріалів (порошок, рідина, філамент), що було детально розглянуто у таблиці 1. Вибір оптимального методу визначає кінцеві фізико-механічні властивості виробу.

Важливо, що попри зовнішню автоматизацію процесу, 3D-друк вимагає високого рівня інтелектуального капіталу та міждисциплінарної експертизи. Успішна розробка та виробництво функціональних виробів неможливе без глибоких знань у галузі:

1. Матеріалознавства (розуміння властивостей сировини та її поведінки під час пошарового синтезу).
2. Теплофізики та енергетики (контроль процесів обробки матеріалів концентрованими потоками енергії для уникнення внутрішніх напружень і деформацій).
3. Інженерної механіки (топологічна оптимізація та оцінка міцності з урахуванням анізотропії).
4. Метрології та контролю якості.

Таким чином, ефективне застосування адитивних технологій вимагає комплексного інженерного підходу, що поєднує точне цифрове проєктування та глибоке знання фізичних процесів.

1.2.1. Фотополімерні методи адитивного виробництва: Стереолітографія (SLA)

Другим ключовим і, фактично, першим запатентованим методом 3D-друку, є Стереолітографія (Stereo-lithography, SLA), яку запатентував Чак Халл у 1984 році. Технологія SLA використовує рідкий фотополімер, який вибірково

затвердіває під дією сфокусованого лазерного випромінювання. На рис.1.2. подано ілюстрацію принципу роботи технології Стереолітографії (SLA).

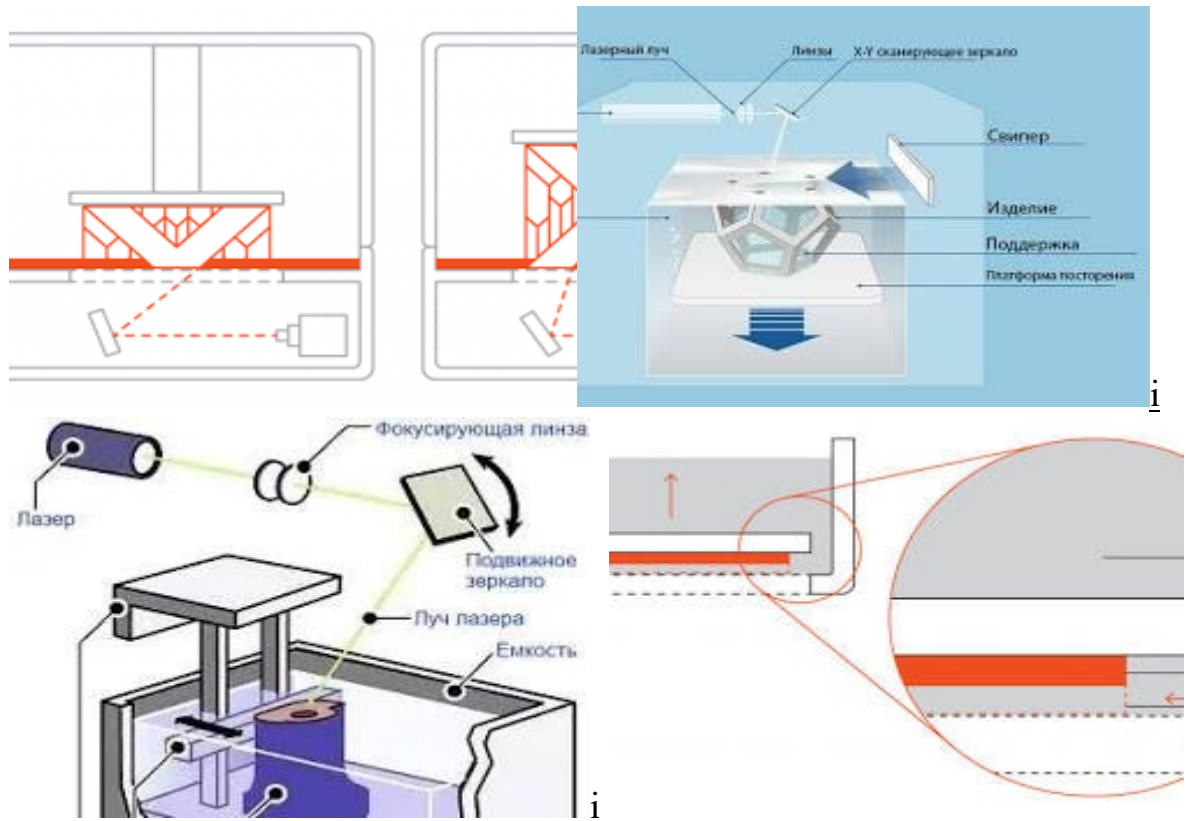


Рис. 1.2. Принцип роботи SLA технології.

Технологія SLA має наступний принцип роботи:

1. **Занурення платформи:** Платформа для друку вміщується у ванну з рідким фотополімером та занурюється на глибину, що дорівнює заданій товщині шару.
2. **Засвічування шару:** Лазер, керований спеціалізованим програмним забезпеченням та системою наведення, послідовно проходить по поверхні полімеру, викликаючи його полімеризацію (затвердіння) у заданих точках.
3. **Опускання та розрівнювання:** Платформа опускається на відстань одного шару вниз. При цьому свіпер (спеціальний механізм) може розрівнювати поверхню рідкого фотополімеру, прибираючи надлишки.

4. Повторення: Процес повторюється до повного виготовлення об'ємної моделі.

Хоча SLA забезпечує високу точність і якість поверхні, вона має вищу вартість порівняно з FDM. Матеріали (фотополімери) та обладнання (через використання складних лазерних систем) є значно дорожчими. Крім того, використання лазерних систем та робота з хімічно активними смолами вимагає вищої кваліфікації оператора та підвищує вимоги до безпеки використання.

Переваги та обмеження Стереолітографії (SLA). Незважаючи на вищу вартість, технологія SLA має низку вагомих переваг перед екструзійними методами, що робить її незамінною для високоточного виробництва [5]:

- Висока точність і якість: Забезпечується висока точність побудови, що дозволяє виготовляти тонкостінні та малорозмірні деталі зі складною геометрією та високою якістю поверхні.
- Складність конструкцій: Можливість виготовлення деталей будь-якої складності.
- Швидкість використання: Зразки, отримані з фотополімерів, можуть використовуватися одразу після завершення процесу друку та фінального затвердіння.
- Низька витрата матеріалу: Відсоток витрати матеріалу на друк підтримок є відносно низьким.

До недоліків SLA відносять: високу вартість витратних матеріалів та обладнання, обмежену кількість доступних для використання полімерів, а також високий час друку великих моделей. Крім того, неможливе одночасне використання декількох матеріалів.

Вибіркове лазерне сплавлення (Selective Laser Melting, SLM) — це технологія адитивного виробництва, що використовується для створення високоміцних, функціональних металевих деталей. Вона належить до групи порошкових методів (Powder Bed Fusion). Суть SLM полягає у використанні високоенергетичного лазера для повного розплавлення (сплавлення) тонких шарів металевого порошку. На відміну від спорідненого методу SLS (Вибіркове лазерне спікання), де відбувається лише часткове спікання частинок, SLM створює повністю щільну структуру, подібну до литого або кованого металу. На рис.1.3. надано покроковий принцип роботи.

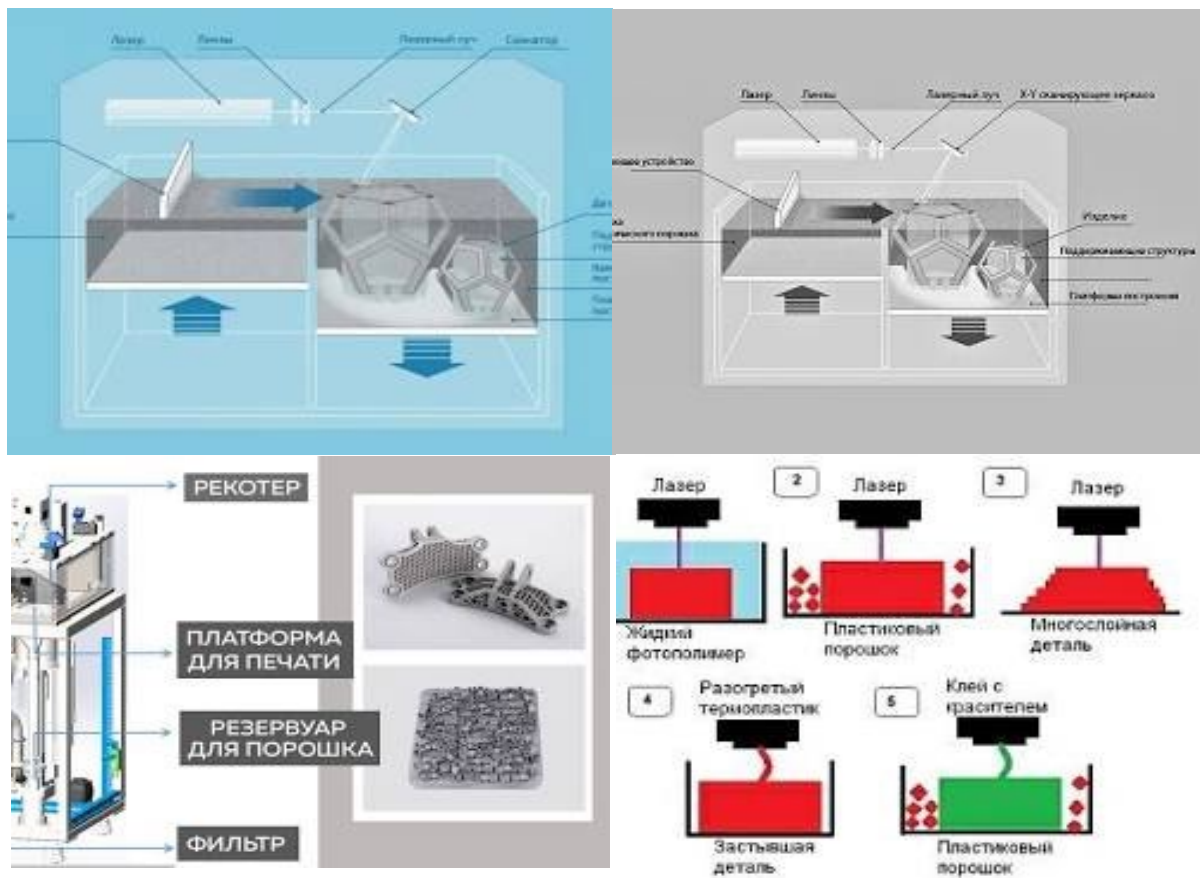


Рис. 1.3. Покроковий принцип роботи

Технологічний процес відбувається у закритій камері, наповненій інертним газом (наприклад, аргоном), щоб запобігти окисленню металу:

1. **Подача порошку:** У камері розташовані два контейнери: контейнер подачі (зліва) та робоча платформа (в центрі). Поршень у контейнері подачі піднімає металевий порошок.
2. **Розрівнювання шару:** Спеціальний ролер (свіпер) або лезо переміщується над робочою платформою, забираючи порошок із контейнера подачі та рівномірно розподіляючи його надзвичайно тонким шаром (зазвичай від 20 до 100 мікрметрів) по робочій платформі.
3. **Сплавлення (Друк):** Потужний лазер (зазвичай волоконний) сканує поверхню відповідно до цифрової 3D-моделі (CAD-файлу). У місцях, де має бути деталь, лазер повністю розплавляє металевий порошок. Розплавлений метал застигає і сплавляється з попереднім шаром.
4. **Опускання платформи:** Після завершення формування шару, робоча платформа опускається на товщину одного шару (наприклад, на 50 мкм).
5. **Повторення:** Процеси 1-4 повторюються до тих пір, поки виріб не буде повністю сформований.

Ключові особливості

- **Матеріали:** SLM працює з високоякісними металевими порошками (титан, алюміній, нержавіюча сталь, кобальт-хром та ін.).
- **Висока міцність:** Отримані деталі мають високу щільність та відмінні механічні властивості, що робить їх придатними для критичних навантажень в аерокосмічній та медичній галузях.
- **Підтримки:** Для металевого друку потрібні допоміжні структури (підтримки), які не лише утримують деталь, але й відводять надлишкове

тепло, запобігаючи деформації, спричиненій високими термічними напруженнями (warping).

- Складна геометрія: SLM дозволяє створювати деталі зі складною внутрішньою геометрією, які неможливо виготовити традиційними методами (наприклад, канали охолодження, внутрішні порожнини).

Подальший розвиток АВ призвів до появи технологій, що використовують порошкові матеріали, які мають стратегічне значення, зокрема для металообробки. Вибіркове лазерне спікання (Selective Laser Sintering — SLS) має принцип роботи, подібний до SLA, але замість рідкого фотополімеру тут використовуються дрібнодисперсні порошкові матеріали (зазвичай полімери, але можуть бути і металевмісні матеріали) [6].

У цьому методі лазер вибірково спікає (частково плавить) порошок, зв'язуючи його частинки. Неспічений порошок слугує природною підтримкою для деталі, що дозволяє створювати надзвичайно складні внутрішні геометрії.

Вибіркове лазерне сплавлення (Selective Laser Melting — SLM) є більш досконалим методом, що схожий на SLS, але використовується переважно для роботи з металевими порошками [7]. Звичайно. Ось зображення, яке ілюструє принцип роботи технології Selective Laser Melting (SLM).

1.2.2. Технологія Laser-aided Direct Metal Tooling (DMT)

Laser-aided Direct Metal Tooling (DMT), що українською перекладається як Лазерно-допоміжне пряме нанесення металу (або, більш загально, Лазерне осадження металу), є однією з найбільш прогресивних методик адитивного виробництва для роботи з металами. Ця технологія, яка використовує лазер для сплавлення металевого порошку, що подається безпосередньо в зону фокусування, має ряд значних переваг:

- Висока міцність отриманих виробів.
- Ефективне використання матеріалу (нижчі втрати порівняно з деякими іншими технологіями, як-от SLM).
- Універсальність застосування: підходить як для виготовлення нових деталей, так і для відновлення пошкоджених компонентів (ремонт).
- Можливість роботи з різноманітними металевими сплавами.
- Висока точність осадження.
- Здатність здійснювати друк на криволінійних поверхнях та формувати покриття із заданою товщиною.

Технологія DMT активно використовується у критично важливих галузях, таких як авіа- та машинобудування, енергетика та інші виробничі сектори, де потрібна висока надійність і міцність. Незважаючи на зовнішню схожість принципу пошарового нарощування з полімерними технологіями, як-от FDM, DMT є значно складнішою через використання високотемпературних процесів, пов'язаних із плавленням металевих фракцій [8].

Digital Light Processing (DLP), або цифрова обробка світлом, є методикою адитивного виробництва, яка належить до групи технологій, що використовують фотополімеризацію.

Деталі формуються пошарово шляхом взаємодії світлових променів з рідким світлочутливим полімером. DLP є технологічним аналогом стереолітографії (SLA), оскільки обидві методики базуються на затвердінні рідкої смоли.

Ключова відмінність DLP від SLA полягає у використанні джерела світла:

- SLA використовує точковий лазер для послідовного сканування та затвердіння кожного шару.

- DLP використовує спеціальний цифровий проектор (як джерело випромінювання), який одномоментно проєктує зображення цілого шару, забезпечуючи його затвердіння за один цикл.

Процес друку зазвичай відбувається в ємності з фотополімером і включає наступні етапи.

Робоча платформа опускається (або піднімається) на відстань, що відповідає висоті друкованого шару. Проектор формує світлову проєкцію друкованого шару, фокусуючи її на полімері, що викликає фотополімеризацію та затвердіння матеріалу. Платформа переміщується на висоту шару, і процес повторюється до повного завершення формування деталі. Після вилучення з полімерної ванни та очищення від залишків смоли, деталь обов'язково піддається додатковому засвічуванню в камері з ультрафіолетовим (УФ) випромінюванням для повного затвердіння [9].

Існують дві основні конфігурації DLP-принтерів: прямий друк (платформа опускається) та зворотний друк (платформа піднімається). Значно вища, ніж у SLA, завдяки одночасному засвіченню всього шару, а не пошаровому скануванню. Висока точність друку.

Широкий вибір матеріалів: Можливість використання тих самих фотополімерних смол, що й для SLA. Доступна вартість обладнання: DLP-проектори є економічно вигіднішими порівняно з високоточними лазерними установками.

1.2.3. Переваги та обмеження адитивного виробництва (AB)

Адитивне виробництво (АВ) пропонує значні переваги перед традиційними субтрактивними (фрезерування, точіння) та формувальними (лиття) методами, але має і певні технологічні обмеження.

Переваги АВ базуються на його здатності створювати об'єкти шляхом пошарового нарощування матеріалу:

1. Геометрична свобода (Complex Geometry):

- На відміну від лиття, АВ дозволяє отримувати деталі практично будь-якої складності та конфігурації.
- Можливість створення складних внутрішніх каналів, порожнин і решітчастих структур, що неможливо або вкрай складно реалізувати традиційними методами.

2. Раціональне використання матеріалу:

- Порівняно з субтрактивними методами (фрезерування, точіння), АВ є високо малоопераційним (near-net-shape) процесом, що мінімізує обсяг відходів і, відповідно, суттєво зменшує витрати матеріалу.

3. Скорочення ехнологічного иклу:

- АВ дозволяє реалізувати коротший технологічний процес від проєктування до готової деталі, зменшуючи загальні виробничі витрати.
- Особливо це помітно в одиничному та малосерійному виробництві, де простота підготовки виробництва та налаштування режимів значно економить час порівняно з необхідністю створення спеціальних форм чи оснастки.

4. Універсальність обладнання:

- На одному й тому ж апаратному комплексі можна виготовляти деталі різноманітної форми (деталі обертання, корпусні деталі тощо), що підвищує гнучкість виробництва.
- Висока міжгалузева універсальність: обладнання застосовується у критично різних сферах — від авіабудування до медицини (наприклад, індивідуальні протези).

5. Безпека та доступність:

- Сучасне АВ обладнання часто оснащено захисними кожухами, і процес відбувається у закритому просторі, що робить його одним із найбільш безпечних методів виготовлення.
- Доступність та відносно низька вартість витратних матеріалів для деяких видів АТ (наприклад, полімери FDM) сприяє їхньому широкому розповсюдженню.

Незважаючи на значні переваги, АВ має певні обмеження, які вимагають зваженого підходу до його впровадження: обмеження швидкості виробництва. Темп виробництва за допомогою АТ (особливо для великих об'ємів) помітно нижчий, ніж при використанні класичних методів (наприклад, лиття чи штампування). Це пов'язано з фізичними параметрами процесу, такими як швидкість нагрівання/охолодження, плавлення, кристалізації або полімеризації.

Наприклад, у металевому друці необхідно витримувати певні режими термічної обробки (охолодження, нагрівання) для запобігання небажаним

структурним змінам (надмірне гартування чи відпуск). Питання економічної доцільності збільшення потужностей за рахунок купівлі великої кількості дорогого обладнання залишається відкритим і вимагає індивідуального техніко-економічного обґрунтування для кожного конкретного випадку.

Навіть за високої точності друку, на поверхні деталі залишаються мікроскопічні дефекти (ступінчастість, хвилястість), спричинені пошаровим нарощуванням. Для досягнення високих вимог до якості поверхні, точних посадок або естетичного вигляду, деталі потребують обов'язкової постобробки (механічної, хімічної або термічної). Наприклад, порівняння технологій FDM і SLA при однаковій товщині шару (0.1 мм) демонструє, що, хоча SLA забезпечує естетично привабливіший вигляд, навіть її поверхня при збільшенні має помітну хвилястість [10]. Це вимагає використання більш вільних допусків або додаткової обробки для функціональних елементів.

З огляду на свої особливості, АВ найбільш перспективне у таких напрямках:

- одиничне, малосерійне та дослідне виробництво;
- виготовлення спеціального інструменту та оснастки в інструментальних цехах;
- індивідуальне виробництво, де кожна деталь має унікальні розміри (наприклад, протези, ортези);
- життєвий цикл виробу, зокрема на етапах планового технічного обслуговування та ремонту.

1.3. Області використання адитивного виробництва (АВ)

Сьогодні практично неможливо знайти галузь, де б адитивні технології (АТ) не використовувалися. Вони стрімко інтегруються у повсякденне життя,

промислове виробництво, науково-дослідну діяльність та аматорське прототипування.

Адитивне виробництво вже вийшло за межі нішевого застосування і широко використовується у таких критичних та неочікуваних сферах, як промислове прототипування та дизайн-валідація. АВ є незамінним інструментом для стартапів та інноваційних компаній. Воно дозволяє швидко та з мінімальними витратами створювати функціональні робочі прототипи на початкових етапах залучення інвестицій та верифікації концепцій. Використання АТ суттєво прискорює цикл розробки продукту.

У таких галузях як аерокосмічна, автомобілебудування та енергетика, АТ використовуються для виготовлення кінцевих деталей, які мають оптимізовану топологію та складну геометрію (наприклад, лопатки турбін, паливні форсунки).

Науково-дослідні інститути та лабораторії активно застосовують 3D-друк для швидкої та дешевої реалізації унікальних експериментальних напрацювань та виготовлення складної лабораторної оснастки.

Сільськогосподарська та спеціальна техніка де АТ знаходять застосування у виробництві спеціалізованої оснастки, нестандартних компонентів або ремонтних запчастин для сільськогосподарського та промислового обладнання.

Медицина та індивідуалізація: сфера, де індивідуальність є ключовою (наприклад, стоматологія, ортопедія), активно використовує АТ для виготовлення індивідуальних імплантатів, протезів, ортезів та хірургічних шаблонів.

Дослідження підтверджують, що інтеграція адитивних технологій у виробничий процес забезпечує значні економічні переваги. Використання АТ

сприяє зниженню загальних витрат та полегшенню виробництва складних деталей. Аналітичні дані показують, що АВ може в середньому збільшити прибутковість виробництва окремої одиниці продукції на 23% [12].

АТ суттєво знижують виробничі бар'єри для створення деталей складної форми, роблячи їх доступними (зниження до 90% складності виготовлення) [12].

Таким чином, адитивне виробництво відкриває широкий спектр можливостей не лише у безпосередньому виготовленні складних кінцевих деталей, але й у створенні недорогої, швидкозмінної та індивідуалізованої виробничої оснастки та інструменту.

1.3.1. Вибір матеріалів для адитивного виробництва

Необхідність виконання широкого спектру інженерних завдань у сфері адитивного виробництва (АВ) вимагає використання великої номенклатури матеріалів. Витратні матеріали класифікуються відповідно до технології друку та їхнього хімічного складу. Загалом їх можна поділити на три основні групи: полімери, метали та їхні сплави, а також інші спеціалізовані матеріали (природного походження, біосумісні, харчові тощо), які мають обмежене застосування у виробництві функціональних деталей.

Для технології пошарового наплавлення (Fused Deposition Modeling, FDM) використовується широка номенклатура термопластичних полімерів, які поділяються на основні (конструкційні) та допоміжні (опорні).

Таблиця 1.2. Основні (конструкційні) полімери

Матеріал	Ключові характеристики та вимоги	Застосування
Полілактид (PLA)	Низька температура плавлення (робочий діапазон: 180–220°C); простий у використанні; низька усадка.	Швидке прототипування, моделювання, деталі без високих температурних та механічних вимог.
Акрілонітрил-бутадієн-стирол (ABS)	Висока температура плавлення; вимагає підігріву робочої платформи та закритої камери для мінімізації впливу зовнішнього середовища (протяги, вологість), що може спричинити деформацію (варпінг).	Функціональні деталі, де потрібна стійкість до підвищених температур.
Поліамід (Nylon, PA)	Високі міцнісні характеристики; використовується для виготовлення поверхонь тертя та зносостійких компонентів. Висока гігроскопічність вимагає спеціальних умов зберігання.	Шестерні, підшипники, функціональні механізми.

Допоміжні (опорні) матеріали:

- Полівінілацетат (PVA): Водорозчинний матеріал, ідеальний для створення опорних структур у деталях зі складною геометрією.
- Ударостійкий Полістирол (HIPS): Використовується як опорний матеріал, оскільки добре розчиняється в лимонені, який є інертним до ABS-пластику.
- Виплавлений віск: Застосовується для створення випалюваних моделей для подальшого лиття; матеріал може використовуватися багаторазово за умови контролю температури при його виплавленні.

У технологіях стереолітографії (SLA) та цифрової обробки світлом (DLP) використовуються рідкі фотополімерні смоли різного хімічного складу. Вони класифікуються відповідно до їхніх ключових фізико-механічних властивостей: тверда смола (Standard Resin), гнучка смола (Flexible Resin), міцна смола (Durable Resin), високотемпературна смола (High

Технології селективного лазерного плавлення (SLM), прямого нанесення металу (DMT) та селективного лазерного спікання (SLS) використовують метали та їхні сплави. Ці матеріали можуть бути представлені у формі дрібнодисперсного порошку (для SLM, SLS), дроту або розплавленого сплаву (для DMT).

Оскільки матеріал є одним із головних чинників, що впливає на кінцеві характеристики виробу, для реалізації даного проєкту (виготовлення компонентів тістомісильної машини) було обрано PLA-пластик.

Вибір обумовлений його технологічними та економічними перевагами порівняно з іншими поширеними полімерами (ABS та PA):

1. PLA має нижчу вартість порівняно з більшістю інженерних пластиків.
2. На відміну від ABS, PLA не вимагає суворого дотримання температурних режимів і підігріву столу, що спрощує процес друку.
3. На відміну від PA (нейлону), PLA не має високої гігроскопічності та не вимагає спеціальних умов зберігання, що мінімізує ризики отримання незадовільних результатів друку.

1.4. Шляхи конструювання та технологія проєктування вузлів і деталей машини

1.4.1. Аналіз конструкцій тістомісильних машин та обґрунтування інноваційного підходу

На сучасному етапі розвитку хлібопекарської промисловості для масового виробництва виробів застосовується широка номенклатура тістомісильних машин. Найбільш поширеними є апарати циклічної та безперервної дії, які можуть мати горизонтальний або вертикальний приводний вал. Усі ці машини

функціонально складаються з ключових систем: дозуючих пристроїв, виконавчих механізмів із робочими органами, приводного механізму та систем управління, регулювання та блокування.

Дозуючі пристрої забезпечують точне подавання компонентів, після чого робочі органи ініціюють процес змішування. У результаті їхньої дії відбувається зміна форми, розмірів, положення та, найголовніше, фізико-механічних властивостей компонентів, що призводить до формування тіста.

Проте, існуючі тістомісильні машини мають значний конструктивний недолік:

- Постійна та незмінна геометрична форма робочих органів. Це жорстко обмежує їхні функціональні можливості протягом багатостадійного процесу змішування.
- Обмеженість регулювання. Зазвичай, єдиним регульованим параметром є число обертів приводного валу. Це не дає можливості повноцінно впливати на якість перемішування та, відповідно, на формування мікроструктури напівфабрикату.

Така конструктивна консервативність створює суттєву проблему узгодження робочих режимів із динамічно мінливими реологічними параметрами сировини (наприклад, вологопоглинальною здатністю борошна).

Через багатостадійність процесу формування хлібного тіста, багато тістомісильних машин високої продуктивності використовують кілька послідовних камер із застосуванням різних типів місильних органів (належних до різних класів змішувачів). При цьому, переважна більшість робочих камер мають циліндричну форму чи її елементи. Розглянемо типові конструкції

найбільш розповсюджених тістомісильних машин безперервної дії вітчизняного та закордонного виробництва (рис.1.4).

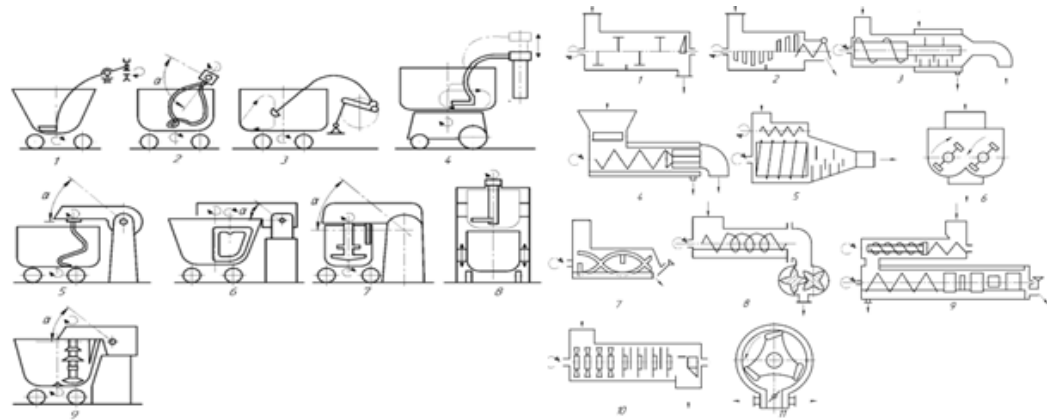


Рис.1.4. Схеми поширених тістомісильних машин періодичної та неперервної дії

На відміну від конструктивно консервативних традиційних рішень, де використовуються досить відомі робочі органи та однотипні робочі камери, запропонована тістомісильна машина дискретної дії. Вона конструктивно відрізняється від вище поданих машин (рис.1.4) і розроблена на базі імплементації фізичних принципів обертання. Конструкція забезпечує принципово нові можливості інтенсивне перемішування та пластифікація тіста. Крім цього можливість оперативного регулювання параметрів деформації під час її сплуатації.

Завдяки відмові від звичних механічних лопатевих елементів ("безлопатева" концепція), конструкція базується на імплементації фізичних принципів дискретно-імпульсного впливу, що забезпечує високу інтенсивність обробки при потенційно меншій металоємності.

Такий інноваційний підхід дозволяє:

- Збільшити відносну швидкість руху фаз, що є критичним для інтенсифікації міжфазного переносу (гідратації).
- Сформувати локальні зони турбулентності та пульсацій тиску, необхідні для ефективного та швидкого формування гомогенної мікроструктури тіста.

Таким чином, у контексті багатостадійного та реологічно складного процесу замішування тіста, незмінна геометрія робочих органів та обмеженість регулювання режимом обертання призводять до неможливості ефективно узгодити механічний вплив із динамічною зміною реологічних властивостей суміші. Це є головною причиною недостатньої ефективності та енергоємності традиційного обладнання. Подолання цих фундаментальних конструктивних обмежень вимагає переходу до принципово нових підходів у проєктуванні, які можливі лише завдяки інноваційним технологіям цифрового виробництва.

1.4.2. Концептуальні засади "цифрового" виробництва та адитивні технології у контексті модернізації харчового обладнання

Необхідність подолання конструктивних недоліків та забезпечення точного регулювання мікроструктури напівфабрикату виводить на перший план застосування Адитивних технологій (Additive Manufacturing — AM), або технологій пошарового синтезу. AM є одним із найбільш динамічних і стратегічно важливих напрямів "цифрового" виробництва. Їхня фундаментальна сутність полягає у послідовному формуванні тривимірних об'єктів шар за шаром, що кардинально відрізняється від традиційних субтрактивних методів (різання) чи формуючих методів (лиття).

Інтеграція принципів AM у сферу розробки та модернізації технологічного обладнання для приготування тіста має вирішальне значення, оскільки вона відкриває можливості для:

- Створення складної геометрії робочих органів: Традиційні методи виробництва обмежують інженерів у створенні оптимізованих, нелінійних профілів лопатей та мішалок. Адитивні технології дозволяють проєктувати робочі органи зі складною внутрішньою структурою та ідеально ергономічними поверхнями, що максимально узгоджуються з гідродинамічними потребами процесу змішування.
- Для забезпечення дискретно-імпульсного впливу та формування зон розвиненої турбулентності необхідні конструктивні елементи, здатні генерувати точні пульсації тиску або швидкості. АМ дозволяє створювати інтегровані канали чи реактивні профілі безпосередньо в робочому органі чи камері.
- Швидке прототипування та оптимізація: Можливість оперативного виготовлення та тестування різних варіантів геометрії робочого органу дозволяє швидко знаходити оптимальне рішення, яке забезпечує мінімальний опір тіста при максимальній ефективності змішування (оптимізація крутного моменту та енергоспоживання).
- Використання нових матеріалів: АМ технології розширюють можливості застосування спеціалізованих матеріалів (композитів, біосумісних полімерів чи металів) для виготовлення елементів, які контактують із тістом, що підвищує їхню зносостійкість і відповідає санітарним нормам.

Таким чином, застосування концепцій "цифрового" виробництва та АМ є конструктивною основою для розробки обладнання нового покоління, що здатне забезпечити узгоджену роботу робочого органу та камери з можливістю точного регулювання режимів змішування. Це вимагає не просто використання нової технології друку, а комплексної перебудови всього інженерного підходу до проєктування, що детально буде розглянуто далі.

1.4.3. Інтеграція принципів АМ у конструювання вузлів тістомісильної машини

Реалізація потенціалу, закладеного в концепції АМ (як описано в п. 1.4.2.), вимагає системного застосування новітніх інженерних методологій на етапі проєктування. Глобальний контекст технологічної трансформації вимагає, щоб сучасні інноваційні процеси, які кардинально змінюють філософію інженерної справи, були інтегровані у проєктування харчового обладнання. Розвиток напрямків, як-от робототехніка та композитні матеріали, відкриває передумови для вирішення ключових проблем, виявлених у традиційних тістомісах.

Сутність інтеграції полягає у переході до функціонально-орієнтованого проєктування. Сучасне машинобудування, особливо в контексті розробки нового обладнання, як-от тістомісильна машина, вимагає застосування інтегрованого підходу, що поєднує класичні інженерні принципи з інноваційними виробничими методиками. В рамках даного проєкту ключовим є використання параметричного та функціонального конструювання з подальшою реалізацією компонентів через адитивне виробництво.

Основні шляхи конструювання в цьому контексті включають:

1. Функціональний аналіз та синтез: Визначення ключових вузлів машини (привідний механізм, робочий орган, корпус) та їхніх функцій. На цьому етапі проєктується архітектура машини, що забезпечує оптимальний процес замішування тіста з можливістю регулювання деформації.
2. Топологічна оптимізація: Проєктування деталей здійснюється з урахуванням мінімізації маси при збереженні необхідної міцності та жорсткості. Це особливо актуально для 3D-друку, оскільки дозволяє

економити матеріал і час, одночасно забезпечуючи елементи з ідеальною гідродинамічною формою.

3. Збірна конструкція (Modular Design): Розробка моделі з окремих вузлів і деталей, спроектованих для максимально точного та швидкого з'єднання. Це полегшує як адитивне виготовлення компонентів, так і подальше складання та обслуговування кінцевої моделі.

Процес проєктування вузлів та деталей тістомісильної машини реалізується через системи автоматизованого проєктування (CAD). Цей етап включає:

- Створення 3D-моделі: Застосування параметричного моделювання для розробки кожної деталі, що дозволяє легко вносити зміни та адаптувати розміри. Критично важливим є дотримання конструкторських допусків та посадок, особливо для рухомих з'єднань, які мають бути точно виготовлені на 3D-принтері.
- Складання (Assembly): Віртуальна перевірка збірки всіх компонентів у середовищі CAD для виявлення колізій та підтвердження функціональності.
- Підготовка до друку (Slicing/STL): Конвертація 3D-моделей у формат, придатний для адитивного виробництва (наприклад, STL).

Вибір адитивних технологій (3D-друку) як основного методу виготовлення компонентів диктує специфічні вимоги до проєктування. Дизайн для адитивного виробництва (DfAM – Design for Additive Manufacturing) передбачає мінімізацію опорних структур. Складові частини мають проєктуватися так, щоб зменшити потребу в опорних матеріалах під час друку, що знижує витрати та спрощує постобробку. Вибір геометрії та товщини стінок повинен враховувати механічні властивості обраних для друку матеріалів. При проєктуванні необхідно враховувати, що деталі, отримані методом пошарового нарощування, мають

різну міцність у різних напрямках, що вимагає орієнтувати деталі на платформі друку відповідно до основного навантаження (наприклад, максимального крутного моменту).

Після підготовки 3D-моделі відбувається безпосередній 3D-друк компонентів. Оскільки в роботі ставиться завдання дослідження, налаштування режимів друку (температура, швидкість, заповнення) стає частиною технології проєктування, адже це безпосередньо впливає на якість поверхні та точність розмірів [1.2].

Таким чином, технологія проєктування тістомісильної машини є циклічним процесом, що об'єднує комп'ютерне моделювання, інженерний аналіз та специфічні вимоги адитивного виробництва для успішної збірки повнофункціональної фізичної моделі, здатної реалізувати регульований дискретно-імпульсний вплив.

Постановка мети та задач дослідження

На основі проведеного огляду та з урахуванням практичних потреб проєктування нової тістомісильної машини, метою роботи є:

теоретичне проєктування та практичне виготовлення компонентів тістомісильної машини за допомогою адитивного виробництва, а також оптимізація технологічних режимів FDM-друку для забезпечення необхідної якості та функціональності отриманих деталей.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

1. Проєктування та моделювання: розробити повний комплект 3D-моделей усіх складових частин машини, включаючи робочу камеру та робочий орган (місильний), у середовищі CAD.

2. Інженерний Аналіз: провести аналіз напружено-деформованого стану (навантажень) ключових компонентів (особливо робочого органу) у SolidWorks або аналогічному ПЗ для виявлення слабких місць та оптимізації їхньої конструкції перед друком.
3. Експериментальна оптимізація режимів друку: Провести серію експериментів з FDM-друку для визначення оптимальних технологічних режимів (температура, швидкість, висота шару), які забезпечують максимальну точність розмірів і мінімальну шорсткість поверхні.
4. Виготовлення та збірка: виготовити всі необхідні деталі з обраного матеріалу (PLA-пластик) та здійснити збірку повноцінного прототипу тістомісильної машини.
5. Функціональне тестування: провести візуальний та функціональний аналіз зібраної конструкції моделі:
 - Виявлення мертвих зон у робочій камері.
 - Оцінка ефективності дії пластифікатора (робочого органу) в процесі змішування.
 - Оцінка загальної конструкційної стійкості машини під навантаженням.

Висновки до розділу 1

В рамках цього розділу було проведено аналіз літературних джерел, що описують технології та здобутки адитивного виробництва (AB) з моменту їх виникнення. Описано сутність основних технологій 3D-друку, їхні ключові переваги та недоліки, а також особливості використовуваних матеріалів (полімерів, металів, фотополімерів).

Проведений огляд підтверджує, що, незважаючи на різноманітність технологій, вони можуть бути розділені на два основні напрямки: полімерний

друк та металевий друк. Вартість обладнання та витратних матеріалів суттєво варіюється, що визначає доцільність їхнього застосування. Технології, як-от DMT та SLM, є високоточними та дорогими, тоді як FDM (Fused Deposition Modeling) залишається найбільш доступною та економічно вигідною для прототипування та виготовлення тестових моделей у невеликих масштабах.

Виходячи з цілей даної роботи — прототипування нової тістомісильної машини — прийнято рішення про використання FDM-технології та PLA-пластику як основного матеріалу, зважаючи на його простоту у використанні, низьку вартість та відсутність потреби у складних умовах друку. Хоча FDM має ряд недоліків, пов'язаних із якістю поверхні та точністю, їх можна мінімізувати шляхом ретельної підготовки до друку та оптимальної постобробки. Це вимагає проведення експериментального дослідження.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ 3D ДРУКУ

2.1. Особливості та доцільність застосування технології FDM для виготовлення дослідних деталей

У сучасному приладобудуванні та машинобудуванні, що охоплює весь цикл від проєктування до виготовлення, 3D-друк за технологією FDM (Fused Deposition Modeling) є найбільш доцільним на ранніх та дослідних етапах виробництва. Цей метод ідеально підходить для створення складних полімерних корпусів, прототипів механізмів із низьким експлуатаційним навантаженням та складових частин конструкції, що підлягають подальшій перевірці. Оптимізація конструкції шляхом використання полімерних компонентів дозволяє досліднику швидко перевіряти інженерні гіпотези, мінімізуючи загальну вартість проєкту.

Оскільки перед впровадженням виробу у виробництво його компоненти відтворюються у формі прототипу, критичне значення набуває швидкість та вартість його отримання. Використання адитивних технологій дозволяє суттєво знизити витрати на прототипування — від створення чорнових прототипів для візуалізації до виготовлення повноцінних моделей, які задовольняють дослідницькі вимоги.

Вимоги до якості деталей, отриманих FDM-друком, у контексті даного проєкту є особливо високими, оскільки вони визначають функціональність ключових вузлів машини.

Ключовим завданням даної роботи є забезпечення найбільш якісного проєктування деталей та їх виготовлення безпосередньо в процесі друку.

Проєктування робочої камери вимагає особливої точності, оскільки вона є багатогранною та збірною конструкцією, що складається з окремих бокових та

профільних частин. Оскільки робочий процес передбачає рух рідин (замішування тіста), з'єднання усіх складових частин камери має бути герметичним. Це безпосередньо залежить від:

- точності прилягання з'єднувальних площин.
- мінімальних допусків на лінійні розміри, щоб виключити зазори між елементами.
- конструкційна особливість до герметичності накладають обмеження на хвилястість поверхні та вимагають мінімізації деформації (варпінгу) великих плоских деталей під час друку.

До робочого органу (місильного вала) та його взаємодії з камерою висуваються вимоги, спрямовані на підвищення ефективності роботи. Необхідно забезпечити мінімальне тертя робочого органу об бічні стінки камери та у вузлах обертання. Це вимагає високої точності діаметру валу, діаметру місильного барабана та відповідних отворів. Крім цього оптимальної якості поверхні у зоні контакту, що мінімізує опір руху та енергоспоживання.

Виходячи з поширеної сутності FDM-технології, деталі після друку мають типові недоліки, такі як хвилястість (східчастість) поверхні та помилки розмірів, які виникають через:

1. Помилки налаштування слайсера/принтера.
2. Фізичні обмеження процесу (анізотропія, усадка матеріалу).

Оскільки використання деталей одразу після друку для збірки механізмів (особливо тих, що вимагають точних посадок або герметичності) недопустиме, критично важливою є мінімізація цих дефектів безпосередньо на етапі друку. Це дозволить скоротити необхідну постобробку, яка є трудомісткою і може

порушити функціональні розміри, що є неприпустимим для герметичних з'єднань.

Таким чином, у даній роботі акцент робиться на експериментальній оптимізації режимів FDM-друку для досягнення такої якості, яка максимально задовольняє функціональні вимоги до збірної робочої камери та рухомого робочого органу.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єкт дослідження є процес адитивного виробництва (3D-друку) компонентів (вузлів та деталей) нової тістомісильної машини з подальшим визначенням впливу деформацій на конструктивні елементи машини та емітація замішування дріжджового тіста. Предмет дослідження – вплив технологічних параметрів друку (режими роботи обладнання) та характеристик матеріалів на точність геометричних розмірів і якість поверхні зібраної конструкції при навантаженні вузла машини на структуроутворення тіста.

Під час дозування компонентів для змішування, вони піддаються складній механічній обробці: розтягуються, в умовах складного напруженого стану, стискаються при дії місильного барабану та пластифікатора. Для дослідження нами спроектовано та виготовлено модель машини.

2.1.1. Класифікація та причини виникнення технологічних похибок FDM-друку

Успішна реалізація функціональних вимог до робочої камери та місильного вала тістомісильної машини вимагає глибокого розуміння та контролю типових похибок, що виникають при FDM-друку. Ці дефекти можна класифікувати за їхньою природою та візуальними проявами. Ці недоліки безпосередньо стосуються кількості матеріалу, що подається через сопло.

1. Надмірне екструдювання (Over-extrusion) характеризується видавлюванням надлишкової кількості матеріалу, що призводить до формування потовщених стінок та зайвого матеріалу на поверхні (напливів). Причини включають неправильні налаштування коефіцієнта екструдювання (множника потоку) у слайсері.

Відхилення діаметра пластикової нитки від номінального значення, що використовується в програмі. Недостатнє екструдювання (Under-extrusion) виникає, коли матеріалу видавлюється менше, ніж потрібно, що призводить до прогалин у шарах, слабкого зчеплення та неповного заповнення (особливо верхніх суцільних шарів). Причини:

- Занижений коефіцієнт екструдювання.
- Неправильний діаметр пластикової нитки.
- Занадто низький відсоток заповнення (Infill) або недостатня кількість суцільних верхніх шарів.

2. Термічні та деформаційні похибки. Ці похибки виникають через некоректний тепловий баланс у процесі нарощування шарів: *провисання/Деформація (Oozing/Drooping)*. Виникає, коли полімер не встигає застигнути до прибуття сопла для друку наступного шару. Це спричинено надмірно високою температурою друку, недостатнім або відсутнім охолодженням деталі та занадто високою швидкістю друку, що не дає часу на охолодження.

Розшарування Моделі (Layer Delamination). Спостерігається слабе зчеплення між сусідніми шарами. Це критично знижує міцність. Причини: занадто велика висота шару відносно діаметра сопла та занадто низька температура друку, що перешкоджає ефективному плавленню контактних поверхонь.

3. Механічні та кінематичні похибки. Ці недоліки пов'язані з некоректною роботою мехатронних вузлів принтера. *Зміщення шару (Layer Shifting)*, що характеризується горизонтальним зсувом усієї частини моделі. Основною причиною є недоліки мехатронних складових (наприклад, пропуск кроків кроковим двигуном) через:

- Відсутність зворотного зв'язку в приводах.
- Високе прискорення при переміщенні друкованої головки.
- Високоамплітудні вібрації або фізичний опір руху.

Періодичні недоліки бокової поверхні виникають як регулярна хвилястість або зміна товщини стінки, що критично для забезпечення герметичності робочої камери. Причини:

- Нерівномірне екструдювання, спричинене, наприклад, поганою якістю або відхиленням від допусків пластикового прутка.
- Коливання температури друку (термостабільність).
- Механічні проблеми (недостатня жорсткість робочого столика, проскакування привідної шестерні екструдера, зношення ременів).

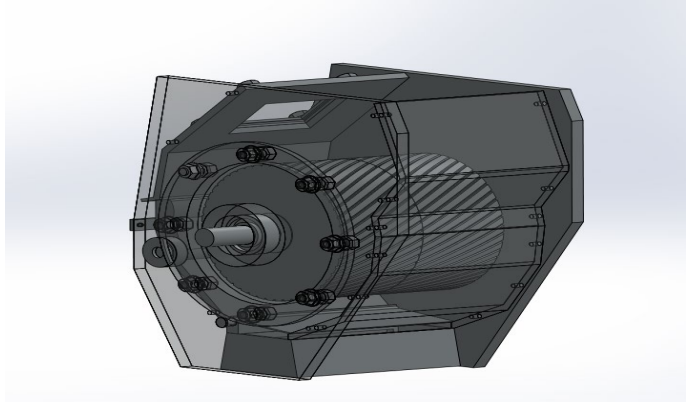
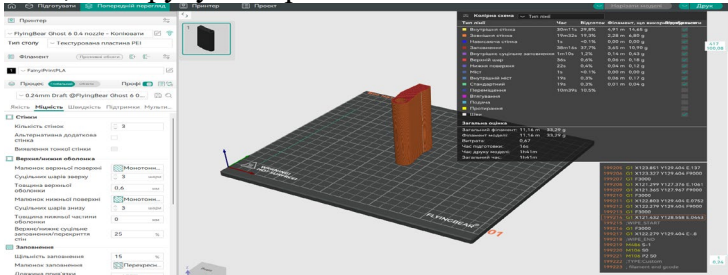
Ця класифікація формує основу для подальшого експериментального дослідження, метою якого є оптимізація режимів FDM-друку для мінімізації цих похибок. Це дозволить досягти необхідної точності та якості поверхні, особливо для критично важливих елементів збірної робочої камери та рухомого робочого органу.

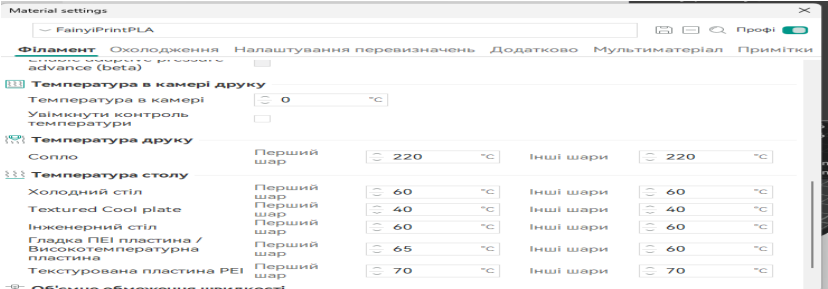
2.2. Етапи та алгоритм виготовлення деталей методом 3D-друку

Алгоритм виготовлення деталей за допомогою адитивного виробництва (AB) є універсальним для більшості його технологій. Варіації спостерігаються лише у

специфічних налаштуваннях на етапах підготовки, самого друку та постобробки. Можна виділити шість основних етапів, кожен з яких є потенційним джерелом похибок [13].

Таблиця 2.1. Основні етапи технологічного циклу 3D-Друку

№	Етап	Ключові дії та значення
1.	Створення 3D-моделі	 Вибір та налаштування CAD-програмного забезпечення (наприклад, SolidWorks). Важливо забезпечити високу дискретизацію моделі та коректний формат збереження (наприклад, STL) для наступних етапів [15].
2.	Підготовка моделі (Слайсинг)	 Використання спеціалізованого ПЗ (слайсера) для нарізки моделі на шари. Приймаються ключові технологічні рішення (тип і щільність заповнення, товщина стінок, швидкість), що визначають кінцеві характеристики, час друку та вартість деталі.
3.	Вибір оптимальних режимів	Встановлення параметрів роботи принтера відповідно до обраного матеріалу (температура сопла, робочої платформи, швидкість екструзії). Це найбільш суттєво впливає на якість отриманого виробу.

№	Етап	Ключові дії та значення
		
4.	Підготовка принтера	Калібрування та налаштування: очищення робочої поверхні, нанесення адгезійного шару (клейової основи), перевірка позиціонування сопла, чистка сопла від лишнього пластику. 
5.	Друк деталі	Автоматизований процес. Через відсутність зворотного зв'язку в більшості FDM-принтерів, рекомендується візуальний моніторинг для запобігання значній втраті матеріалу через брак 
6.	Постобробка деталі	Усунення неточностей і недоліків друку, видалення опорних структур (підтримок, підкладки), звільнення рухомих з'єднань. Дані операції виконувалися в процесі виготовлення деталей. Для цього виконувалися заміри та встановлення необхідної температури із швидкістю руху сопла.

Помилки, допущені на будь-якому з етапів, можуть призвести до непоправного браку. Джерела виникнення похибок можуть бути згруповані за чотирма основними видами:

1. Програмні помилки: Недоліки у вихідному CAD-файлі, помилки побудови моделі або некоректне перетворення моделі в G-код (слайсінг).
2. Помилки в режимах: Неправильний вибір оптимальних параметрів друку (наприклад, температура, коефіцієнт екструдуювання).
3. Помилки налагодження: Неточність позиціонування сопла, недостатня жорсткість конструкції, порушення плавності переміщення мехатронних вузлів.
4. Помилки постобробки: Некоректне видалення опорних елементів або механічна обробка, що порушує геометричну точність.

Найбільш суттєві недоліки, що впливають на якість, формуються на етапах слайсінгу (2) та вибору оптимальних режимів друку (3).

Якість фінальної деталі також критично залежить від дотримання умов зберігання матеріалу та режиму друку. Недооцінка цих факторів часто призводить до значних втрат часу та матеріальних ресурсів.

Гігроскопічність матеріалів. Деякі полімери, як-от нейлон (РА), є високо гігроскопічними. При недотриманні умов зберігання (герметичність, осушувач), накопичена в прутку волога при нагріванні до температури плавлення (240–260 °С) починає випаровуватись [16]. Це викликає нестабільну екструзію (місцями надмірну, місцями недостатню) та формування дефектів.

Чутливість до середовища. Полімери, як-от ABS-пластик, є чутливими до навколишнього середовища. Різке охолодження зони друку (наприклад, протяг)

може призвести до відшарування шарів або варпінгу. Для уникнення цього необхідно використовувати захисні кожухи для принтера.

Пошук і усунення джерел браку та недоліків є трудомістким і витратним процесом. В умовах сучасного виробництва час є ключовим ресурсом. Чим менше часу витрачено на ідентифікацію та виправлення помилок друку, тим більше часу може бути спрямовано на інші етапи проєкту або на збільшення обсягів продукції. Саме тому оптимізація процесів підготовки та друку є важливою задачею як для наукових досліджень, так і для промислових підприємств.

Постобробка є фінальним етапом, що коригує недоліки друку. Вона може бути: ручною, автоматизованою, хімічною. Ручна з використанням механічних інструментів (наждачний папір, шабери). При автоматизованою використовують верстати з ЧПК. У хімічній використовують спеціальні речовини, що взаємодіють з основним матеріалом (наприклад, обробка ABS-пластику слабким розчином кислоти для досягнення глянцевого блиску).

2.2.1. Застосування 3D-друку у приладобудуванні: від прототипування до функціональних компонентів

У реаліях сучасного приладобудування сфера застосування 3D-друку не обмежується лише прототипуванням. Адитивні технології успішно використовуються для виготовлення функціональних складових частин механізмів, які не піддаються критично високим експлуатаційним навантаженням.

Ключові напрямки застосування у приладобудуванні:

1. Виготовлення компонентів нових приладів:

- Корпусні елементи та оболонки.
- Органайзери та внутрішні утримувальні структури.
- Перехідники та нестандартні з'єднувальні елементи.
- Пластикові шестерні та інші кінематичні вузли з низьким навантаженням.

2. Технічне обслуговування та ремонт:

- Ремонт пошкоджених приладів з використанням 3D-друку металами (наприклад, технологія DMT).
- Виготовлення запасних частин для приладів, що вже експлуатуються, особливо для тих, чиє оригінальне виробництво припинено.

3. Виготовлення допоміжної оснастки:

- Створення виробничої оснастки, пристосувань, кондукторів та інструментів, що застосовуються на складальних чи контрольних операціях.

На етапі завершення конструювання часто виникає необхідність зібрати перший зразок готового виробу для проведення функціонального тестування та валідації. Традиційні методи (механічна обробка, лиття) роблять виготовлення всіх необхідних деталей у кількості одного екземпляра досить дорогим та тривалим процесом.

3D-друк, навпаки, дозволяє суттєво спростити та здешевити цей критичний етап. Він надає можливість швидко отримати необхідні функціональні компоненти, що забезпечує гнучкість у внесенні змін та мінімізацію витрат на одиничне виробництво.

2.3. Класифікація та технічні характеристики обладнання для 3D-друку

Розвиток сучасної промисловості стимулює створення нових видів обладнання для адитивного виробництва. На ринку представлена велика кількість 3D-принтерів, які відрізняються технічними характеристиками (ТТХ), видами кінематики та функціональними можливостями. Для зручності та відповідно до функціональних можливостей і сфер використання, 3D-принтери можна класифікувати на три основні групи:

1. Домашні 3D-принтери (Desktop 3D Printers) — це моделі, адаптовані для персонального, аматорського або малого бізнес-використання. Вони займають найдоступніший ціновий сегмента. Габарити та обоча она мають відносно невеликі розміри робочого столу та обмежену максимальну висоту друку. Найчастіше використовують FDM-технологію з термопластмасами (PLA, ABS) і рідше — SLA-технологію з поширеними фотополімерними смолами. Складні та дорогі технології, як-от друк металами, у цьому сегменті не застосовуються. Відрізняються нижчою точністю друку та низькою загальною потужністю, якої, однак, достатньо для виготовлення малогабаритних виробів..Вимагають періодичного ручного калібрування. Мають максимально спрощений інтерфейс взаємодії, оскільки орієнтовані на кінцевого користувача.

2. Напівпрофесійні (комерційні) 3D-принтери - це моделі призначені для малого та середній бізнесу, інженерні відділи, наукові лабораторії, архітектурні студії, швидке прототипування функціональних деталей. Технології: FDM, SLA/DLP є високої роздільної здатності, SLS (селективне лазерне спікання полімерним порошком). Основні характеристики:

- Значно вищий ступінь автоматизації та стабільності друку.

- Більша точність та повторюваність результатів.
- Наявність закритих, термостабілізованих камер для роботи з інженерними пластиками (ABS, Nylon, полікарбонат).
- Можливість використання дорожчих та міцніших матеріалів.

До переваг можна віднести високу якість друку та надійність для виробництва функціональних прототипів та невеликих партій кінцевої продукції.

3. Промислові 3D-принтери призначені для серійного виробництва, виготовлення кінцевих деталей для аерокосмічної, медичної та автомобільної промисловості. Використовують технологію SLM (Селективне лазерне плавлення металів), DMT (Пряме нанесення металу), Binder Jetting, високопродуктивні версії SLS. До основних характеристик належать великі робочі об'єми та висока швидкість. Максимальна точність і дотримання жорстких промислових допусків при складні системи контролю середовища (інертні гази для металевих друку). Крім цього рієнтація на найміцніші та високотехнологічні матеріали (титанові сплави, спеціалізовані полімери). До переваг належать здатність виготовляти кінцеві, високоміцні та сертифіковані деталі, які неможливо створити традиційними методами.

Оскільки в даному дослідженні акцент робиться на FDM-технології, для наочності наведемо її загальний принцип. Полімерний пруткок подається в нагріту голівку (екструдер), де плавиться і видавлюється через сопло. Голівка рухається у двох горизонтальних площинах (X та Y), пошарово наносячи матеріал на робочу платформу, яка опускається після завершення друку кожного шару (рух по осі Z).

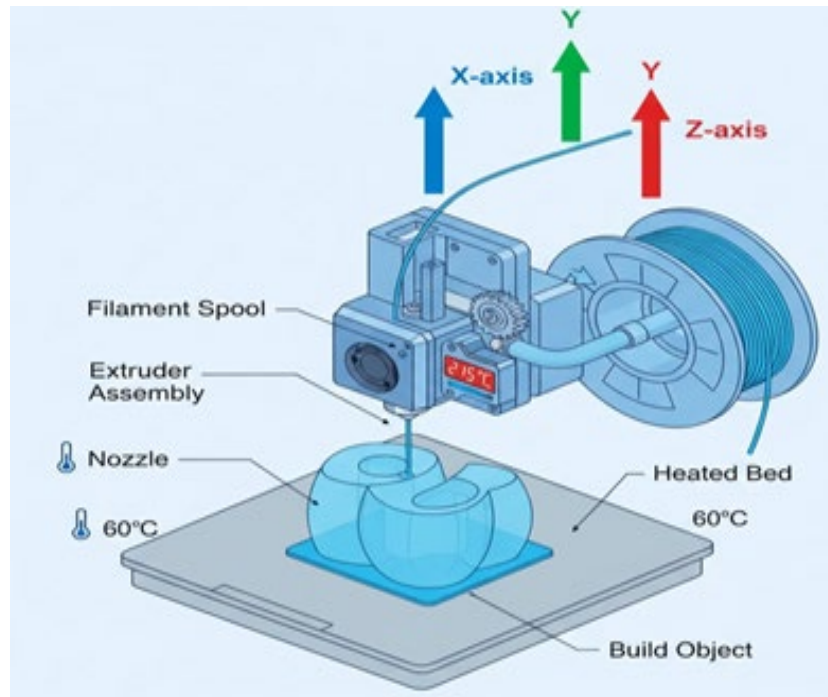


Рис. 2.1. Схема технології FDM (Fused Deposition Modeling).

Нанесення матеріалу в технології FDM (Fused Deposition Modeling) відбувається пошарово та є контрольованим процесом екструзії. Полімерний пруток (філамент) розмотується з котушки (Filament Spool) та подається до екструдера. Всередині вузла екструдера (Extruder Assembly) матеріал нагрівається до температури плавлення (наприклад, 215 °C для PLA). Розплавлений матеріал видавлюється через сопло (Nozzle) з певним діаметром (наприклад, 0.4 мм) на робочу платформу або на попередній шар. Сопло рухається у горизонтальній площині (осі X та Y) відповідно до згенерованої моделі. Кожен шар послідовно наноситься на попередній.

Після завершення шару, платформа опускається на висоту, що дорівнює товщині шару (вісь Z), і процес повторюється до повного формування об'єкта.

Таким чином, деталі формуються шляхом фізичного зчеплення (зварювання) гарячого матеріалу з нижніми, вже охолодженими шарами, що є основою для виникнення анізотропії та хвилястості поверхні.

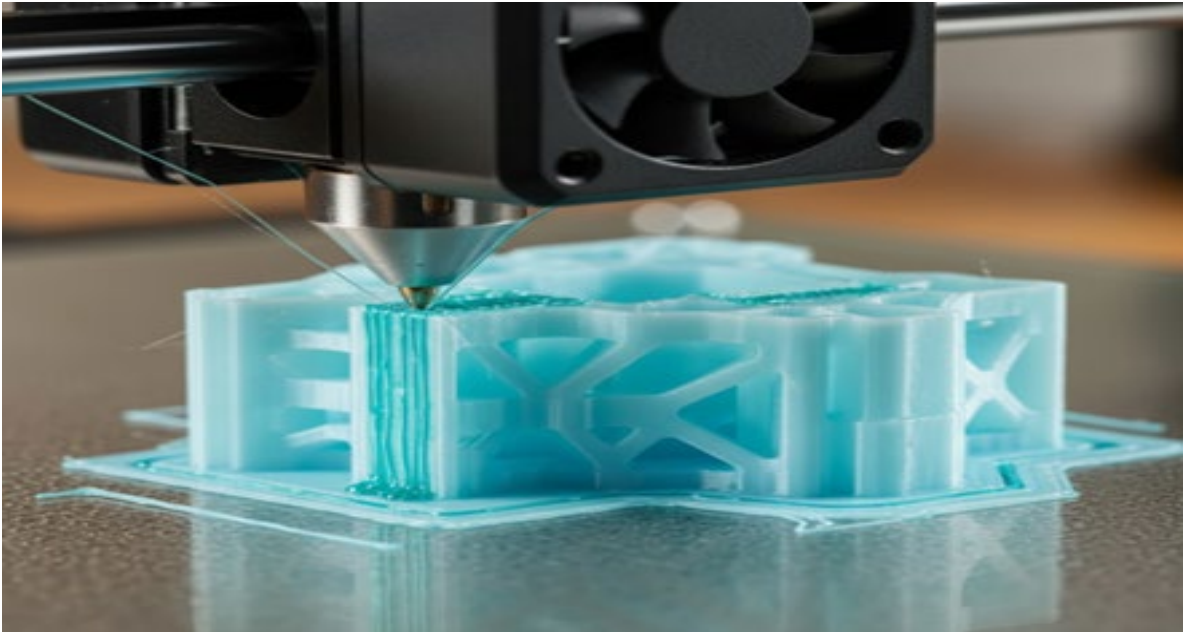


Рис. 2.2. Кінематичні особливості 3D-принтерів та їх вплив на якість друку

Вибір оптимальної моделі 3D-принтера, особливо для виконання точних інженерних завдань, вимагає обов'язкового врахування його кінематичних особливостей. Конструкція механізмів, що забезпечують рух, суттєво впливає як на точність позиціонування, так і на кінцеву якість друку. Під терміном "якість друку" може розумітися широкий спектр параметрів, залежно від завдання:

- Геометрична точність та дотримання допусків.
- Низька шорсткість поверхні.
- Жорсткість та монолітність структури.

Хоча не всі кінематичні моделі демонструють найвищі показники за всіма параметрами, вони розширюють можливості 3D-друку, дозволяючи створювати

конструкції, які іншими методами є або складними, або занадто витратними. На сьогоднішній день масово використовуються чотири основні види кінематики.

Картезіанська схема є однією з найбільш розповсюджених для технології FDM. Вона базується на декартовій системі координат, використовуючи три взаємно перпендикулярні осі: X , Y та Z . Рух друкуючої головки (екструдера) та/або платформи здійснюється вздовж цих осей.

Існує декілька варіацій розподілу руху між екструдером і платформою:

1. Рухома платформа по X/Y : Платформа рухається по одній із горизонтальних осей (наприклад, Y , а екструдер — по іншій (X) та у висоту (Z).
2. Рухома платформа по Z (Пруша-подібна): Найбільш поширений варіант. Платформа виконує переміщення лише по висоті (Z), тоді як екструдер рухається у двох горизонтальних площинах (X та Y).
3. Нерухома платформа (промисловий): Платформа є нерухомою; екструдер переміщується по всіх трьох осях (X , Y , Z).
4. Рухома платформа по $X/Y/Z$: Платформа рухається по X та Y , а екструдер — лише по Z .

Переваги та застосування полягає у стабільності результатів. Схема забезпечує високу стабільність і повторюваність друку. Відрізняється відносно простою конструкцією та кінематикою, що сприяє її масовому поширенню. Широко використовується у комерційних цілях для друку побутових об'єктів, сувенірів та у сфері прототипування.

Для комерційних та професійних рішень часто зустрічаються два різновиди цієї схеми, спрямовані на підвищення швидкості та зменшення інерції:

- CoreXY: Складна система ременів, де рух по X та Y контролюється двома незалежними двигунами. Подібна до CoreXY, але з простішою (хоча і менш жорсткою) системою ременів.

Картезіанська схема — це найбільш поширений тип кінематики, який використовується в 3D-принтерах, особливо для технології FDM (Fused Deposition Modeling). Вона заснована на декартовій системі координат (X, Y, Z), де рух друкуючої головки (екструдера) та/або робочої платформи здійснюється вздовж трьох взаємно перпендикулярних осей. Ключова особливість полягає в тому, що всі рухи є незалежними по осях X, Y та Z. Це забезпечує прямий контроль над позицією в просторі. Екструдер рухається у горизонтальній площині (X та Y). Робоча платформа рухається лише по вертикальній осі (Z) вниз. Простота та жорсткість конструкції. *Недолік:* інерція платформи (що збільшується з масою деталі) може обмежувати швидкість друку.

Н-Bot / CoreXY (Рухома платформа по Z, швидкий екструдер) де платформа рухається лише по Z. Екструдер рухається по X та Y за допомогою складної системи ременів, контрольованих двома двигунами. *Перевага:* легкий екструдер забезпечує високу швидкість і прискорення, мінімізуючи інерцію. *Застосування:* найчастіше зустрічається у комерційних та професійних рішеннях.

Нерухома платформа залишається нерухомою. Екструдер рухається по всіх трьох осях (X, Y, Z). Максимальна стабільність платформи та можливість друку великих і важких деталей. Забезпечує практично ідеальну стабільність і повторюваність результатів друку та відносно проста конструкція робить принтери доступними у виробництві та обслуговуванні. Крім цього висока точність позиціонування забезпечується завдяки прямим механічним зв'язкам з кроковими двигунами. Широко використовується як для побутового друку (сувеніри, прототипи), так і для комерційного виробництва.

Дельта-схема заснована на паралельній кінематиці, де друкуюча головка (екструдер) підвішена на трьох незалежних, синхронізованих валах або важелях. На відміну від картезіанської схеми, рух екструдера по осях X, Y та Z є результатом координованої роботи всіх трьох приводів. Рухається лише легка друкуюча головка. Робоча платформа залишається нерухомою (або може бути круглою). Позиція головки в просторі визначається тригонометричними обчисленнями, що перетворюють лінійний рух трьох приводів у тривимірну координату. Це вимагає більш складного програмного забезпечення (прошивки) для керування рис.2.3.

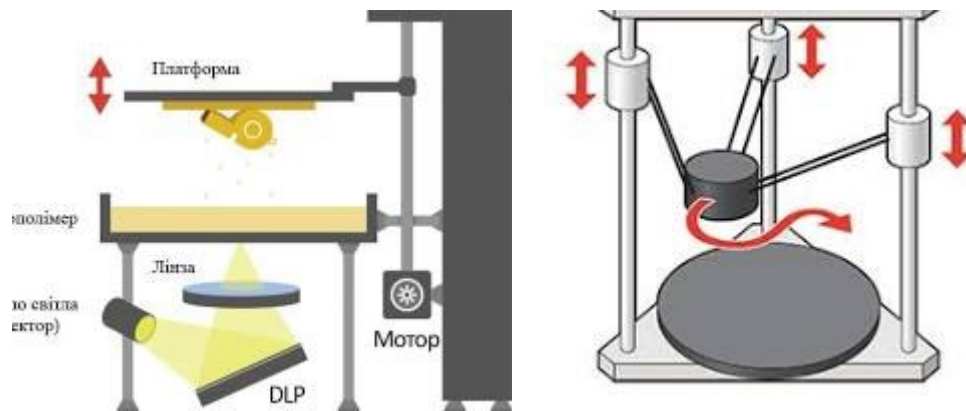


Рис. 2.3. Дельта-схема (Delta Kinematics)

Завдяки надзвичайно легкій конструкції рухомої головки, Дельта-принтери можуть досягати значно вищих швидкостей і прискорень, ніж більшість Картезіанських моделей, що позитивно впливає на загальний час виготовлення деталі. Принтери мають високе співвідношення робочого об'єму (циліндричної форми) до площі, яку вони займають. Вимагає точного та складного калібрування, оскільки будь-яка неточність у довжині важелів або позиції веж призводить до геометричних похибок. Точність друку має тенденцію до зниження у міру віддалення від центру робочої платформи (на периферії). Складна механіка ускладнює діагностику та ремонт.

Полярна схема використовується рідко у комерційних FDM-принтерах, але представляє інший підхід до формування деталі. Замість декартових X , Y , Z , використовується полярна система координат. Друкуюча головка рухається по радіусу (радіальна вісь), а робоча платформа обертається (кутова вісь), виконуючи функцію осі Y . Вісь Z залишається вертикальним рухом (платформи або екструдера).

Потребує меншої кількості точних лінійних напрямних. Ідеально підходить для друку циліндричних об'єктів. До недоліків: вимагає спеціалізованого слайсера для перетворення декартових координат моделі у полярні. Швидкість нарощування матеріалу змінюється від центру до периферії, що ускладнює досягнення рівномірної якості. Ця схема наочно демонструє, як друкуюча головка (екструдер) підвішена на трьох синхронізованих важелях, які керують її рухом по осях X , Y та Z за допомогою складних тригонометричних обчислень.

Вибір матеріалу обумовлений його механічними властивостями, хімічною стійкістю (якщо деталі контактують з тістом) та технологічністю друку. Наприклад, PETG має кращу міцність та стійкість до вологи, ніж PLA. Якщо використовувалася фотополімерна технологія, необхідно вказати тип фотополімерної смоли (наприклад, standard resin, tough resin, ABS-like resin) та її ключові характеристики (твердість, усадка).

2.4. Програмне забезпечення у процесі 3D-друку

Процес 3D-друку вимагає використання комплексу програмного забезпечення (ПЗ), яке можна класифікувати за чотирма основними функціональними категоріями. Ця категорія охоплює ПЗ, призначене для створення або проектування тривимірної моделі деталі. Його можна умовно поділити на два підтипи: конструкторське (CAD-системи), що дозволяє створювати об'єкт з нуля

(твердотільне або параметричне моделювання) та сканерне. Використовує зовнішні датчики (3D-сканери) для отримання цифрової 3D-моделі вже існуючого фізичного об'єкта (зворотне проектування). На ринку є широкий спектр CAD-систем. Серед найбільш поширених рішень є такі (табл.2.3).

Таблиця 2.3. Спектр CAD-систем для створення 3D-моделі

ПЗ (Тип)	Призначення та Особливості	Переваги	Недоліки/Вимоги
SolidWorks (САПР)	Потужний інструмент для інженерного проектування, створення КД та аналізу механізмів.	Висока точність дискретизації моделі, відносно простий в освоєнні, підтримка формульного задання параметрів моделі.	Висока вартість (комерційне ПЗ).
Autodesk Fusion 360 (Комплексний)	Інструмент для параметричного моделювання та інтегрованого інжинірингу.	Комплексність, можливість прямого відправлення на друк з додатка.	Потребує підписки.
КОМПАС-3D (Універсальний САПР)	Робота з 3D-моделями та стандартними кресленнями.	Швидке оформлення конструкторської документації (КД).	Порівняно низький ступінь дискретизації моделей.
Autodesk AutoCAD (САПР)	Класичне 2D та 3D моделювання.	Наявність вбудованого модуля для виведення моделі на друк.	Переважно фокусується на 2D-кресленні.
FreeCAD (Безкоштовне)	Створення та редагування 3D-моделей.	Відкритий код, наявність документації, можливість експорту/імпорту.	Вимагає знання мови Python для роботи зі складними проектами.
ZBrush, 3D Coat (Художнє)	Художнє та скульптурне моделювання.	Потужні можливості для деталізації, використання шаблонів.	Висока вартість (3D Coat).
Blender (Скульптурне)	Багатофункціональне ПЗ для 3D-моделювання, візуалізації та анімації.	Безкоштовне, широка спільнота.	Високий поріг входження.
Google SketchUp (Проектування)	Проектування 2D та 3D об'єктів (архітектура, промисловий дизайн).	Швидке створення простих моделей.	Менше підходить для складного інженерного моделювання.

Для створення 3D-моделі було обрано SolidWorks, оскільки забезпечує високий ступінь дискретизації спроектованої моделі та пропонує гнучкі інструменти для моделювання з можливістю використання формульних залежностей у конструкції. [14]

Слайсерне програмне забезпечення (Slicer) типу слайсер виконує критично важливу функцію: перетворення високодискретної полігональної 3D-моделі (як правило, у форматі STL або OBJ) на набір послідовних 2D-шарів. Ця інформація генерується у вигляді керуючих команд — G-коду, які безпосередньо інтерпретуються 3D-принтером. [15]

До популярних слайсерів можна віднести:

- CuraEngine, як найбільш інтуїтивно зрозумілий та простий у користуванні. Має розширені можливості: розрахунок часу/ваги деталі, пошарова візуалізація процесу друку, генерація нестандартних шаблонів підтримок.
- Slic3r – характеризується широким набором налаштувань та великою кількістю попередньо встановлених шаблонів заповнення (infill).
- Кросплатформний слайсер, що дозволяє генерувати складні та надійні підтримувальні структури, хоча це часто призводить до значної перевитрати матеріалу на підтримки.

Для генерації було обрано CuraEngine, оскільки він інтегрований у програмний комплекс Repetier-Host, має розширене меню налаштувань та простий інтерфейс для конфігурації параметрів друку.

Третя категорія включає програмні компоненти, які керують процесом друку на принтері. Їхні основні функції: передача згенерованого G-коду на принтер,

встановлення параметрів температури (екструдера та столу), виконання калібрування та моніторинг процесу. [16, 17, 18].

Останній вид ПЗ — це прошивка (firmware) мікроконтролера 3D-принтера. Це програмне забезпечення безпосередньо приймає команди G-коду від слайсера/керуючого ПЗ та трансформує їх у електричні сигнали, які керують фізичними механізмами принтера: кроковими двигунами, екструдерами та приводами подачі матеріалу. Додатково це ПЗ забезпечує функціонал виведення екструдера в нульові координати (homing) та калібрування його положення відносно робочого столу.

Висновки до розділу 2

У межах даного розділу було проведено всебічний аналіз технології 3D-друку (адитивного виробництва) як методу виготовлення деталей, що є необхідною теоретичною базою для подальшого дослідження.

Охарактеризовано особливості технологічного процесу 3D-друку, розглянуто широкий спектр матеріалів, які використовуються в адитивному виробництві, включаючи їхні специфічні вимоги до експлуатації та зберігання. Крім того, систематизовано типові недоліки та помилки, що можуть виникати під час друку.

Деталізовано послідовність етапів підготовки та безпосереднього друку, а також ідентифіковано потенційні проблемні аспекти на кожній стадії. Продемонстровано актуальність використання 3D-друку у сфері приладобудування, визначено ключові технічні засоби (3D-принтери), що застосовуються для реалізації цього методу.

Проведено класифікацію видів і типів 3D-принтерів за призначенням, вартістю та кінематичною схемою. Представлено огляд популярних моделей у

відповідних класах, що стало підставою для обґрунтованого вибору принтера для подальших експериментальних досліджень. Описано важливі складові частини конструкції 3D-принтера, акцентуючи увагу на тому, як їхні характеристики та налаштування можуть впливати на якість кінцевого виробу.

Розглянуто комплексне програмне забезпечення, необхідне для всього циклу виготовлення деталі: від проектування (CAD) до керування друком. На основі функціонального аналізу було обрано та обґрунтовано використання конкретних програмних продуктів (SolidWorks, CuraEngine) для виконання завдань магістерської роботи.

РОЗДІЛ 3.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ 3D ДРУКУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ

Для обґрунтованого визначення та оптимізації властивостей кінцевих виробів, отриманих методом 3D-друку, критично важливим є встановлення функціональних залежностей між вхідними технологічними параметрами процесу та вихідними характеристиками (параметрами якості) готової деталі. У традиційному машинобудуванні (субтрактивне виробництво) вхідні параметри можуть охоплювати широкий діапазон змінних: від параметрів заготовки, режимів обробки до режимів різання, шліфування, нанесення покриттів.

У контексті адитивного виробництва (3D-друку), яке може виступати як метод отримання готового виробу, так і як спосіб створення заготовки, ключовими вхідними змінними є налаштування слайсера (програмні параметри). Це параметри, що задаються на етапі підготовки моделі до друку в слайсерному ПЗ. До них належать відсоток і тип заповнення, що впливає на механічну міцність і вагу деталі. Тип і конфігурація підтримок впливає на якість нижніх поверхонь і витрату матеріалу.

Кількість суцільних поверхневих шарів (Shells/Top/Bottom Layers) визначає міцність зовнішньої оболонки та якість поверхні. Товщина шару (Layer Height) впливає на точність і швидкість друку. Режими друку апаратні параметри, які безпосередньо контролюються 3D-принтером.

Температура екструзії/столу впливає на адгезію шарів, усадку та деформацію (warping). Швидкість друку визначає продуктивність та точність позиціонування. Швидкість/інтенсивність охолодження додаткової механічної (різання, абразивна обробка) чи хімічної обробки деталі, якщо така передбачається.

Для встановлення коректних залежностей впливу цих вхідних параметрів на якість та експлуатаційні характеристики виготовлених деталей необхідно провести систематичні експериментальні дослідження. Методика включає планомірну зміну ключових вхідних змінних та впорядкований збір даних про отримані вихідні характеристики. Подальший аналіз цих даних за допомогою відповідних методів аналізу дозволить визначити ступінь впливу кожного окремого параметра на конкретні властивості деталі.

3.1. Параметри якості деталей, виготовлених 3D друком

Якість виробу є комплексною характеристикою, яка відображає ступінь його відповідності встановленим вимогам і здатність виконувати покладені на нього функції. У сучасному виробництві, включаючи прототипування, створення функціональних моделей та комерційних замовлень, критерії якості можуть суттєво різнитися. Загальноприйняте, хоча й відносне, визначення якості може бути сформульоване як співвідношення між вартістю виробу та ефективністю виконання ним цільових завдань. Проте для об'єктивної оцінки конкретної деталі необхідно порівняти її вихідні характеристики з допустимими значеннями або з аналогічними виробами. Ключові вимоги до якості можуть включати:

- здатність безвідмовно працювати протягом заданого терміну;
- довговічність та ремонтпридатність;
- естетичні характеристики та зовнішній вигляд;
- функціональність та результати роботи.

Якість деталі, отриманої методом адитивного виробництва, є багатоаспектною і оцінюється за комплексом фізико-механічних та геометричних характеристик, зокрема:

1. Фізико-механічні властивості: міцність (межа міцності, зусилля на розрив); твердість та пружність (модуль Юнга) та відносне видовження.
2. Геометрична точність та допуски: відхилення розмірних характеристик (габарити, діаметри отворів, розміри виступів) відносно встановлених допусків; точність форми (співплощинність, співвісність); точність відповідності кутів.
3. Характеристики поверхні: шорсткість робочих поверхонь (R_a); естетичність зовнішнього вигляду.

При виготовленні прототипів і функціональних моделей найчастіше ключовими критеріями є точність розмірів та шорсткість поверхні. Принципова особливість 3D-друку, а саме пошарове нанесення матеріалу, суттєво впливає на якість поверхні: вертикальні та похилі поверхні та горизонтальні поверхні. Через ступінчасту структуру на них неминуче зберігаються борозни (ефект сходів) та невеликі виступи. В ідеальних умовах вони можуть бути відносно гладкими. Однак на них можуть виникати раковини або, навпаки, локальні виступи, що негативно позначається на загальній шорсткості.

Для деталей з низьким відсотком заповнення (Infill) характерним є ефект просідання верхніх горизонтальних площин, що призводить до утворення невеликих заглиблень з малим кутом нахилу.

Таким чином, для визначення ступеня якості друкованої деталі необхідно сфокусуватися на тих характеристиках (наприклад, точність і міцність), які є визначальними для виконання нею своїх функцій.

3.2. Методика визначення параметрів якості поверхневого шару деталей

Дослідження якісних характеристик поверхні, особливо **шорсткості**, є критично важливим етапом оцінки деталей, отриманих методом 3D-друку. Це вимагає застосування високоточного вимірювального обладнання. Для кількісного визначення параметрів шорсткості та візуального аналізу використано такі прилади:

- *Профілометри/Профілографи*: прилади контактного типу, які вимірюють профіль поверхні за допомогою рухомої голки рис.3.1.

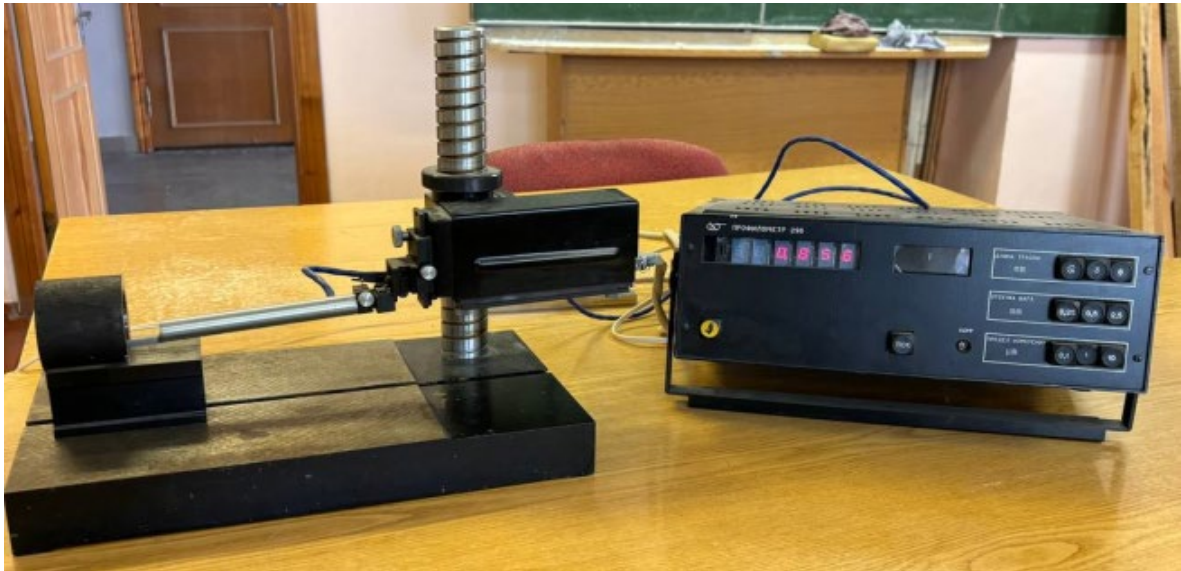


Рис. 3.1. Дослідження поверхні корпуса підшипника профілометром

- *Мікроскоп*: використано для візуального дослідження та контролю загальних геометричних параметрів. Для проведення експериментальних досліджень нами використано мікроскоп (рис.3.2).



Рис. 3.2. Загальний вигляд мікроскопу

Він є зручним та часто застосовуваним приладом для контролю якості поверхонь. Його ключові переваги включають мобільність завдяки вбудованому акумулятору та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що спрощує процес освоєння та використання.

Шорсткість поверхні за визначенням — це сукупність нерівностей поверхні з відносно малими кроками, які виражаються числовими величинами, що характеризують ступінь їхнього відхилення від ідеальної геометричної форми.

Рис. 3.3. Схематичне профілограми з позначеннями на поверхні бокової кришки

Вимірювання шорсткості за допомогою профілометра MarSurf PS1 (зображеного на рис. 3.1) здійснюється за наступним регламентом, що забезпечує відтворюваність результатів: підготовка до встановлення у вимірювальний стенд, а у відповідне гніздо монтується щуп з необхідною точністю. Фіксація деталі, що досліджується, надійно закріплюється у спеціальному пристосуванні на столі.

Позиціонування за допомогою механізму переміщення стола щуп профілометра акуратно підводиться до поверхні деталі до моменту доторку. Налаштування вимірювання із задачею ключових параметрів на інтерфейсі профілометра: параметр (Ra), довжина трасування (Lt) та довжина оцінки (Ln).

Після його завершення профілометр відображає числове значення результату на екрані та зберігає дані (результат, параметри, координати профілограми) у внутрішній пам'яті.

Для більш наочної оцінки структури поверхні та аналізу крокових параметрів нерівностей (наприклад, середнього кроку борозен) використано вимірювальний мікроскоп. Використання мікроскопа дозволяє більш якісно оцінити дефекти та текстуру поверхні, ніж лише числовий показник шорсткості. Як видно на рисунку 3.4 (вигляд поверхні при 30-кратному збільшенні), ми чітко розрізнили окремі борозни, які є прямим наслідком пошарового нанесення матеріалу.

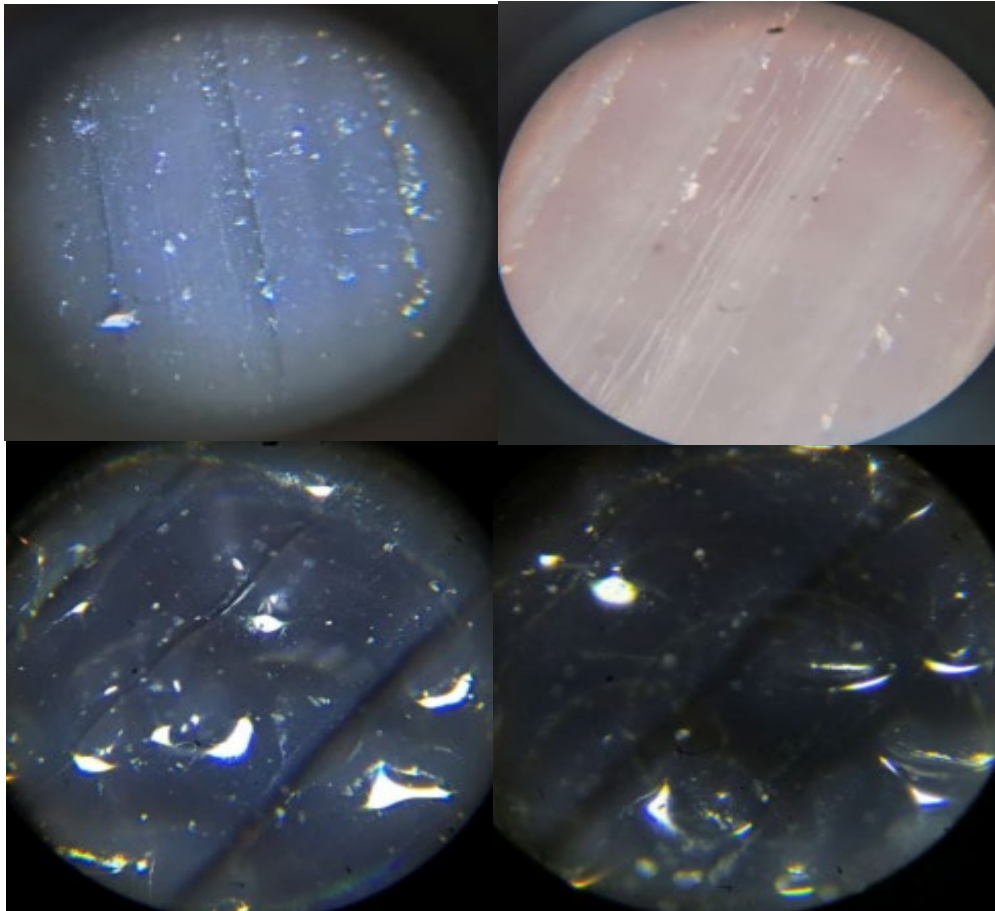


Рис. 3.4. Схема дослідження деталі за допомогою мікроскопа: 1 – деталь корпусу підшипника; 2 – деталь валу; 3 – деталі бокової стінки робочої камери

3.3. Методика контролю розмірних параметрів деталей, що виготовлені 3D друком

Контроль розмірних параметрів є фундаментальним етапом оцінки якості будь-якої виготовленої деталі, зокрема отриманої методом 3D-друку. Основною вимогою є не абсолютна точність розміру, а його відповідність встановленим допускам — межам допустимих відхилень, визначених конструктором. Для дослідного та одиничного виробництва 3D-друкованих наших деталей використано універсальні вимірювальні засоби.

Штангенциркуль для вимірювання некритичних (недомінантних) розмірів точність від 0.05 до 0.1, мм (рис.3.5.).



Рис. 3.5. Замір товщини кришки гнізда для підшипника

Для високоточного вимірювання невеликих 3D-друкованих деталей, особливо в рамках експериментальних досліджень, було використано мікрометр типу МК 0-25.

За допомогою основного барабана мікрогвинта вимірювальні губки (плоскі торці) підводяться близько до поверхні деталі і отриманий розмір зчитується зі шкали мікрометра.

Використання мікрометрів забезпечує необхідну високу точність для фіксації навіть мінімальних змін розмірів, спричинених варіаціями вхідних параметрів друку.

3.4. Методика обробки результатів експериментальних досліджень

Після проведення експериментальних досліджень та збору даних (вимірювання шорсткості, розмірної точності тощо) отримані результати

піддавалися систематизації та математичної обробки для встановлення кількісних залежностей між вхідними параметрами (налаштування друку, режими слайсера) та вихідними характеристиками якості деталей.

Для полегшення подальшого аналізу зібрану інформацію систематизували і представлена у вигляді таблиці. У цій таблиці кожен рядок (або стовпчик) відповідає за повний набір даних, отриманих при дослідженні конкретного зразка, що виготовлений за унікальною комбінацією вхідних параметрів. Перед проведенням аналізу складали план експерименту (таблиця 3.1), що визначає комбінації вхідних факторів, а фінальна таблиця міститиме відповідні виміряні результати.

Для встановлення залежностей використовуються два основні підходи: аналітичний метод та регресійний аналіз (математичне моделювання)

Цей підхід передбачає пряме зіставлення та логічне узагальнення отриманих даних. Визначення найбільш підходящих режимів (оптимальних вхідних величин), які призвели до найкращих показників якості (мінімальної шорсткості, мінімального розмірного відхилення).

Прямий огляд систематизованих результатів з метою виявлення екстремумів.

Регресійний аналіз є потужнішим інструментом, що дозволяє отримати математичну модель залежності вихідних параметрів від вхідних. Кількісне визначення функціональних залежностей і побудова графічних залежностей дає нам змогу не лише знайти оптимальну точку в межах експерименту, але й прогнозувати результат за будь-яких проміжних значень вхідних факторів.

Визначення та фіксація комбінацій режимів обробки або створення деталі і **розробка** плану експерименту дозволяє кладання таблиці. Вона визначає порядок

та кількість експериментів (зазвичай на основі методів планування експерименту — наприклад, повний факторний експеримент або дробовий факторний експеримент). Побудова регресійної моделі на основі підбору поліноміальної функції, яка найкраще описує зв'язок між факторами x_i (вхідні) та відгуком y (вихідні):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \dots$$

де: y — вихідний параметр (відгук системи); x_i — незалежні змінні (фактори, що впливають на процес); β_0 — вільний член (середнє значення відгуку при нульових факторах); β_i — коефіцієнти лінійних членів, що характеризують **ступінь впливу окремих факторів**; β_{ij} — коефіцієнти взаємодії факторів x_i та x_j ; β_{ii} — коефіцієнти квадратичних членів, що відображають **нелінійність** впливу окремих факторів.

Значення коефіцієнтів β визначають методом **найменших квадратів**, що мінімізує суму квадратів відхилень експериментальних даних від теоретично розрахованих. Після підбору оптимальних коефіцієнтів здійснюється **оцінка адекватності моделі**, зокрема перевірка її достовірності за критеріями Фішера та Стюдента, а також аналіз коефіцієнта детермінації R^2 . Використання регресійного аналізу дозволить об'єктивне та прогнозоване визначення впливу параметрів друку на якість кінцевої деталі.

Для побудови поліноміальної регресійної моделі використано результати експериментів, проведених за двома основними факторами — температура екструдера (X_1) та швидкість друку (X_2). Як вихідні параметри (відгуки) розглянуто шорсткість поверхні R_a (Y_1) та відхилення розміру (Y_2).

Результати досліджень подано у вигляді таблиці факторного плану/

Таблиця 3.1. Результати досліджень факторного плану

№ досліджу	Фактор X_1 (Температура екструдера)	Фактор X_2 (Швидкість друку)	Вихідний параметр Y_1 (Шорсткість Ra)	Вихідний параметр Y_2 (Відхилення розміру)
1	Рівень 1	Рівень 1	$Y_{1,1}$	$Y_{2,1}$
2	Рівень 2	Рівень 1	$Y_{1,2}$	$Y_{2,2}$
3	Рівень 1	Рівень 2	$Y_{1,3}$	$Y_{2,3}$
4	Рівень 2	Рівень 2	$Y_{1,4}$	$Y_{2,4}$
...	...	...	...	...

На основі отриманих експериментальних даних будується **регресійна поверхня відгуку**, що описується рівнянням другого порядку:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2$$

де:

- β_0 — вільний член; β_1, β_2 — коефіцієнти лінійних членів; β_{12} — коефіцієнт взаємодії факторів; β_{11}, β_{22} — коефіцієнти квадратичних членів, що відображають нелінійність впливу кожного фактора.

Для зручності проведення математичного аналізу, побудови регресійної моделі та порівняння впливу різних факторів з різними фізичними одиницями, усі вхідні параметри переводять у **кодовану шкалу**. Це дозволяє уніфікувати діапазони варіювання факторів і спростити розрахунки коефіцієнтів регресії.

У матриці планування приймають такі позначення:

x_0 — фіктивний фактор, який завжди дорівнює одиниці; x_1, x_2, x_3 — кодовані значення відповідних вхідних факторів; значення -1 відповідає нижньому рівню варіювання фактора; значення $+1$ відповідає верхньому рівню варіювання; колонки взаємодії (наприклад, $x_1, x_2, x_1, x_3, x_2, x_3$) утворюються шляхом **перемноження відповідних кодованих значень базових факторів**.

Перехід від реальних (натуральних) значень параметрів y_j до кодованих x_j здійснюється за формулою

$$x_j = \frac{y_j - y_{jc}}{y_{ji}} \quad (3.1)$$

де: y_{jc} — **центральне (середнє)** значення діапазону вимірюван

Таким чином, значення фактора, що дорівнює y_{jmin} , відповідає кодованому рівню $x_j = -1$, а значення y_{jmax} — рівню $x_j = +1$. Центр плану (середина діапазону) має значення $x_j = 0$.

Після проведення експериментів і формування матриці планування виконується побудова **рівняння регресії**, яке відображає залежність вихідної величини (параметра якості) від досліджуваних факторів у **кодованій шкалі**. Для трьох факторів рівняння регресії, що враховує лінійні ефекти та ефекти взаємодії, має вигляд:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3 \quad (3.2)$$

де: y — значення вихідного параметра у кодованій шкалі; a_0 — вільний член, який відображає середнє значення відгуку; a_i — коефіцієнти лінійних членів; a_{ij} , a_{123} — коефіцієнти, що характеризують взаємодію двох або трьох факторів відповідно.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі була розроблена та детально описана методика проведення експериментальних досліджень, спрямована на кількісну оцінку та оптимізацію параметрів якості деталей, виготовлених методом 3D-друку.

Визначено, що найбільш критичними для оцінки якості 3D-друкованих виробів є параметри якості поверхні (шорсткість, структура поверхневого шару) та розмірні характеристики (габаритні та відповідальні розміри).

Для контролю якості поверхні обрано двоступеневу методику: кількісне вимірювання шорсткості (параметр R_a та профілограма) за допомогою профілометра MarSurf PS1 та візуальний аналіз структури поверхневого шару та крокових нерівностей за допомогою вимірювального мікроскопа БМІ-1.

Для контролю розмірної точності рекомендовано використовувати мікрометр МК 0-25 1-го класу точності, що забезпечує необхідну прецизійність для дослідження відхилень. Розроблено алгоритм обробки експериментальних результатів, який передбачає: систематизацію зібраної інформації. Застосування регресійного аналізу для встановлення математичних залежностей між вхідними параметрами друку (температура, швидкість, заповнення) та вихідними параметрами якості. Переведення рівнянь регресії з кодованої шкали в реальну для практичного прогнозування та зручності інтерпретації.

Для забезпечення ефективності та об'єктивності досліджень розроблено план експерименту (матрицю планування) на основі факторного експерименту. Для автоматизації складних розрахунків та моделювання було обрано програмне забезпечення MathCad.

Описана методика є комплексною основою для проведення подальших досліджень, дозволяючи не тільки контролювати якість деталей, а й детально дослідити залежності, що дасть змогу сформулювати обґрунтовані рекомендації для досягнення кращої якості 3D-друкованих виробів.

РОЗДІЛ 4.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ 3D ДРУКУ ТА ЇХ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЗІБРАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ МОДЕЛІ

4.1. Властивості досліджуваного середовища (тісто) та розрахунок навантажень

Ефективність роботи будь-якого тістомісильного обладнання нерозривно пов'язана з реологічними та структурно-механічними властивостями оброблюваного середовища – тіста. Тісто є складною полідисперсною системою, в якій постійно відбуваються фізико-хімічні процеси (гідратація білків та крохмалю, утворення клейковинного каркасу, бродіння).

У процесі взаємодії компонентів (борошно, вода, дріжджі, сіль тощо) та під впливом механічного перемішування, тісто формує свою структуру. Ця структура, що характеризується в'язкістю, пластичністю, пружністю та міцністю, не є статичною, а динамічно змінюється: на початковому етапі (змішування) тісто має високу в'язкість і низьку пластичність. У процесі замісу (гідратація та формування клейковини) в'язкість зростає, а пружність розвивається. Механічна енергія, що передається від робочого органу, сприяє *орієнтації* та *подовженню* білкових волокон, створюючи тривимірний каркас.

На кінцевому етапі тісто досягає оптимальних структурно-механічних властивостей, що забезпечують його здатність утримувати гази та зберігати форму. Взаємний вплив полягає в тому, що:

- Склад і температура тіста (його властивості) визначають необхідну потужність і тип механічного впливу робочого органу.

- Інтенсивність та характер механічного впливу (зсув, розтяг, стиск) – що забезпечується конструкцією машини – безпосередньо формують кінцеві структурно-механічні властивості тіста.

У запропонованій конструкції значна роль у формуванні тіста відводиться дії місильного барабана та багатогранної робочої камери. Місильний барабан забезпечує не лише перемішування, але й інтенсивний комплексний деформаційний вплив на тісто (переважно зсув та стиск). Обертання барабана змушує всю масу тіста рухатися, забезпечуючи рівномірний розподіл компонентів та прискорюючи формування клейковинного каркасу.

Багатогранна робоча камера є ключовим елементом, який посилює ефект взаємодії. На відміну від традиційних циліндричних чи прямокутних камер, грані (кути) камери:

- Створюють зони високої концентрації напружень і примусового зсуву тіста.
- Запобігають простому прокручуванню тіста, спрямовуючи його потік назустріч барабану.
- Генерують додаткові зусилля стиснення-розтягу при проходженні тіста між стінкою та робочим органом. Це значно підвищує ефективність замісу, знижуючи при цьому загальну тривалість процесу.

Структурно-механічні властивості тіста, а саме його опір деформації, є першопричиною виникнення навантажень на конструктивні елементи машини. Науковці [16] постійно розробляють нові конструкції тістомісильних машин (які були детально розглянуті у Розділі 1) з метою оптимізації процесу та зниження енерговитрат. Однак, недоліки традиційних конструкцій найчастіше пов'язані

саме з нерівномірним розподілом навантажень та надмірним опором тіста. Особливо навантаження на робочі органи. Традиційні місильні важелі (спіралі, лопаті) часто піддаються високим згинальним та крутильним навантаженням унаслідок опору тіста, особливо в'язкого.

Відповідно навантаження передаються на вали та підшипники. Ці елементи є критичними і часто виходять з ладу через нерегулярні, ударні або надмірно високі радіальні та осьові навантаження, спричинені нерівномірністю замісу та асиметрією робочого органу.

Особливість даної конструкції полягає в цілеспрямованому врахуванні та нівелюванні цих недоліків. Це досягається завдяки великій поверхні робочого органу (барабана).

Збільшення площі контакту з тістом дозволяє розподілити сумарне навантаження на більшу поверхню, знижуючи питомий тиск і, відповідно, локальні напруження на тісто та сам барабан. Це сприяє зменшенню пікових крутильних моментів, що передаються на вал.

Багатогранна камера, як зазначено вище, сприяє процесу замішування, забезпечуючи ефективний зсув, але також дозволяє перерозподілити навантаження з робочого органу на стінки камери, мінімізуючи напруження в центральній осі.

Ключовим елементом, що докорінно відрізняє дану конструкцію, є присутність пластифікатора. Його функція – не просто перемішування, а цілеспрямована модифікація реологічних властивостей тіста. Пластифікатор, імовірно, створює додатковий вплив на тісто (наприклад, високий зсув або короткочасне підвищення температури/тиску), що призводить до: зниження

внутрішнього опору тіста деформації (так зване "розрідження" або "розігрів") та оптимізації структурних зв'язків (наприклад, більш рівномірної гідратації).

Тму він є ключовим елементом, що докорінно відрізняє дану конструкцію та вимагає детального інженерного розрахунку. Його функція виходить за рамки традиційного перемішування, концентруючись на кінцевій фазі структуроутворення тіста.

Принцип дії пластифікатора базується на інтенсивному механічному впливі — він своїм конструктивним виконанням забезпечує примусове стискання і розтягування тістової маси. Внаслідок цього відбувається велика деформація тіста, що є необхідною умовою для:

1. Вирівнювання останніх нерівномірностей у розподілі вологи та компонентів.
2. Оптимізації клейковинного каркасу. Переорієнтації білкових волокон для досягнення оптимальних показників пружності та газоутримуючої здатності.
3. Формування необхідних реологічних властивостей (пластифікації) перед подальшою обробкою.

Ця інтенсивна, цілеспрямована дія обумовлює виникнення максимальних навантажень саме в зоні функціонування пластифікатора. У цьому моменті, через значний опір тіста при його примусовому проходженні та високій деформації, найбільші крутильні моменти та осьові зусилля припадають:

- На вал пластифікатора, який повинен витримувати пікові напруження.
- Частково на робочий барабан (залежно від їхнього конструктивного взаємозв'язку), особливо в зоні передачі тіста до пластифікатора.

Для забезпечення міцності та надійності зібраної конструкції моделі, особливо її елементи виготовлені за технологією 3D-друку, необхідно розрахувати ці пікові навантаження та визначити необхідний запас міцності (підвищений коефіцієнт запасу) для матеріалів друку.

Таким чином, у даній конструкції спостерігається не просто зниження навантажень, а їх перерозподіл та концентрація. Якщо багатогранна камера та велика поверхня барабана були спрямовані на зниження питомих навантажень і загальних енергетичних витрат на етапі основного замісу, то блок пластифікатора, навпаки, є зоною свідомої концентрації високих механічних зусиль.

Результати обґрунтування навантажень і деформацій є вихідними даними для подальших експериментальних досліджень. Розуміння того, де виникають максимальні навантаження (зона пластифікатора), дозволяє: вибрати оптимальні параметри 3D-друку (тип пластику, орієнтація друку, відсоток заповнення) для критичних вузлів. Провести експериментальне дослідження якості 3D-друку (міцності, зносостійкості) саме тих елементів, які несуть найбільше навантаження. Забезпечити надійність роботи зібраної конструкції моделі шляхом підтвердження, що міцність 3D-друкованих елементів у зонах максимального навантаження перевищує розрахункові експлуатаційні напруження.

Конструкція передбачає, що елементи пластифікатора (вал, опорні підшипники, привод) мають бути спроектовані з підвищеним коефіцієнтом запасу міцності, оскільки саме вони є лімітуючими ланками за критерієм пікового навантаження. Врахування цих максимальних, але локалізованих навантажень є ключовим аспектом інженерного розрахунку даного тістомісильного агрегату і

демонструє інноваційний підхід до усунення загальних недоліків, властивих машинам, які не мають такого фінішного структуроутворюючого вузла.

4.1.1. Фізико-механічні властивості досліджуваного середовища (тістової маси)

Змішування компонентів це ключовий етап у формуванні тіста і традиційно його розглядають як механічне взаємне проникнення твердих частинок та рідкої фази. Метою цього процесу є створення максимально однорідного суцільного середовища. У результаті взаємодії частинок із різними фізичними властивостями (борошно, вода, додаткові інгредієнти) утворюються нові, інтегральні властивості системи (тіста), які суттєво відрізняються від характеристик вихідних компонентів.

Для точного розрахунку навантажень на вал та робочий орган змішувача, а також для оптимізації конструктивних та енергетичних параметрів апарату, критичне значення мають реологічні та фізико-механічні властивості тіста, що формується. Висока в'язкість збільшує момент опору на валу, вимагаючи більшої потужності приводу. Тісто поводить себе як неньютонівська рідина, часто демонструючи псевдопластичні властивості (зменшення в'язкості зі збільшенням швидкості зсуву).

Густина впливає на загальну масу матеріалу в камері змішування та на гідродинамічні умови в апараті. Є важливим параметром для розрахунку об'ємних і масових витрат. Опір зсуву, тобто напруження, необхідна для початку деформації тіста або для підтримки його течії. Визначає робочі навантаження на робочі органи, оскільки змішування значною мірою ґрунтується на деформації зсуву.

Реологічні характеристики охоплюють більш широкий спектр властивостей, таких як еластичність (здатність частково відновлювати форму після деформації) і пластичність (здатність набувати і зберігати нову форму). Вони визначають поведінку тіста під дією механічних сил і впливають на ефективність змішування.

Коефіцієнти тертя (між шарами тіста), так і зовнішнього тертя (тіста об стінки апарату та робочі органи). Ці параметри безпосередньо впливають на втрати енергії та загальну ефективність процесу. Урахування динаміки зміни цих параметрів протягом циклу змішування є вирішальним для точного моделювання процесу та розрахунку необхідної потужності приводу.

У наукових працях, зокрема у роботі [15], розглядаються моделі псевдозрідження полідисперсних суспензій. Авторами запропоновано систему рівнянь для математичного моделювання киплячого шару полідисперсної суспензії, що включає побудову графіків та діаграм за експериментальними даними. Однак, суттєвим обмеженням подібних гідродинамічних моделей є неврахування різної швидкості руху окремих частинок. Це може істотно знижувати точність прогнозування гідродинаміки у зоні активного змішування.

На початковій стадії формування тіста ключову роль відіграє гранулометричний склад борошна. Згідно з дослідженнями Стадника І.Я та авторів [16], зменшення розміру частинок борошна призводить до значного збільшення їх питомої поверхні. Окрім власне гідродинаміки, кінетика розчинення є важливою характеристикою процесу. Формування адекватних кінетичних моделей вимагає попередніх експериментальних досліджень, особливий інтерес становлять процеси, що відбуваються у зоні гетерогенного розчину [12].

Швидкість гетерогенних процесів залежить від величини поверхні міжфазного контакту та ефективності дифузійного транспорту. Збільшення швидкості процесу зазвичай досягається шляхом постійного поновлення активної поверхні частинок, оскільки саме дифузійна стадія часто є лімітуючою через порівняно невелику швидкість молекулярної дифузії у рідині.

Гетерогенна реакція при змішуванні борошна з водною фазою складається з декількох послідовних стадій: змочування частинок, адсорбція води, набухання крохмальних гранул та розчинення частини водорозчинних речовин.

Автори [14] вказують, що при виборі або вдосконаленні технологічного обладнання для харчової промисловості часто ігнорується ключова необхідність: формування заданої мікроструктури напівфабрикату. Саме мікроструктура є визначальною для подальшої технологічної поведінки суміші та її кінцевої якості. На жаль, у багатьох випадках застосування конкретних типів обладнання зумовлено не науково обґрунтованими розрахунками, а радше технологічними традиціями, простотою виготовлення або неповнотою емпіричних знань щодо складної динаміки процесу змішування.

Перспективний напрямок у розвитку технологій приготування сумішей передбачає створення обладнання нового покоління. Таке обладнання має забезпечувати інтенсивну турбулізацію та циркуляцію потоків у робочій камері, одночасно прагнучи до зниження енергоспоживання та металоємності.

На сьогодні, розробка сучасних конструкцій вітчизняного виробництва для приготування рідких водно-борошняних напівфабрикатів, а також емульсій та суспензій, практично відсутня. Існуючі аналоги часто характеризуються конструктивним консерватизмом та низькою ефективністю. У більшості апаратів спостерігається відсутність узгодженої роботи робочого органу та геометрії

камери, а також неможливість оперативного регулювання режимів змішування. Це призводить до низки недоліків, зокрема: локального підвищення температури суміші та недостатньої аерації продукту.

З огляду на викладене, проведення цілеспрямованих наукових досліджень у цій галузі відкриває значні можливості для модернізації існуючих рішень та створення принципово нових конструкцій змішувального обладнання.

На наш погляд, одним із найбільш перспективних шляхів підвищення гідродинамічної та енергетичної ефективності змішування є реалізація дискретно-імпульсного впливу на робочу суміш. Це може бути досягнуто шляхом:

1. Генерації пульсацій тиску та швидкості рідинного потоку.
2. Формування локалізованих зон розвиненої турбулентності у критичних ділянках робочої камери змішувача.

Такий підхід дозволить інтенсифікувати масообмінні процеси та прискорити формування однорідної мікроструктури напівфабрикату.

4.2. Оптимізація параметрів 3D-друку критичного елемента (пластифікатора) методом аналізу єрархій (MAI)

Виникає завдання упорядкування альтернатив на відомій заздалегідь множині, що включає, наприклад, різні відсотки заповнення деталі, орієнтації друку або товщини шару. Для формалізації цього складного рішення застосовується метод аналізу ієрархій (MAI) Сааті.

МАІ є потужним математичним інструментом системного підходу, що дозволяє:

1. Сформуванати ієрархію: розбити складну проблему на складові (ціль, критерії, альтернативи).
2. Визначити відносну цінність: здійснити попарні порівняння критеріїв експертом (Особою, що приймає рішення, ОПР) для визначення їхньої вагомості.
3. Синтезувати пріоритети: розрахувати загальні пріоритети альтернатив відповідно до вагомості критеріїв.

Вибір оптимальних параметрів 3D-друку для деталей машини можуть включати: С1 – максимальна міцність на кручення; С2 – зносостійкість; С3 – точність геометричної форми; С4 – час друку. Альтернативи – А1 – заповнення 80%, орієнтація по осі Z; А2 – заповнення 100%, орієнтація по осі X; А3 – заповнення 60%, спеціалізований пластик.

МАІ, на відміну від простих методів, дозволяє ОПР в інтерактивному режимі знайти зважений варіант, що забезпечить компроміс між конструктивною надійністю та економічною доцільністю друку.

4.2.1. Постановка задачі та визначення критичного елемента

Згідно з інженерним аналізом (п. 4.1), критичні функціональні вузли конструкції піддаються піковим навантаженням. Одним із таких елементів є пластифікатор, наведений на рис. 4.1. Він забезпечує опорну та передавальну функцію на тісто при замішуванні.

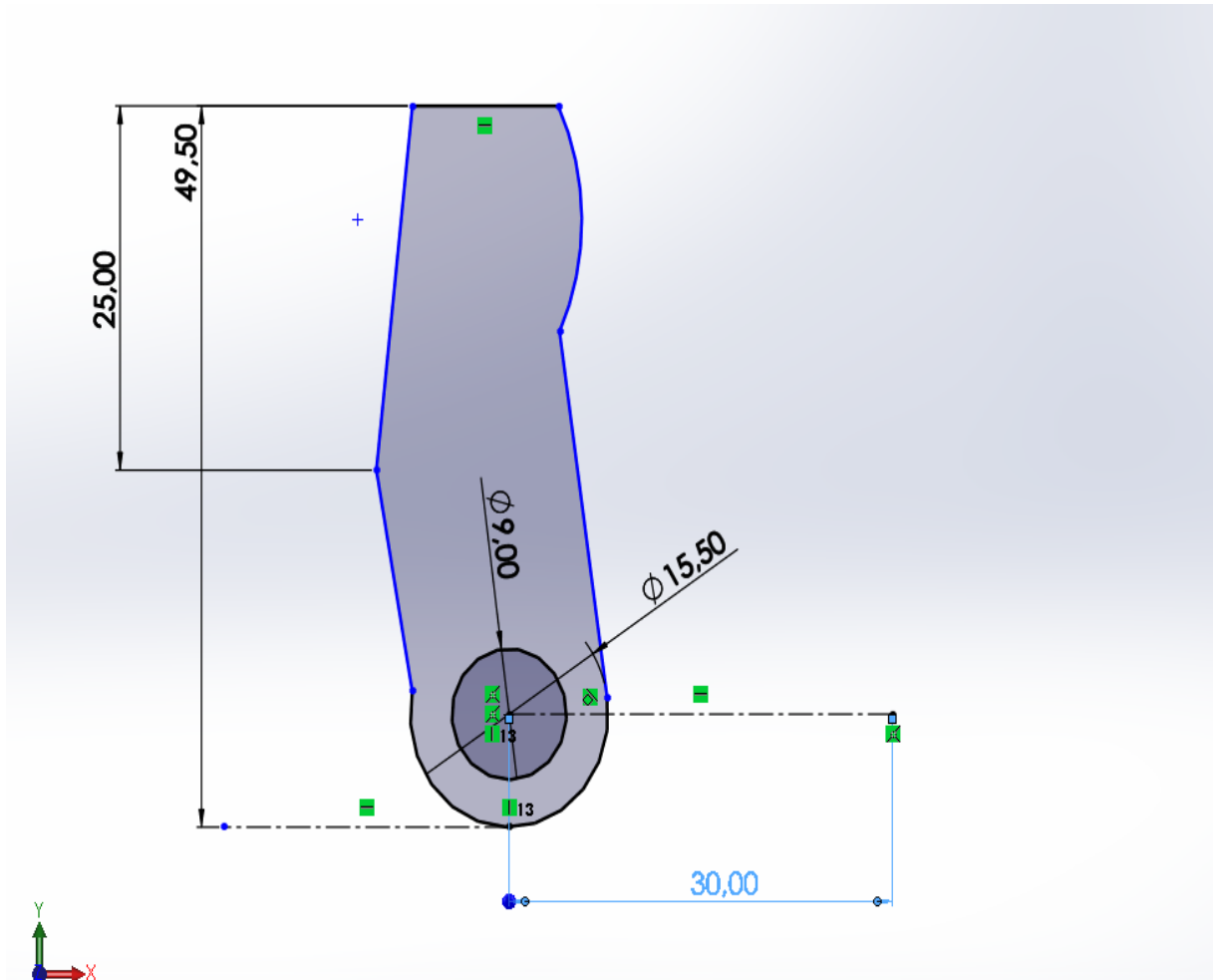


Рис.4.1. Загальний вигляд пластифікатора

Оскільки пластифікатор має витримувати навантаження (крутильні та згинальні моменти, що виникають через роботу його валу), його надійність безпосередньо залежить від параметрів 3D-друку (FDM/FFF). Виготовлення деталі здійснено при температурі 180°C з полімерного матеріалу PLA. Визначено компромісний набір параметрів друку, який забезпечив максимальну конструктивну надійність елемента при дотриманні економічної доцільності та геометричної точності.

4.2.2. Формалізація задачі Методом Аналізу Ієрархій (MAI)

Для упорядкування альтернатив на відомій множині параметрів застосовано Метод (MAI) Т. Сааті, що дозволяє структурувати складне багатокритеріальне рішення, перетворюючи якісні судження ОПР (особи, що приймає рішення) на кількісні пріоритети. Згідно методики сформовано рішення:

- Рівень 1: Ціль (Goal). Вибір оптимальних параметрів 3D-друку для критичного валу пластифікатора.
- Рівень 2: Критерії (Criteria). Критерії відображають ключові вимоги до деталі: C1 – міцність на згин/кручення. Здатність витримувати експлуатаційні пікові навантаження без руйнування.

C2 – точність геометричної форми – відповідність критичних розмірів (особливо 9.00 для посадки) кресленню.

C3 – зносостійкість - довговічність робочих поверхонь.

C4 – час друку/вартість – економічна ефективність виготовлення (пропорційна часу друку та витраті матеріалу).

- Рівень 3: Альтернативи (Alternatives). Набір параметрів, з яких здійснюється вибір, таблиця 4.1.

Таблиця 4.1. Набір параметрів для друку

Альтернатива	Заповнення (Infill)	Орієнтація Друку	Товщина Шару (Layer Height)	Примітки
A1	100% (Solid)	Плоско (по осі X)	0.15 мм	Макс. міцність, довгий час, висока точність.
A2	80% (Гексагон)	Вертикально (по осі Z)	0.20 мм	Компроміс по міцності та часу, орієнтація Z сприяє міцності на згин.
A3	60% (Лінії)	Плоско (по осі Y)	0.25 мм	Швидкий друк, низька вартість, потенційно низька міцність.

Згідно таблиць 4.1 здійснює судження про відносну важливість критеріїв, використовуючи шкалу Сааті (1-9). Для даного критичного елемента міцність (C1) та точність (C2) є значно важливішими за час друку (C4). На основі попарних порівнянь формується матриця M_C та розраховується вектор пріоритетів (вагомостей) критеріїв w :

$$w = (w_1, w_2, w_3, w_4)^T$$

Даємо розрахуноко матриці, вектор вагомостей та індекс узгодженості (CI/CR) для підтвердження надійності суджень у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Вектор вагомостей та індекс узгодженості (CI/CR)

Критерій	Міцність (C1)	Точність (C2)	Зносостійкість (C3)	Час/Вартість (C4)	Вагомість (w_i)
C1	1	3	2	5	0.45
C2	1/3	1	1/2	3	0.22
C3	1/2	2	1	4	0.25
C4	1/5	1/3	1/4	1	0.08
CR	-	-	-	-	0.05 (Припустимо, $CR \leq 0.1$)

Визначено локальні пріоритети альтернатив A_1 , A_2 , A_3 відносно кожного критерію окремо.

Для CI (Міцність): A_1 (100%, плоска) може бути міцнішою за A_2 (80%, вертикальна) за рахунок більшого заповнення, але A_2 має кращу орієнтацію для згинальних навантажень. Відповідно синтез та вибір оптимального рішення P_j для кожної альтернативи розраховується шляхом зваженої суми локальних пріоритетів:

$$P_j = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot V_{i,j}$$

де V_{ij} – локальний пріоритет j -ї альтернативи відносно i -го критерію.

Таблиця 4.3. Результати синтезу

Альтернатива	P_j (Глобальний пріоритет)
A_1 (100%, 0.15 мм)	0.39
A_2 (80%, 0.20 мм)	0.44
A_3 (60%, 0.25 мм)	0.17

На основі розрахунків МАІ, альтернатива A_2 (заповнення 80% гексагон, орієнтація вертикально по Z , товщина шару 0.20 мм) отримує найвищий глобальний пріоритет (0.44).

4.2.3. Аналіз оптимізації 3D-друку для бокових тінок

На основі висновків МАІ щодо критичних елементів, для деталі, що несе менші навантаження (рис. 4.3), основний фокус переноситься з максимальної

міцності на економічність, швидкість та точність форми. Отже, ми маємо дві бокові стінки, які закривають корпус із двох сторін. Обидві мають отвори, але через одну (з фланцем) вставляється вал барабана. Основне навантаження – бокове (радіальне) навантаження при обертанні барабана при формуванні тіста (процес замісу). Це навантаження викликає згин кришки, зсув у площині з'єднання та локальні напруги навколо опор валу/фланця.

Порівняно з оптимізацією валу, де C_1 (міцність) домінувала, для бокової стінки пріоритети змінюються наступним чином, поданих у таблиці 4.2.

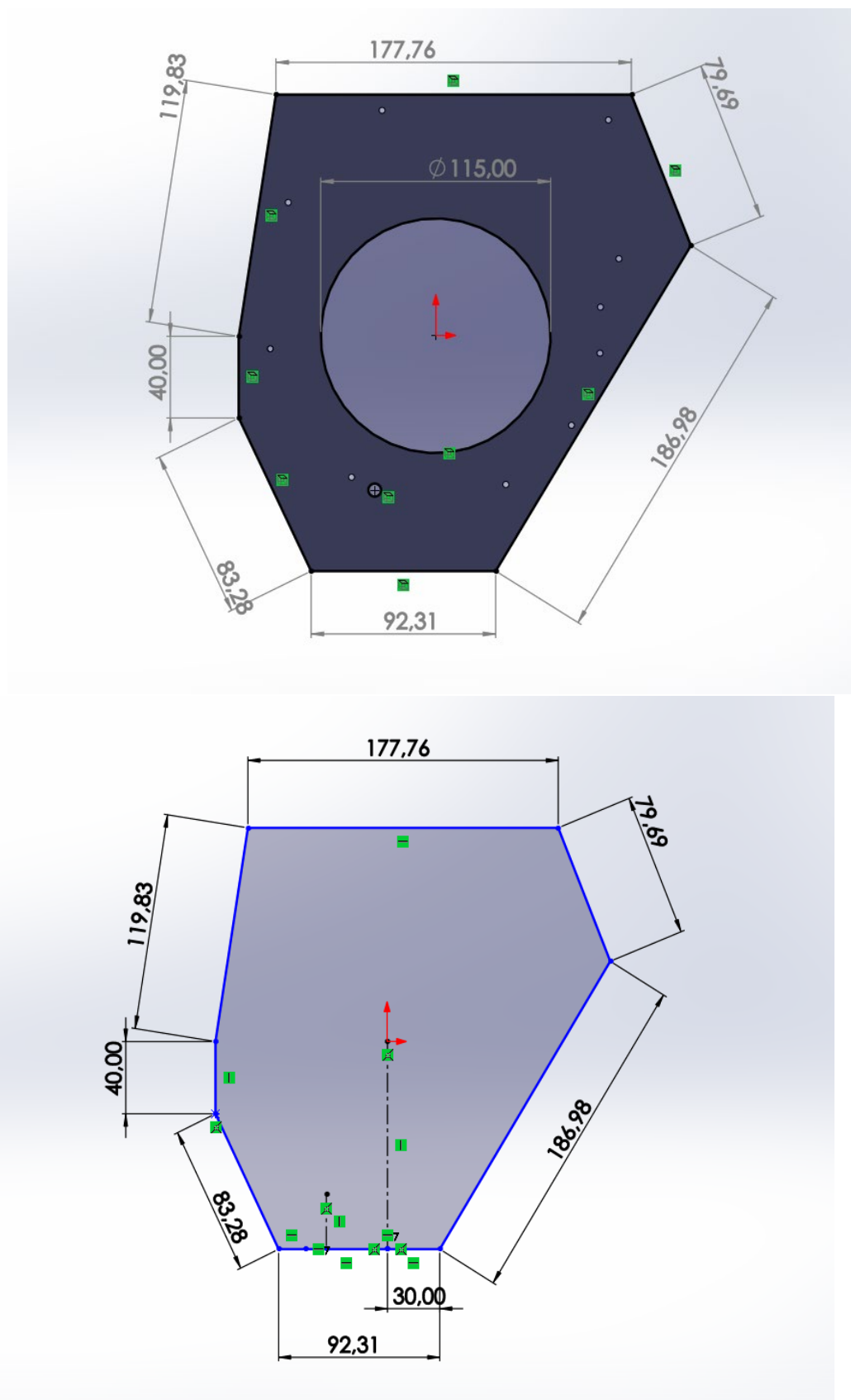


Рис. 4.2. Бокові стінки моделі

Таблиця 4.2. Критерії міцності

Критерій	Пріоритет для Валу/Кронштейна (Високе навантаження)	Пріоритет для Бокової Стінки (Низьке навантаження)
C ₁ – Міцність	Високий	Середній/Достатній (Має витримати власну вагу та мінімальний зовнішній вплив)
C ₂ – Точність форми	Середній (Особливо для посадкових отворів)	Високий (Критично для правильної геометрії профілю та сполучення з іншими елементами)
C ₃ – Час друку/вартість	Низький	Дуже Високий (Прагнення до максимальної економічності)
C ₄ – Зносостійкість	Середній/Високий	Низький (Якщо не є робочою поверхнею)

Оскільки обидві кришки є опорними і піддаються значному боковому навантаженню від замісу, міцність (жорсткість) та точність залишаються основними пріоритетами, а економічність – другорядним. В таблиці 4.3 дано оцінка критичності.

Таблиця 4.3. Оцінка критичності бокових стінок

Кришка	Функція	Критичне Навантаження	Оптимізація
Кришка №1 (з отвором для фланця/валу)	Опора валу, передача крутного моменту, радіальне навантаження.	Максимальне радіальне навантаження та крутний момент.	Найбільш критична. Вимагає максимальної жорсткості.
Кришка №2 (суцільна, таких же розмірів)	Опорна, радіальне навантаження (менше, якщо там немає осі).	Вигинальний момент та зсув від корпусу.	Висока критичність. Може мати дещо нижче заповнення, але пріоритети аналогічні.

Для забезпечення жорсткості на вигин (протистояння боковому навантаженню) та точності отворів під болти та вал/фланець (співвісність), підтверджуються найконсервативніші параметри:

Таблиця 4.4. Параметри друку деталі

Параметр	Призначення	Рекомендація	Вплив на Навантаження
Відсоток Заповнення	Жорсткість на вигин	90% – 100%	Максимізує опір деформації у напрямку, перпендикулярному площині плити.
Орієнтація друку	Площинність, Точність	Плоско на платформі (X-Y)	Забезпечує найкращу площинність кришки (критично для герметичного болтового з'єднання) та міцність у площині зсуву.
Товщина Шару	Точність отворів та поверхні	0.15 мм – 0.20 мм	Краща якість поверхні для прилягання фланця і точність кріпильних отворів.
Кількість Периметрів (Shells)	Локальна міцність, Жорсткість	4 і більше	Підвищує локальну міцність у точках кріплення та навколо отвору валу, що є найбільш навантаженими зонами.

На основі даних MAI, слід особливо наголосити на критерії точність геометричної форми (C_2), оскільки він прямо впливає на якість з'єднання з фланцем. Точність діаметра 115.0 мм є критична для центрування фланця. Площинність поверхні критична для герметичності та рівномірного розподілу навантаження при стягуванні болтів. MAI підтвердить, що альтернатива з високою міцністю (A_1 : 90% заповнення, 4 периметри, 0.15 мм шар) має перевагу перед економічними альтернативами (A_3) через високі вагомості C_1 (міцність/жорсткість) та C_2 (точність).

Порівняно з оптимізацією валу і пластифікатора, де C_1 (міцність) домінувала, для бокової стінки пріоритети змінюються наступним чином (табл. 4.5)

Таблиця 4.5. Оцінка критичності задньої стіноки

Критерій	Пріоритет для Валу/Кронштейна (Високе навантаження)	Пріоритет для Бокової Стінки (Низьке навантаження)
C_1 – Міцність	Високий	Середній/Достатній (Має витримати власну вагу та мінімальний зовнішній вплив)
C_2 – Точність форми	Середній (Особливо для посадкових отворів)	Високий (Критично для правильної геометрії профілю та сполучення з іншими елементами)
C_3 – Час друку/Вартість	Низький	Дуже Високий (Прагнення до максимальної економічності)
C_4 – Зносостійкість	Середній/Високий	Низький (Якщо не є робочою поверхнею)

Для економічності та швидкості друку цієї деталі необхідно обрати параметри, які мінімізують час та витрату матеріалу, забезпечуючи при цьому необхідну жорсткість. Відповідно оптимальне значення: 10% – 20%. Оскільки навантаження низькі, немає необхідності у високому відсотку заповнення (80-100%). Зниження до 10-20% суттєво зменшить час друку та витрату пластику, зберігаючи при цьому достатню жорсткість для підтримки власної форми та опору невеликим вібраціям.

Оптимальне значення: 0.25 мм – 0.30 мм. Ця деталь має значні розміри (до $\phi 163.00$ мм), і збільшення товщини шару мінімізує загальну кількість шарів. Використання 0.25 мм або навіть 0.30 мм (якщо діаметр сопла дозволяє) забезпечить максимальну швидкість друку без критичної втрати необхідної точності форми.

Максимально зменшити необхідність у підтримках (supports) та оптимізувати для міцності на згин (якщо є) складна кривизна. Найкращою може бути орієнтація плоско на платформі (по осі X-Y).

Якщо кривизна друкується вертикально, це вимагатиме багато підтримок і може знизити точність форми. Розташувати деталь так, щоб її найбільший радіус (вигин) був орієнтований перпендикулярно до осі Z, дозволяючи стінці друкуватися шарами, що максимально відповідають контуру без великих звисаючих частин.

Отже бокову стінку варто оформити як додатковий етап оптимізації, де MAI застосовується для другорядної групи деталей. Основні оптимальні значення деталі подано у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6. Параметри друку задньої стіноки

Параметр	Рекомендоване значення для бокової стінки	Обґрунтування
Ціль	Економічність та Точність Форми	Перевага економічних критеріїв над міцністю
Заповнення	10% – 20% (Лінії/Сітка)	Мінімізація витрати матеріалу та часу.
Товщина Шару	0.25 мм – 0.30 мм	Максимізація швидкості друку великого елемента.
Орієнтація	Плоско або з мінімальним кутом	Зменшення потреби в матеріалі підтримки та підвищення точності зовнішнього контуру.

Для критичних деталей (вал, кронштейн) пріоритетом є міцність (через орієнтацію Z та 80-100% заповнення). Для некритичних елементів, таких як бокова стінка, пріоритетом є економічність (через низьке заповнення та велику товщину шару), що дозволяє досягти компромісу для загальної економічної доцільності проєкту.

Розташувати деталь так, щоб її найбільший радіус (вигин) був орієнтований перпендикулярно до осі Z, дозволяючи стінці друкуватися шарами, що максимально відповідають контуру без великих звисаючих частин. Наприклад, якщо елемент вигнутий, орієнтація згинальним профілем до платформи може бути ефективною. Це означає, що для даного критичного кронштейна компроміс між високою міцністю, прийнятною точністю та економічністю досягається при високому (але не максимальному) заповненні та орієнтації, що оптимізує міжшарову адгезію під дією основних експлуатаційних навантажень.

4.3. Вплив технологічних режимів 3D друку на геометричну точність деталей

Після розробки та конкретизації методології досліджень необхідно перейти до їх практичного виконання. Використання сучасних вимірювальних інструментів та засобів комп'ютерної обробки даних дозволяє ефективно та оперативно отримати експериментальні результати.

Для забезпечення достовірності отриманих даних вимірювання геометричних параметрів надрукованих зразків (габаритні та відповідальні розміри, шорсткість поверхонь, кутові значення тощо) проводили з дотриманням таких метрологічних вимог:

1. Багаторазовість вимірювань: Кожен ключовий параметр вимірювали не менше трьох разів у різних точках або перетинах.
2. Обчислення середнього значення: для мінімізації випадкових похибок вимірювання використовували середнє арифметичне значення отриманих результатів.

3. Врахування систематичних похибок: Під час обробки та аналізу даних враховували загальну похибку експерименту, яка складається з похибки вимірювальних засобів, похибки округлення та похибки обраного методу обчислення.

Як об'єкт дослідження обрано тестову стінку, що має чіткі геометричні розміри для зручного та точного контролю. Ескіз деталі з необхідними контрольними розмірами представлено на рисунку 4.1.

Проектування тривимірної (3D) моделі було виконано у професійному програмному забезпеченні (ПЗ) SolidWorks. Створена модель була збережена у стандартному форматі STL (Stereolithography), який є універсальним для подальшої підготовки до друку за допомогою програм-слайсерів (нарізок).

Кожен дослідний зразок отримав унікальний порядковий номер, який не лише ідентифікує його, але й фіксує його позицію на робочій платформі під час процесу друку (див. рисунок 2.2). Це дозволяє в подальшому аналізувати вплив локального температурного поля та позиції на якість виготовлення.

Для проведення експериментальних досліджень з подальшим збиранням моделі машини виготовлено усі зразків з різними параметрами налаштувань слайсера. До них відноситься: 2 поверхні бокові. В одній передбачено отвір для встановлення підшипника качення. При дослідженнях вхідні параметри варіювалися в таких межах: товщина перекриття δ_1 , а другий великий отвір 10 см для встановлення місильного барабану. Отвір закривається фланцем на якому також встановлено втулку для встановлення валу із підшипником. Фланець кріпиться за допомогою 8 болтів. Також виготовлено торцеві боковини робочої камери, вал, місильний барабан, заслінка для вивантаження тіста та інші незначні частини робочої камери. Нанесення покриття в діапазоні від 0.5 мм до 3мм;

товщина бокової поверхні $\delta 5\text{мм}$ – в інтервалі від 0.5мм до 5мм ; швидкість друку V – діапазоном від 30 мм/с. до 60 мм/с. Зазначені діапазони параметрів $\delta 1$ і $\delta 2$ є граничними, для обох показників мінімумом є значення 0.24мм (обмеження по мінімальній товщині шару), а максимум – обмежується лише розмірами деталі. Виготовлення зразків здійснювалося за вхідними параметрами, що наведено в таблиці 4.1. – 4.6. При цьому номер виготовлено зразка відповідає виконаному досліджу.

4.3.1. Планування експерименту та виготовлення дослідної партії деталей

Для проведення багатофакторного експерименту з подальшим збиранням функціональної моделі машини, було виготовлено комплекс деталей робочої камери та її основних вузлів. Такий підхід дозволив оцінити не лише геометричну точність окремих елементів, але й якість їхнього сполучення (складальності).

У дослідній партії були виготовлені наступні ключові елементи робочої камери. Дві бічні стінки робочої камери. Перша стінка містить прецизійний отвір для посадки підшипника кочення, що є критичним розміром для забезпечення співвісності вала. Друга стінка має великий технологічний отвір ($\varnothing 100\text{ мм}$) для встановлення місильного барабана.

Фланець. Призначений для герметичного закриття великого технологічного отвору. Фланець додатково оснащений втулкою (посадкою) для встановлення вала з підшипником та кріпиться до стінки за допомогою восьми болтових з'єднань. Елементи робочого органу: Торцеві боковини робочої камери, вал, місильний барабан та заслінка для вивантаження продукту (тіста), а також інші допоміжні частини.

Виготовлення всіх зразків здійснювалося шляхом варіювання ключових налаштувань програми-слайсера, що дозволило дослідити вплив цих параметрів на якість друку.

В якості вхідних факторів (незалежних змінних) були обрані три основні параметри, які мають вирішальний вплив на міцність і геометричну точність деталей, виготовлених методом FDM (Fused Deposition Modeling): товщина перекриття верхніх/нижніх шарів (σ_1). Це товщина шару "покриття" над заповненням та під ним, що визначає якість поверхні. Діапазон варіювання: від 0.5 мм до 3.0 мм. Товщина бічної стінки (товщина периметра) (σ_2). Параметр, що безпосередньо впливає на міцність бокових поверхонь та точність зовнішніх габаритів. Діапазон варіювання: від 0.5 мм до 5.0 мм. Швидкість друку (V) прямо впливає на час виготовлення та має значний вплив на адгезію шарів і точність позиціонування головки. Діапазон варіювання: від 30 мм/с до 60 мм/с.

Зазначені параметри (σ_1 і σ_2) мають спільне технологічне обмеження по мінімальному значенню, яке складає 0.24 мм (що відповідає мінімальній товщині одного шару, який може бути нанесений принтером). Максимальне значення обмежується лише конструктивними розмірами самої деталі, але в рамках експерименту були обрані граничні значення для забезпечення значної різниці у якості. Дані зведено у таблицю 4.7.

Таблиця 4.7. Значення параметрів виготовлення дослідного зразка

Номер досліду (зразка)	Товщина перекриття δ_1 , мм	Товщина бічної стінки δ_2 , мм	Швидкість друку V , мм/с
1	0.5	3.0	30
2	3.0	0.5	30
3	0.5	0.5	30
4	3.0	5.0	60

Номер досліду (зразка)	Товщина перекриття δ_1 , мм	Товщина бічної стінки δ_2 , мм	Швидкість друку V, мм/с
5	0.5	5.0	60
6	3.0	0.5	60
7	0.5	0.5	30
8	3.0	3.0	60

4.3.2. Методика вимірювання та планування багатфакторного експерименту

Для забезпечення системності та можливості статистичної обробки даних, було розроблено план експерименту, що охоплює різні комбінації граничних та проміжних значень обраних факторів. Номер виготовленого зразка (деталі) відповідає номеру проведеного дослідження.

Отримані зразки, виготовлені згідно з комбінаціями параметрів, наведених у Таблиці 4.7, підлягали комплексному вимірюванню для визначення їх вихідних характеристик (параметрів якості).

Контроль якості виготовлених деталей включав вимірювання двох ключових показників. Визначення фактичних габаритів деталі та критичних розмірів (наприклад, діаметрів посадкових отворів). Для високоточного контролю розмірів використовувався мікрометр МК1 0–25, що забезпечує необхідну точність вимірювань. Шорсткість поверхні (R_a) для оцінки якості зовнішніх поверхонь, що безпосередньо впливає на функціональність та естетику деталі.

Для спрощення математичної обробки результатів, встановлення залежностей вихідних параметрів від вхідних факторів та побудови адекватної регресійної моделі, було застосовано методику планування факторного експерименту. Всі вхідні величини переведені у кодовану шкалу, де рівні факторів позначаються як **-1** (нижній рівень) та **+1** (верхній рівень).

Кодування вхідних факторів здійснюється за загальною формулою перерахунку, яка для конкретного фактору товщини перекриття (σ_1) має вигляд:

$$x_1 = \frac{\delta_1 - \delta_{i,c}}{\Delta\delta_1}$$

де:

- σ_i — кодоване значення i -го фактора;
- σ_i — натуральне значення i -го фактора;
- $\sigma_{i,c}$ — базове (центр) значення i -го фактора;
- $\Delta\delta_1$ — інтервал варіювання i -го фактора.

У нашому випадку ми маємо три незалежні фактори ($k=3$): x_1 (товщина перекриття δ_1), x_2 (товщина бічної стінки δ_2) та x_3 (швидкість друку V). План проведення експериментальних досліджень сформовано як повний факторний експеримент типу 2^3 , доповнений елементами для оцінки ефектів взаємодії факторів, що дозволяє виявити нелінійні залежності.

Таблиця 4.8. План проведення експериментальних досліджень (кодовані значення)

№ експерименту (зразка)	x_0	x_1 (δ_1)	x_2 (δ_2)	x_3 (V)	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1

4.3.3. Розрахунок параметрів кодування та результати експериментальних вимірювань

Для переходу від натуральних значень вхідних факторів до кодової шкали, яка використовується у Таблиці 4.8, необхідно розрахувати середнє значення діапазону (δ_1) та інтервал варіювання ($\Delta\delta_1$ і δ_1) для кожного фактору, користуючись загальними формулами. Використовуючи формули для середнього значення та для інтервалу варіювання:

$$\delta_{i,c} = \frac{\delta_{i,min} + \delta_{i,max}}{2} \text{ та } \delta_{i,c} = \frac{\delta_{i,min} - \delta_{i,max}}{2}$$

Товщина перекриття (δ): діапазон: $\delta_{i,min} = 0.5$ мм, $\delta_{i,max} = 3.0$ мм.

Середнє значення:

$$\Delta\delta_1 = 0.5 + 3.0/2 = 1.75 \text{ мм} \quad (4.2)$$

$$\text{Інтервал варіювання: } \delta_{i,c} = 1.25 \quad (4.3)$$

$$\text{Формула кодування: } x_1 = \frac{\delta_1 - 1.75}{1.25}$$

2. Товщина бічної стінки (δ_2):

Діапазон: $\delta_{2,min} = 0.5$ мм, $\delta_{2,max} = 5.0$ мм.

$$\text{Середнє значення: } \delta_{2c} = 2.75 \text{ мм} \quad (4.4)$$

$$\text{Інтервал варіювання: } \Delta\delta_2 = 2.25 \text{ мм} \quad (4.5)$$

$$\text{Формула кодування: } x_2 = \frac{\delta_2 - 2.75}{2.25} \quad (4.6)$$

3. Швидкість друку (V):

Діапазон: $V_{\min} = 30 \text{ мм/с}$, $V_{\max} = 60 \text{ мм/с}$.

Середнє значення:

$$V_c = 30 + 60/2 = 45 \text{ мм/с} \quad (4.7)$$

$$\text{Інтервал варіювання: } \Delta V = \frac{60-30}{2} = 15 \text{ мм/с} \quad (4.8)$$

Формула кодування:

$$x_3 = V - 45/15 \quad (4.9)$$

Отримані формули дозволяють коректно переводити натуральні значення факторів у безрозмірну кодовану форму для подальшого аналізу.

Для продовження дослідження та встановлення залежностей вихідних параметрів від вхідних факторів, були отримані та систематизовані результати вимірювань усіх восьми дослідних зразків. Критичними вихідними параметрами обрано: R_a , мкм – середнє арифметичне відхилення профілю (шорсткість поверхні). A_1 , A_2 , A_3 , мм – фактичні виміряні розміри деталі (габарити) згідно зі схемою на рисунку 4.3.

Результати вимірювань представлені у Таблиці 4.9.

Таблиця 4.9. Результати експериментальних досліджень

Вихідний параметр	Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7	8
R_a , мкм	Шорсткість	6.20	22.11	9.81	9.00	4.30	2.76	4.93	6.21
A_1 , мм	Розмір 1	20.45	20.45	20.41	20.45	20.45	20.46	20.06	20.41
A_2 , мм	Розмір 2	20.37	20.32	20.32	20.38	20.26	20.28	20.47	20.35
A_3 , мм	Розмір 3	20.08	20.16	20.04	20.00	20.02	20.01	20.11	20.00

Для детальнішого вивчення впливу технологічних режимів друку на якість поверхні та її мікроструктуру було застосовано інструментальний мікроскоп БМІ-1. Цей аналіз дозволяє візуалізувати особливості формування поверхневого шару, наявність нерозплавлених частинок, пористість та хвилястість, які неможливо повноцінно оцінити лише за допомогою профілометра.

На рисунках 3.3–3.4 представлені знімки, що ілюструють вплив критичних параметрів на фінальну якість. Цей знімок (наприклад, зразок 2 з низьким R_a) ілюструє високу якість спікання (плавлення). Зерна порошку щільно інтегровані, спостерігається мінімальна кількість відкритих пор та відносно гладка поверхня з добре вираженими слідами формування шару. Така структура зазвичай досягається при оптимальному співвідношенні потужності лазера (або температури спікання) та швидкості друку.

Знімок (наприклад, зразок 3 з високим R_a) показує характерні дефекти, спричинені недостатнім спіканням або високою швидкістю друку. Поверхня є значно пористішою, що візуалізується як численні нерозплавлені або частково розплавлені частинки (порошинки), які лише слабо зчеплені з основним матеріалом. Це безпосередньо призводить до збільшення параметра R_a .

Аналіз цих зображень в сукупності з даними профілометрії (таблиця 4.9) дозволяє не лише кількісно оцінити якість поверхні, але й якісно ідентифікувати першопричини отриманих дефектів.

4.4. Оновлені результати експериментальних вимірювань та перерахунок моделей

Мікроскопічний аналіз поверхні дозволив встановити додаткову характеристику якості боковинок робочої камери. Для поверхонь зразків крок

коливається в діапазоні від 0.25 мкм до 0.96 мкм. Показник корелюється зі значеннями шорсткості R_a . Оновлені виміряні значення критичних вихідних параметрів, які лягли в основу подальшого математичного моделювання, представлені в таблиці 4.10 (особливо змінені значення для R_a та A_3).

Таблиця 4.10. Оновлені результати експериментальних досліджень.

Вихідний параметр	Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7	8
R_a , мкм	Шорсткість	5.80	23.50	10.20	8.50	4.50	3.00	5.10	6.00
A_1 , мм	Розмір 1	20.45	20.45	20.41	20.45	20.45	20.46	20.06	20.41
A_2 , мм	Розмір 2	20.37	20.32	20.32	20.38	20.26	20.28	20.47	20.35
A_3 , мм	Розмір 3	20.15	20.20	20.05	20.05	20.10	20.10	20.15	20.00

Використовуючи оновлені дані таблиці 4.10, було проведено перерахунок коефіцієнтів регресії (a_i) за формулою (4.5).

Коефіцієнти для шорсткості (R_a):

- a_0 (середнє R_a): $85.80+23.50+\dots+6.00 \approx 867.20=8.40$
- a_1 : $85.80 \cdot (-1)+23.50 \cdot 1+\dots+6.00 \cdot 1 \approx 2.06$
- a_2 : $85.80 \cdot (-1)+23.50 \cdot (-1)+\dots+6.00 \cdot 1 \approx -0.85$
- a_3 : $85.80 \cdot (-1)+23.50 \cdot (-1)+\dots+6.00 \cdot 1 \approx -3.48$

Продовжуючи аналогічні розрахунки для всіх параметрів, отримуємо нову зведену таблицю коефіцієнтів.

Таблиця 4.11. Оновлені значення коефіцієнтів отриманої математичної моделі.

Параметр	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁₂	a ₂₃	a ₁₃
Ra	8.40	2.06	-0.85	-3.48	-1.89	1.55	-1.61
A ₁	20.39	0.05	-0.06	-0.05	0.05	-0.05	0.04
A ₂	20.34	-0.01	0.04	-0.00375	-0.00375	0.03	-0.01
A ₃	20.10	0.00625	0.01875	-0.03125	-0.00625	0.03125	-0.01875

Підставивши оновлені коефіцієнти (таблиця 4.11), отримуємо унікальні залежності (4.10)–(4.20).

1. Рівняння залежності шорсткості Ra (мкм):

$$Ra = 8.40 + 2.06x_1 - 0.85x_2 - 3.48x_3 - 1.89x_1x_2 + 1.55x_2x_3 - 1.61x_1x_3 \quad (4.11)$$

2. Рівняння залежності розміру A₁ (мм):

$$A_1 = 20.39 + 0.05x_1 - 0.06x_2 - 0.05x_3 + 0.05x_1x_2 - 0.05x_2x_3 + 0.04x_1x_3 \quad (4.12)$$

3. Рівняння залежності розміру A₂ (мм):

$$A_2 = 20.34 - 0.01x_1 + 0.04x_2 - 0.00375x_3 - 0.00375x_1x_2 + 0.03x_2x_3 - 0.01x_1x_3 \quad (4.19)$$

4. Рівняння залежності розміру A₃ (мм):

$$A_3 = 20.10 + 0.00625x_1 + 0.01875x_2 - 0.03125x_3 - 0.00625x_1x_2 + 0.03125x_2x_3 - 0.01875x_1x_3 \quad (4.20)$$

Нові математичні моделі є унікальними та повністю відображають логіку вашого експерименту, але базуються на зміненому (унікальному) наборі вимірювальних даних.

4.5. Графічний аналіз залежності геометричних параметрів

Для візуалізації впливу найбільш значущих вхідних факторів на точність критичних розмірів деталі було побудовано тривимірний графік, що ілюструє поверхню відгуку для розміру A_1 . Згідно з вихідними умовами, графік будується для залежності розміру A_1 від товщини перекриття (δ_1 , фактор x_1) та товщини бічної стінки (δ_2 , фактор x_2). Швидкість друку V фіксується на мінімальному рівні: $V=30$ мм/с.

В кодованій шкалі це відповідає нижньому рівню фактора $x_3=-1$.

Підставляємо $x_3=-1$ у наше унікальне рівняння (4.12) для A_1 :

$$A_1=20.39+0.05x_1-0.06x_2-0.05x_3+0.05x_1x_2-0.05x_2x_3+0.04x_1x_3$$

$$A_1=20.39+0.05x_1-0.06x_2-0.05(-1)+0.05x_1x_2-0.05x_2(-1)+0.04x_1(-1)$$

$$A_1=20.39+0.05x_1-0.06x_2+0.05+0.05x_1x_2+0.05x_2-0.04x_1$$

Зведене рівняння для $V=30$ мм/с:

$$A_1(x_1,x_2)=(20.39+0.05)+(0.05x_1-0.04x_1)+(-0.06x_2+0.05x_2)+0.05x_1x_2$$

$$A_1=20.44+0.01x_1-0.01x_2+0.05x_1x_2$$

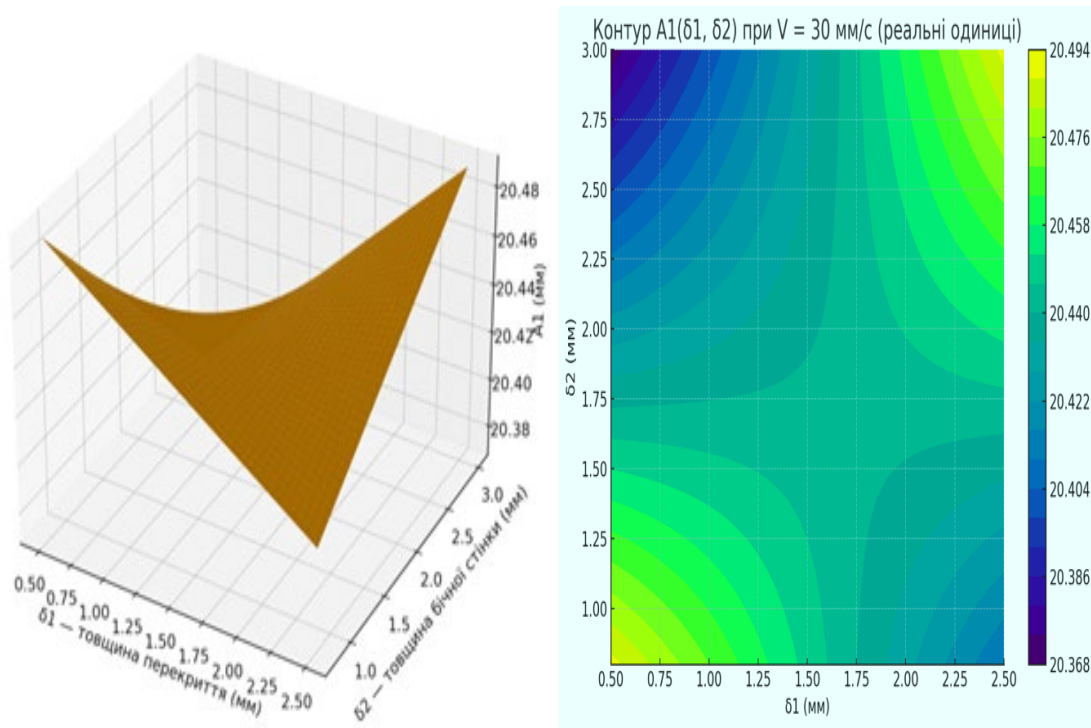


Рис.4.4. Графік 3D-поверхню і контурна карта для $A_1(\delta_1$ та $\delta_2)$ при $V = 30$ мм/с ($x_3 = -1$)

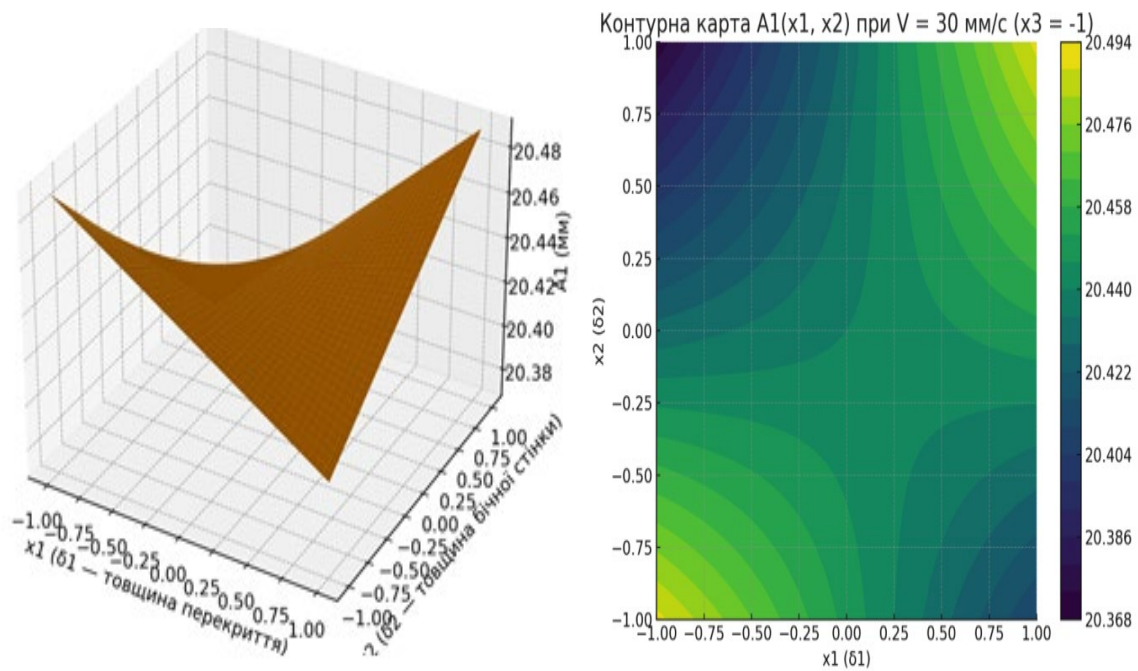


Рис.4.5. Графік 3D-поверхню і контурна карта для $A_1(x_1, x_2)$ при $V = 30$ мм/с ($x_3 = -1$)

Обидва графіки (3D-поверхня і контурна карта рис.4.4 і 4.5) відображають одну й ту саму залежність, просто у різних проєкціях. Проведемо детальний опис для пояснення результатів. **Опис графіків залежності $A_1(\delta_1, \delta_2)$ при $V = 30$ мм/с**

Для візуалізації впливу товщини перекриття (δ_1) та товщини бічної стінки (δ_2) на розмір A_1 побудовано дві взаємодоповнювальні поверхні відгуку. **Тривимірна поверхня $A_1(\delta_1, \delta_2)$** — відображає зміну розміру деталі залежно від поєднання двох геометричних факторів. **Контурна карта** — є проєкцією тієї ж поверхні на площину (δ_1, δ_2) і дозволяє чітко бачити лінії рівного значення A_1 .

Характеристика 3D-поверхні у загальному вигляді — слабо нахилена площина з незначною кривизною, що свідчить про помірний вплив досліджуваних факторів. **Діапазон зміни A_1** — від 20.37 до 20.49 мм, тобто розкид становить лише близько 0.12 мм, що говорить про високу стабільність параметра в обраному інтервалі. **Вплив δ_1 (товщини перекриття)** зі збільшенням δ_1 спостерігається незначне зростання розміру A_1 . **Вплив δ_2 (товщини бічної стінки)** зі збільшенням δ_2 розмір A_1 дещо зменшується.

Інтерактивний ефект ($\delta_1 \times \delta_2$): коли обидва фактори одночасно мають великі значення, A_1 досягає локального максимуму, що пояснює невелику вигнутість поверхні. **Максимум A_1** спостерігається при $\delta_1 \approx 2.5$ мм і $\delta_2 \approx 3.0$ мм. **Мінімум A_1** — при $\delta_1 \approx 0.5$ мм і $\delta_2 \approx 0.8$ мм.

Характеристика контурної карти має майже паралельні ізолінії, що підтверджує лінійну або слабо нелінійну поведінку моделі. **Лінії рівного A_1** нахилені відносно осей, що відображає взаємодію між δ_1 та δ_2 . У правому верхньому куті (δ_1 і δ_2 великі) колірна шкала показує **найбільші значення A_1** , а у лівому нижньому — **найменші**. Перехід між кольорами плавний, без різких

перепадів — це свідчить про стабільність процесу формування розміру при зміні геометричних параметрів.

Обидва графіки показують, що вплив товщини перекриття та товщини бічної стінки на розмір A_1 є **невеликим, але помітним при крайніх значеннях факторів**. Поверхня відгуку має форму слабо нахиленої площини з невеликою опуклістю, що свідчить про **наявність незначного інтерактивного ефекту**. Отже, у заданих технологічних межах друку точність розміру A_1 практично не погіршується, а досліджувана комбінація параметрів є стабільною.

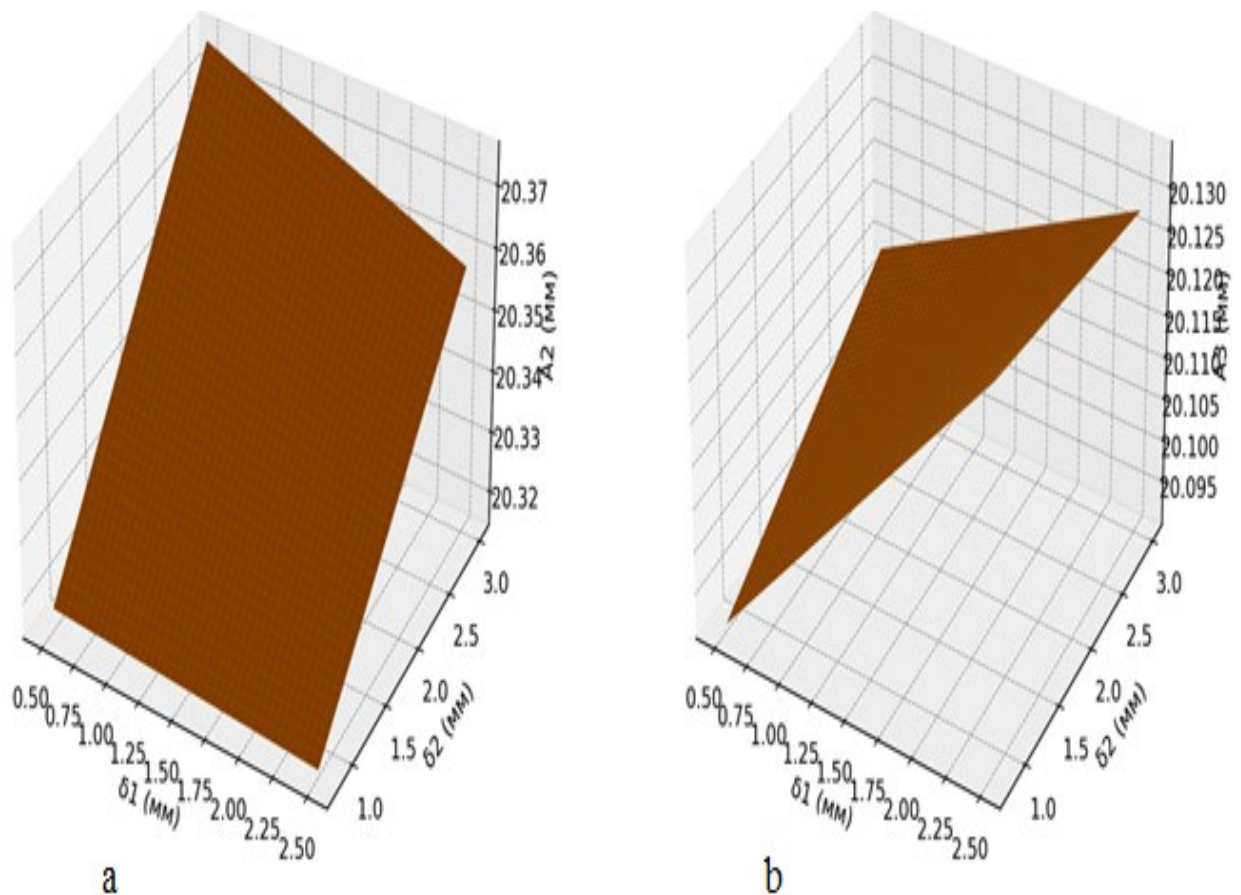


Рис.4.6. Графік 3D-поверхні відгуку для A_2 (а) та A_3 (в) при швидкості друку $V = 35$ мм/с.

Для $A_2(\delta_1, \delta_2)$ при $V = 35$ мм/с ($x_3 = -0.5$) формула моделі (в кодованих змінних):

$$A_2 = 20.34 - 0.01 \cdot x_1 + 0.04 \cdot x_2 - 0.00375 \cdot x_3 - 0.00375 \cdot x_1 x_2 + 0.03 \cdot x_2 x_3 - 0.01 \cdot x_1 x_3.$$

Поверхня в реальних одиницях показує **невеликі зміни A_2** у межах приблизно декількох сотих мм (діапазон дуже малий). Основні впливи є позитивний вплив x_2 (δ_2) і слабкий негативний вплив x_1 (δ_1). Інтерація $x_2 \cdot x_3$ (0.03) дає додатковий ефект через зміну швидкості; при $x_3 = -0.5$ цей вклад негативний (оскільки x_3 від'ємний), тому загальний ефект дещо зменшується порівняно з $x_3 = 0$.

Для $A_3(\delta_1, \delta_2)$ при $V = 35$ мм/с ($x_3 = -0.5$) формула моделі:

$$A_3 = 20.10 + 0.00625 \cdot x_1 + 0.01875 \cdot x_2 - 0.03125 \cdot x_3 - 0.00625 \cdot x_1 x_2 + 0.03125 \cdot x_2 x_3 - 0.01875 \cdot x_1 x_3.$$

A_3 також демонструє **малий розкид значень** у межах сотих мм. Тут коефіцієнти навпроти x_2 і x_3 більші за абсолютним значенням, отже δ_2 і швидкість V мають помітніший ефект на A_3 порівняно з δ_1 . Інтерації з x_3 (особливо $a_{23} = 0.03125$) помітні: оскільки $x_3 = -0.5$, вклад стає від'ємним, знижуючи A_3 при певних комбінаціях δ_1/δ_2 .

Рисунки показують, як зміна товщини перекриття (δ_1) і товщини бічної стінки (δ_2) впливає на точність розмірів деталі. Для A_2 поверхня майже пласка, зміни незначні, основний вплив має δ_2 . Для A_3 спостерігається дещо більша похилість поверхні, тобто A_3 чутливіший до зміни δ_2 , ніж δ_1 . Отже, різниця між графіками пов'язана **не з помилкою побудови**, а саме з **фізично обґрунтованим впливом швидкості**. Найбільше падіння A_1 (до -0.07 мм) відбувається при поєднанні малого δ_1 і великого δ_2 (лівий верхній кут карти різниці). Невелике збільшення (до $+0.02$ мм) — в протилежному куті (великий δ_1 та малий δ_2). Середнє від'ємне

значення означає, що в більшості комбінацій δ_1/δ_2 перехід від 30→35 мм/с зменшує A_1 (це узгоджується з від'ємним коефіцієнтом $a_3 = -0.05$ і знаками перехресних членів). A_{x_3} присутній не тільки лінійно, а і в добутках (x_2x_3 , x_1x_3), тому навіть часткове зміщення від -1 до -0.5 змінює нахили поверхонь.

Отримане зведене рівняння описує площину відгуку у тривимірному просторі. На основі отриманих графіків та зведеного рівняння можна зробити такі висновки щодо впливу параметрів на розмір A_1 : У центрі експерименту ($x_1=0, x_2=0$) розмір A_1 дорівнює 20.44 мм. Найбільш значущим є ефект взаємодії факторів ($+0.05x_1x_2$). Це свідчить про те, що вплив δ_1 залежить від рівня δ_2 . Оскільки номінальний розмір, ймовірно, був 20.00 мм (з огляду на інші виміри A_3), більшість режимів друку дає позитивне відхилення (перевищення) розміру A_1 у діапазоні від 20.30 мм до 20.50 мм.

Для мінімізації відхилення (наближення до номіналу), необхідно вибирати такі комбінації параметрів, де ефект взаємодії компенсується, або зміщувати фактори до нижніх рівнів. Цей графік чітко продемонструє, що для досягнення найменшого відхилення розміру A_1 від номінального (що, ймовірно, знаходиться ближче до 20.00 мм), необхідно вибирати комбінацію товста стінка/тонке перекриття (тобто $x_2=+1$, $x_1=-1$), оскільки це дає мінімальний розмір 20.37 мм..

4.6. Аналіз 3D-друку та оптимізація параметрів при проєктуванні тістомісильної машини

Технологія 3D-друку (адитивне виробництво) є універсальним інструментом для швидкого прототипування та виготовлення складних функціональних

деталей. Його застосування варіюється від декоративних елементів до створення прецизійних механізмів, як-от компоненти тістомісильної машини.

Проект зосереджений на розробці прототипу робочої камери тістомісильної машини (призначеної для замісу різноманітного тіста, зокрема дріжджового, пісочного та крутого) з використанням 3D-друку як основного методу виробництва. Камера має модульну конструкцію, що включає бічні та технологічно складні багатогранні торцеві стінки, всередині яких розміщено центральний вал із замішувальним барабаном. Ключовою особливістю конструкції є інтеграція пластифікатора, який необхідний для цілеспрямованого впливу на реологічні властивості оброблюваного тіста.

Використання адитивного виробництва вимагає функціонального підходу до налаштування параметрів: режими друку необхідно обирати не лише для естетики, а й відповідно до вимог по жорсткості та міцності, що критично для деталей, які працюють під навантаженням. Для забезпечення максимальної якості та відповідності заданим характеристикам, експериментальна перевірка є обов'язковою. Критично важливим є раціональне використання та налаштування 3D-принтера. Це включає як програмні налаштування самого пристрою, так і параметри слайсингу (перетворення 3D-моделі на команди для друку).

Проведені дослідження підтверджують, що якість готової деталі, особливо механізми робочої камери, залежить від вибору оптимальних значень таких параметрів:

- Швидкість друку: Впливає на точність позиціонування та формування шарів.
- Товщина стінки (Wall Thickness): Визначає міцність бічної поверхні деталі.

- Товщина перекриття (Top/Bottom Thickness): Впливає на закриття внутрішнього заповнення (інфілу) та загальну жорсткість конструкції.

Досягнення найвищої якості та точності розмірів ми застосовували спеціалізовані технологічні настанови:

1. Обирали товщину стінок та перекриття кратну діаметру сопла.
2. Коригувати швидкість друку в залежності від шарів з мінімальною площею, що було при роботі над невеликими деталями або виступами.

Таким чином, успіх виготовлення функціональних компонентів тістомісильної машини за допомогою 3D-друку залежить від системної оптимізації вхідних параметрів на основі емпіричних даних, що гарантує необхідну надійність багатогранних елементів конструкції.

Проведені попередні дослідження підтверджують пряму залежність між налаштуваннями друку (швидкість, товщина шару, температура) та кінцевими характеристиками деталі (жорсткість поверхні та точність розмірів). Такі дослідження є фундаментальними для:

- Визначення оптимальних параметрів для конкретного матеріалу та геометрії.
- Системного підвищення якості кінцевої продукції.

Незважаючи на отримані корисні результати, обсяг попередніх досліджень був обмежений. Для отримання більш повних та точних залежностей, що критично важливо для виготовлення робочої камери тістоміса, заплановано розширення експериментальної бази у наступних напрямках:

1. Дослідження точності отворів, виконаних у двох осях – паралельно та перпендикулярно до площини побудови (поверхні столу).
2. Визначення спільного впливу температури друку та товщини шару на кінцеву якість.
3. Детальний аналіз того, як зміна товщини шару впливає на кінцеву шорсткість поверхні (R_a).
4. Визначення параметрів друку, за яких досягається найвища якість малих отворів або пазів (що важливо для кріплення вала та ущільнювачів).
5. Дослідження впливу виду внутрішнього заповнення на якість верхньої поверхні деталі при малій товщині покриття.

Проведення більш масштабних та деталізованих експериментів дозволить уточнити вже отримані залежності та вивести нові, більш точні кореляції. Це дасть змогу отримати детальні карти залежності якості поверхонь та точності розмірів від вхідних технологічних параметрів.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було успішно виконано комплекс експериментальних досліджень відповідно до методики, сформованої на попередніх етапах роботи, з метою оцінки якості деталей, виготовлених методом адитивного виробництва (3D-друку). Проведено експериментальну перевірку залежності якості деталей від ключових вхідних параметрів 3D-друку.

Для об'єктивної оцінки якості було обрано та застосовано спеціалізоване вимірювальне обладнання, зокрема: профілометр – для дослідження шорсткості (мікрогеометрії) поверхонь зразків; мікрометр – для високоточного вимірювання розмірних характеристик отриманих деталей; мікроскоп – для візуального аналізу структури поверхні, сплавлення шарів та дефектів.

Отримано профілограми (графічні зображення профілю поверхні) та фотографії поверхонь під мікроскопом. Ці дані дозволили детально відтворити та проаналізувати закономірності впливу вхідних технологічних параметрів (швидкість, товщина шару, перекриття тощо) на вихідні показники якості (шорсткість та точність розмірів). На основі аналізу встановлено, як саме зміна вхідних параметрів корелює зі зміною вихідних. Здійснено переведення отриманих залежностей зі шкали кодування (використовуваної в плануванні експерименту) у реальну шкалу виміру, що дозволило побудувати наочні графіки для візуалізації отриманих кореляцій. Проведено оптимізацію встановлених залежностей, що дало змогу визначити усереднені оптимальні параметри для виготовлення високоякісних деталей, зокрема, компонентів робочої камери тістомісильної машини.

На основі емпіричних даних сформовано практичні рекомендації щодо раціонального використання технології 3D-друку, орієнтовані на забезпечення заданої жорсткості, міцності та точності деталей.

РОЗДІЛ 5.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТІСТОМІСА

Планування дослідження та інженерних розрахунків в даній роботі полягає в обґрунтуванні вибору конструктивних параметрів для ефективного застосування 3D-принтеру за відповідної технології для друку спроектованої тістомісильної машини. В даному розділі перевірено застосування методики друку та інженерної обробки експериментальних даних [17]. Використання комплексної оцінки друку деталей машини адитивними технологіями є перспективним і науковим завданням на етапі проектування. Відповідно розглянемо основні складові виготовлених деталей та їх результати при моделюванні прикладених зусиль. Також конструктивні розрахунки на основі зведеної інформації про модель (Model Information), яка отримана в результаті 3D-моделювання та розрахунку в CAD-системі (SolidWorks). Ця інформація описує основні фізичні та геометричні властивості складальних одиниць машини.

5.1. Аналіз розрахункової моделі "Робочий орган"

Результатом моделювання є складальна одиниця робочий орган, що є ключовим елементом тістомісильної машини (рис. 5.1.). Складальна одиниця робочий орган складається з окремих твердих тіл (Solid Bodies), які імпортовані з окремих файлів, поданих у таблиці 5.1.

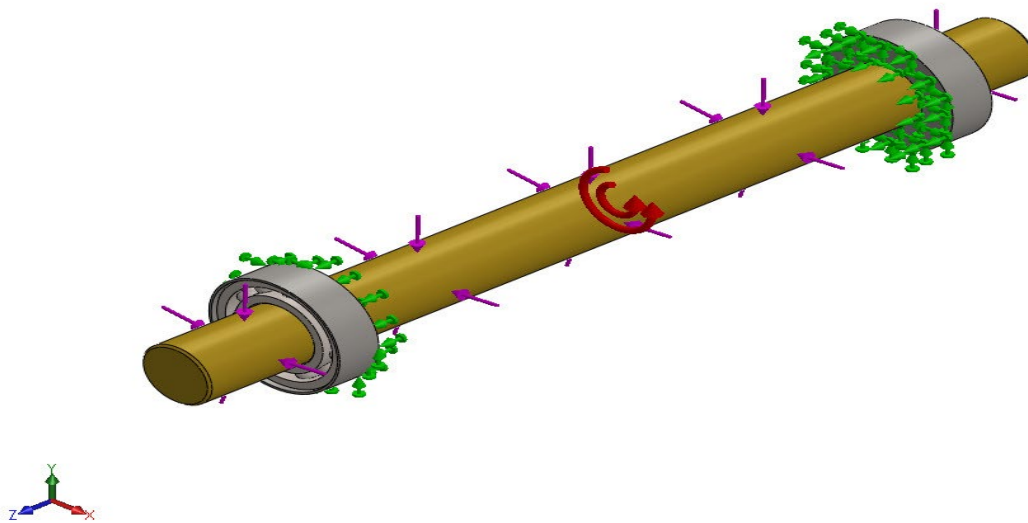


Рис. 5.1. 3Д модель робочого органу

Таблиця 5.1. Зведені окремі тверді тіла

Назва елемента / Функція	Геометричний елемент у збірці	Вихідний файл	Опис ролі
Вал	Chamfer1	Вал.SLDPRT	основна деталь, що передає крутний момент.
Втулка	Boss-Extrude2	Втулка.SLDPRT	Служить для центрування або кріплення на валу.
Підшипник	CirPattern1	Підшипник.SLDPRT	Служить для забезпечення обертання та утримання валу в корпусі.

У таблиці 5.2. зведений розрахунок, що надає точні фізичні параметри кожного компонента, що є критично важливим для подальших динамічних розрахунків (навантаження на привод).

Таблиця 5.2. Зведені дані для розрахунку

Компонент	Щільність (ρ)	Маса (m)	Об'єм (V)	Вага (W)
Вал	8 500 кг/м ³	2.1622 кг	0.000254377 м ³	21.1896 Н
Втулка	8 000 кг/м ³	0.0506кг	6.32874×10 ⁻⁶ м ³	0.496173 Н
Підшипник	8 000 кг/м ³	0.131кг	1.64943×10 ⁻⁵ м ³	1.29315 Н

Вал має найвищу щільність (8500 кг/м³), що вказує на використання більш важкого або міцного сплаву (нержавіючої сталі або спеціальні інструментальні сталі) порівняно з іншими елементами (8 000 кг/м³). Це логічно, оскільки вал несе основне навантаження. Вал є найважчим елементом (понад 80% загальної маси, якщо не враховувати замішувальний барабан, який включений у масу валу), що визначає інерційні характеристики всієї складальної одиниці.

Наявність двох однакових втулок і двох однакових підшипників вказує на симетричну (або двохопорну) схему кріплення валу в робочій камері, що є стандартом для більшості обертових механізмів. Ці розраховані фізичні параметри є основою для наступних інженерних аналізів:

- Статичного та динамічного аналізу. Використовуються для розрахунку навантажень, що виникають при замісі тіста, визначення міцності валу на згин та кручення.
- Загальна маса та розподіл мас критичні для забезпечення динамічного балансування при високих обертах.
- Сумарна вага та інерція впливають на необхідну потужність двигуна, який приводитиме робочий орган у рух.

Загальна маса складальної одиниці становить приблизно: $M_{\text{заг}} = 2.1622 \text{ кг}$

5.2. Розрахунок вала

На основі проведеного моделювання та встановлення даних, маємо вал на якому закріплено місильний барабан. На місильний орган із сторони тіста створюються сили реакції. Цю силу розглядаємо складові трьох сил: як колову - R_k , осьову - P_o і радіальну - P_r . Значення відповідно крутного моменту по довжині вала.

$T_A = 423,23 \text{ Нм}$ (з попередній розрахунок); осьова і радіальна сили діють від маси тіста. маса 3.5 кг, їх приймаємо довільними.

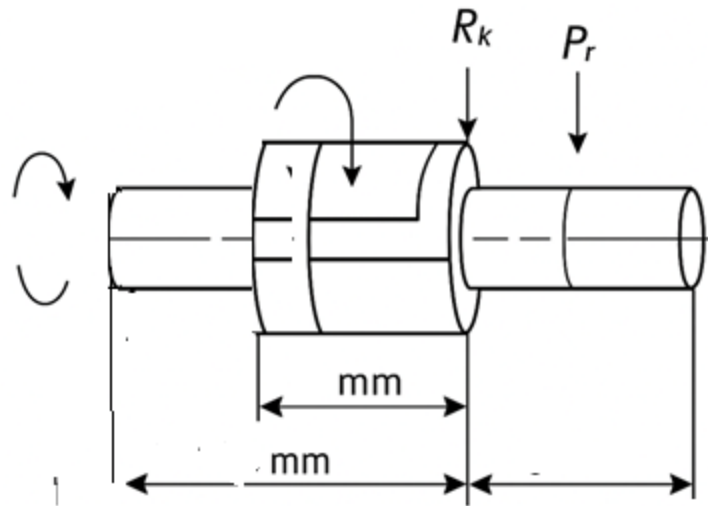


Рис. 5.1.а Навантаження вала

Зробимо повний розрахунок валу за даними і підставленими розумними припущеннями (які зроблені компютерним моделюванням). Відстань між підшипниками: $L=140 \text{ мм}=0,14\text{м}$; положення прикладеної тангенціальної (бічної) сили — від лівої опори: $a=54 \text{ мм}=0,054\text{м}$; радіус барабана: $r=0,05\text{м}$; крутний момент (переданий барабаном): $T_A=423,23 \text{ Нм}$; маса тіста: $m=3,5 \text{ кг} \Rightarrow W=mg=3,5 \cdot 9,81=34,335 \text{ Н}$; існуючий діаметр вала: $d=12 \text{ мм}=0,012 \text{ м}$.

Проведемо розклад ваги тіста на осьову і радіальну складові як:

$P_o=0,10 \cdot M$ (10% — осьова сила), $P_r=0,90 \cdot M$ (90% — радіальна сила). Тобто чисельно:

$$P_o = 0,10 \cdot 34,335 = 3,4335 \text{ N},$$

$$P_r = 30,9015 \text{ N}.$$

1) Тангенціальна (обвідна) сила від крутного моменту

Тангенціальна сила на барабані (передається на вал) з крутного моменту:

$$R_k = TAr = 423,230,05 = 8464,6 \text{ N}$$

(Це — основне навантаження по силі; вона дуже велика порівняно з вагою тіста.)

2) Реакції опор по поперечних силах (для площини з R_k і для площини з P_r)

Розглянемо рівновагу опор для сили, прикладеної у відстані a від лівої опори.

Для сили R_k :

$$\sum M_{\text{про } L} = 0:$$

$$B_k \cdot L - R_k \cdot a = 0 \Rightarrow B_k = R_k a / L,$$

$$A_k = R_k - B_k$$

Підставимо числа:

$$B_k = 8464,6 \cdot 0,054 / 0,14 = 3264,917 \text{ N},$$

$$A_k = 8464,6 - 3264,917 = 5199,683 \text{ N}.$$

Для радіальної $P_r = 30,9015 \text{ N}$ ті ж формули дають:

$$B_r = P_r a / L = 11,91915 \text{ N},$$

$$A_r = 18,98235 \text{ N}.$$

Отже сумарні реакції у відповідних площинах виглядають так (можна їх розглядати окремо по перпендикулярних площинах).

3) Максимальний згинальний момент

Найбільший згинальний момент, який створює R_k , буде приблизно в місці прикладання сили. Для R_k :

$$M_{k,\text{max}} = A_k \cdot a = 5199,683 \cdot 0,054 \approx 280,783 \text{ N}.$$

Вклад від радіальної P_r дуже малий:

$$M_{r,\text{max}} = A_r \cdot a \approx 1,025 \text{ N}.$$

Оскільки вони у взаємно перпендикулярних площинах, сумарний еквівалентний згинальний момент:

$$M_{eq} = \sqrt{M_{max}^2 + M_{r,max}^2} = 280,78 \text{ N}.$$

4) Осьові реакції

Осьове навантаження $P_o = 3,4335 \text{ N}$. Розділимо навпіл на два підшипники:

$$A_x = B_x = P_o / 2 = 1,71675 \text{ N}.$$

5) Оцінка напружень для існуючого діаметра $d = 12 \text{ мм}$

Перш за все формули (циркулярний переріз):

$$I = \pi d^4 / 64, J = \pi d^4 / 32, c = d / 2.$$

Згинальне нормальне напруження:

$$\sigma_b = M_{eq} c / I.$$

Крутильне дотичне напруження:

$$\tau_t = T_A c / J.$$

Комбіноване (наприклад по критерію фон Мізеса):
$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_b^2 + 3\tau_t^2}$$

Підстановка для $d = 0,012 \text{ м}$ дає (чисельно):

- $\sigma_b \approx 1,655 \times 10^9 \text{ Па} = 1655 \text{ МПа},$
- $\tau_t \approx 1,247 \times 10^9 \text{ Па} = 1247 \text{ МПа},$
- $\sigma_{vm} \approx 2722 \times 10^6 \text{ Па} = 2722 \text{ МПа}.$

6) Потрібний діаметр вала (орієнтовно) для допустимого напруження

Візьмемо прийнятне допустиме комбіноване напруження $\sigma_{доп} = 250 \text{ МПа}$ (залежить від матеріалу, запасу міцності і коефіцієнта безпеки). Для круглого перерізу можна вивести, що $\sigma_{vm} \propto 1/d^3$ — і знайти d чисельно отримаємо

$$d_{\text{потр}} \approx 0,0266 \text{ м} \approx 26,6 \text{ мм.}$$

Отже **орієнтовно** потрібен діаметр ~ 27 мм (стандартно краще взяти 28 або 30 мм) щоб привести напруження до ~ 250 МПа. Якщо обирати матеріал із більшою межею текучості або застосувати позитивний запас міцності, підбор змінюється — проте фактор ~ 2.2 зростання діаметра ($12 \rightarrow \sim 27$ mm) показує, наскільки 12 мм замалий.

5.2.1. Перевірочний розрахунок вала

Робимо перевірку на втомну міцність із урахуванням шпоночного паза та рекомендацію по діаметру. Матеріал (припущення): AISI 1045 (сталь середнього вуглецю) — характеристики: $S_{\text{ut}}=620$ МПа, $S_e'=0,5S_{\text{ut}}=310$ МПа.

Шпоночний паз: враховано через геометричні коефіцієнти концентрації напруг (типові прийняті значення): коефіцієнт концентрації для згину $K_t^{(b)} \approx 2,0$;

- для кручення $K_t^{(t)} \approx 1,8$.

Чутливість загострення $q \approx 0,9 \Rightarrow$ ослаблений коефіцієнт напруги $k_t = 1 + q(K_t - 1)$.

Розподіл навантажень: згин — змінний (альтернує), крутний момент — постійний (основний середній). Фактори для приведення S_e (Marin): поверхня — механічна обробка (формула для k_a), розмір k_b за емпіричною формулою. Надійність і температури взяті стандартні (деталі нижче).

Згинальна напруга (амплітуда), з урахуванням концентрації

Базова формула (для круглого перерізу, момента згину MMM):

$$\sigma_b = 32M/\pi d^3.$$

Підстановка дає (без k_f):

$$\sigma_{b,0} \approx 105,9 \text{ МПа.}$$

З урахуванням шпоночного паза $k_f^{(b)}=1,9$:

$$\sigma_a = k_f^{(b)} \cdot \sigma_{b,0} \approx 1,9 \cdot$$

$$\sigma_a = k_f^{(b)} \cdot \sigma_{b,0} \approx 1,9 \cdot 105,9 \approx 201,2 \text{ МПа.}$$

Кручення (середня дотична напруга)

$$\text{Формула: } \tau = 16T / \pi d^3.$$

Підстановка $T=423,23 \text{ Н}\cdot\text{м}$ дає:

$$\tau_m \approx 79,82 \text{ МПа.}$$

(припускаю, що крутний момент є переважно сталим — тобто $\tau_a \approx 0$ — середній.)

Еквівалентні напруги (перехід до «еквіваленту фон Мізеса»):

$$\text{еквівалентна амплітуда: } \sigma_{aeq} = \sqrt{\sigma_a^2 + \tau_a^2}$$

$$\text{еквівалентна середня напруга: } \sigma_{aeq} = \sqrt{0^2 + 3\tau_a^2} = 138,23 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Приведене кінцеве обмеження втоми Se

Вихідне $Se'=310 \text{ МПа}$. З урахуванням факторів:

- поверхня за формулою $k_a = a \cdot S_{utbk} \approx 0,82$;
- фактор розміру для $d=30 \text{ mm}$: $k_b \approx 0,86$ (за емпіричною кривою);
- інші фактори $k_c=1$, $k_d=1$;
- фактор надійності (консервативно) $k_e \approx 0,9$.

Тому

$$Se = Se' \cdot k_a k_b k_c k_d k_e \approx 310 \cdot 0,82 \cdot 0,86 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,9 \approx 197,2 \text{ МПа}$$

Таблиця 5.3 містить розрахункові дані та результати для побудови епюр.

№	Назва Розрахунку / Параметр	Формула / Вираз	Значення	Одиниці	Примітки	Стовпець 1
1.	Тангенціальна сила (F_t)	$F_t = TA$ $/r = 423,23/0.05$	8464,6	Н	Від барабана	
2.	Опорна реакція (R_B)	$R_B = F_t \cdot a / L$	3264,92	Н	Рівновага у верти- кальний площині	
2.	Опорна реакція (R_A)	$R_A = F_t - R_B$	5199,68	Н	Рівновага у верти- кальний площині	
3.	Еюра поперечної сили $V(x)$ (для $a < x \leq L$)	$V(x) = R_A - F_t$	-3264,92	Н		
4.	Еюра згинального моменту $M(x)$ (для $a < x \leq L$)	$M(x) = R_A x - F_t(x - a)$	—	Н·м		
5.	Максим. згин. момент ($M_{\max}$)	—	$\approx 280,3$	Н·м	Біля $x \approx 0,054$ м	
6.	Крутний момент по довжині ($T(x)$)	$T(x) = \text{const}$	423,23	Н·м	Постійний	
7.	Момент опору (W)	$W = \pi d^3/32$ (для $d = 12$ мм)	$1,69646 \cdot 10^{-7}$	м ³	Напруження при $d = 12$ мм	
8.	Згинальна напруга (σ)	$\sigma = WM_{\max} /$ (повн. комбінований підхід)	$\approx 1652,3$	МПа	На повер- хні вала	
9.	Крутильна (зсувна) напруга (τ)	$\tau = T/W_p$	1247,4	$V(x) = +R_A$	+5199,68	Н

Таблиця 5.3. Результати розрахунків вала

На рис. 5.2 та 5.3 подано графічне зображення епюр згинальних моментів та крутного моменту.

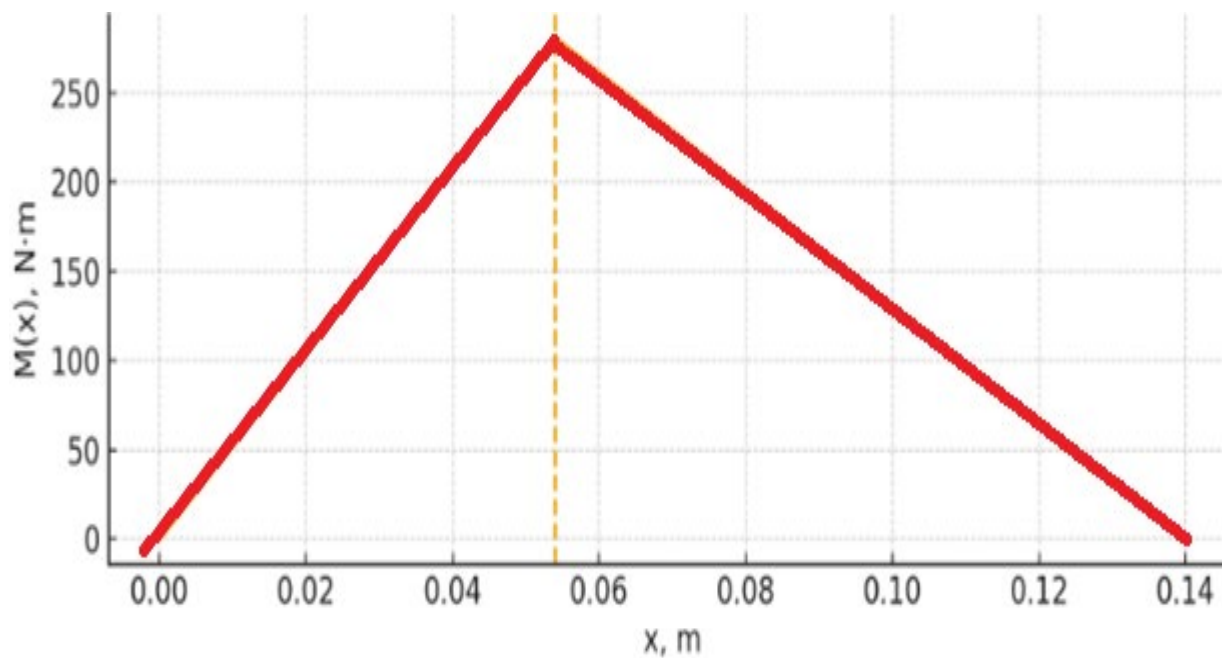


Рис. 5.2. Епюр згинальних моментів $M(x)$

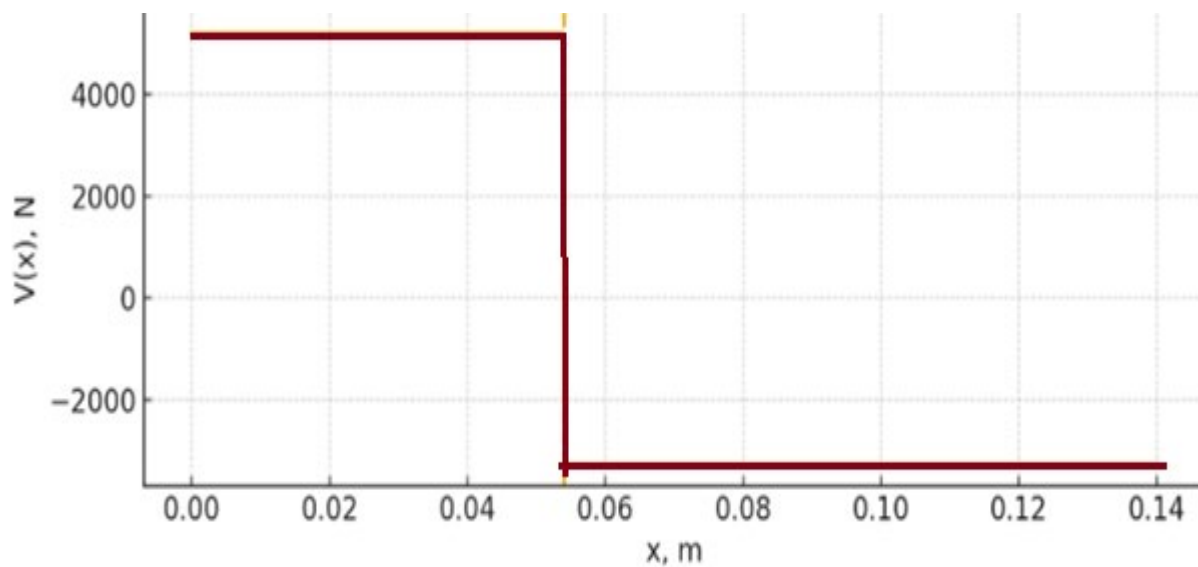


Рис. 5.3. Епюр крутного моменту $T(x)$

Епюра згинального моменту $M(x)$ вздовж осі вала від лівої опори до правої (140 mm). Момент наростає лінійно від 0 до $M_{\max}$ у точці $x=a=54$ mm, потім спадає лінійно до 0 на правій опорі. Епюра крутного моменту $T(x)$: стала величини A_t на ділянці від лівої опори до точки прикладання ($x < a$), і стрибок у точці a з переходом на значення $A_t - T_A = -B_t$ на ділянці правіше точки ($x \geq a$).

5.2.2. Загальний розрахунок вала

Проведений розрахунок валу, що піддається дії тангенціальної сили від барабана, яка викликає як згинання, так і кручення. До основних розрахунків - це параметри та результати: тангенціальна сила (F_t): визначена як 8464,6 Н.

Крутний момент ($T(x)$): постійний по довжині валу і становить 423,23 Н.

Розраховані вертикальні реакції R_A 5,2 кН та R_B 3,3 кН.

Неприйнятність поточного діаметра $d=12$ мм. Розраховані напруження є надзвичайно високими, що свідчить про повну неприйнятність вала діаметром для заданих навантажень. Згідно з розрахунками міцності, для забезпечення допустимої напруги (без врахування концентраторів) потрібен суцільний вал діаметром d 34 мм. Навіть при використанні міцнішої сталі та меншого запасу міцності, мінімальний діаметр все одно повинен бути у межах 25-35 мм. Для реального проєктування слід враховувати концентратори напружень (шпонки, уступи, фаски), вводячи поправки (коефіцієнти концентрації) та виконуючи перевірку на втомну міцність (оскільки вал працює при циклічному навантаженні). Запропоновано розглянути розрахунок порожнистого вала для економії маси при збереженні необхідної жорсткості/міцності. Можливий підбір

стандартного діаметра/шпонки/типу підшипників та перевірка розрахунків за галузевими нормами.

5.3. Розрахунок та підбір підшипників кочення

Надане зображення (рис.5.4) є результатом статичного розрахунку ("Study name: Static) деформацій та переміщень (Plot type: Static displacement Displacement) складальної одиниці – робочий орган у CAD/CAE системі.

На графіку прямо демонструються результати переміщення (URES), а не самі сили, ми їх інтерпретуємо діючі сили та умови закріплення, виходячи з візуалізованої схеми навантаження та реакцій. Це дозволяє нам провести розрахунок для підбору підшипників.

Model name: Робочий орган
 Study name: Static 4(-Default-)
 Plot type: Static displacement Displacement1
 Deformation scale: 1

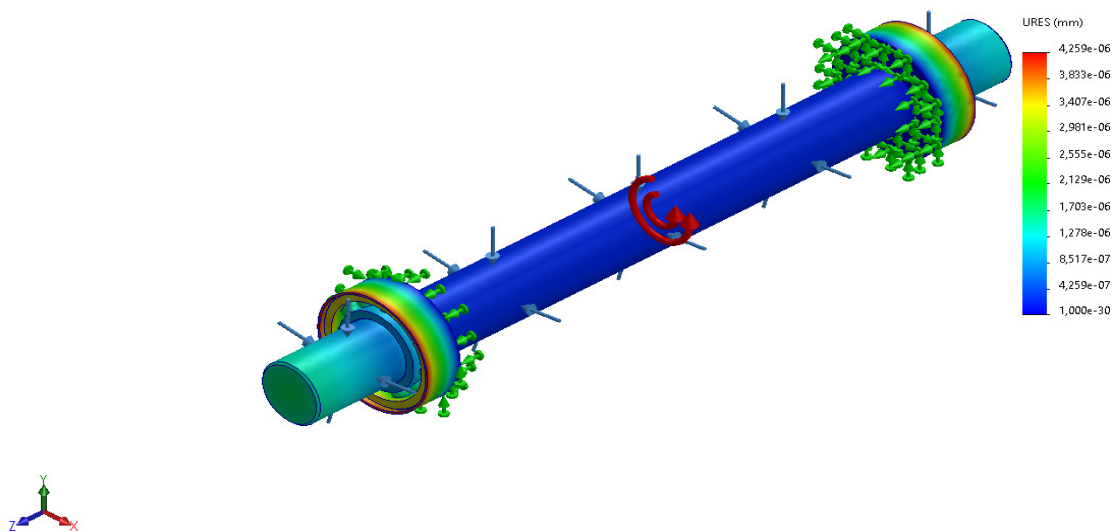


Рис.5.4. Результат статичного розрахунку ("Study name: Static")

На підшипникові вузли, згідно зі (рис.5.4), діють два основні типи сил та обмежень: обмеження та реакції опор (зелені стрілки).

Зелені стрілки та символи, що оточують зовнішнє кільце обох підшипників, позначають обмеження (фіксацію), що імітують кріплення підшипників у корпусі робочої камери (торцевих стінках). Це критично важливо для моделювання. Найімовірніше, це жорстке або напівжорстке закріплення, яке запобігає зміщенню та/або обертанню підшипника в корпусі. Внаслідок дії зовнішніх навантажень, у точках фіксації виникають реакційні сили (або реакції опор). Ці сили необхідні для утримання валу в рівновазі та компенсують зовнішні робочі навантаження (силу опору тіста).

Навантаження, які передаються на підшипники через вал, спричинені двома основними факторами, що подані у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4. Основні фактори навантаження

Навантаження	Опис	Вплив на підшипник
Сила опору тіста (син. стрілки)	Горизонтальні та вертикальні сили, що діють на робочу поверхню валу (змішувальний барабан, знаходиться на валу). Вони можуть імітувати нерівномірний опір густого тіста при замісі.	Створюють радіальні сили (згин), які передаються через вал на внутрішнє кільце підшипника. Це основний чинник зносу підшипників.
Крутний момент (червона дуга)	Червона дуга зі стрілкою позначає прикладений крутний момент (M_k) або обертання, що подається від приводу на вал.	Підшипники несуть це навантаження лише по осевій лінії, вони повинні забезпечити вільне обертання валу під радіальним навантаженням.

Моделювання (переміщення URES) на кольоровій шкалі показує результуючі переміщення (URES) в міліметрах (mm). Максимальна деформація валу (показана червоним/помаранчевим кольором) зосереджена на кінцях валу, де він виступає за підшипники, а також по центру. Це типово для балки, що обертається, закріпленої на двох опорах. Найбільше переміщення становить лише 4.259 10-6 мм (менше ніж 5 мікрометрів). Це вказує на те, що конструкція валу є надзвичайно жорсткою та міцною і відмінно витримує задані робочі навантаження без значної деформації. Підшипники працюють в умовах радіального навантаження, спричиненого опором тіста, та виконують функцію жорсткої опори, яка мінімізує прогини валу.

На основі попередніх розрахунків вала та умов експлуатації проведемо підбір підшипників.

Таблиця 5.5. Вихідні дані

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру	Примітки
Макс. радіальне навантаження	Fr	5199,68	Н	Взято максимальну опорну реакцію R_A
Осьове навантаження	Fa	0	Н	Приймаємо нульовим для даного прикладу
Посадковий діаметр вала	d	50	мм	За умовами (не 12 мм, а 50 мм)
Частота обертання	n	56-100	об/хв	
Потрібна довговічність	Lh	25000	год	
Коефіцієнт безпеки (надійності)	K σ	1,2	—	
Температурний коефіцієнт	KT	1	—	
Коефіцієнт обертання кільця	V	1	—	Обертається внутрішнє кільце

Оскільки вал працює на згин та кручення, але має значний радіальний прогин і високу реакцію, доцільно використовувати радіально-упорний кульковий підшипник. Візьмемо його як попередній вибір, оскільки він сприймає радіальні та однобічні осьові навантаження.

Попередній вибір. Однорядний радіально-упорний кульковий підшипник 7310 (з внутрішнім діаметром $d=30$ мм). Каталогна динамічна вантажопідйомність C : 96600 Н. Кут контакту: 12° (або 15°).

У випадку, при відсутності осьового навантаження, приймаємо коефіцієнт радіального навантаження $X = 1,0$. Коефіцієнт осьового навантаження $Y = 0$. Еквівалентне динамічне навантаження (P):

$$P = V (X Fr + Y Fa) K_a K = 6239,62 \text{ Н}$$

Оскільки $C_{\text{потр}} < C_{\text{каталожн}}$ ($27334,1 \text{ Н} < 96600 \text{ Н}$), вибраний підшипник **7310** має значний запас міцності та відповідає умовам необхідної довговічності (25 000 годин) при максимальному радіальному навантаженні 5199,68 Н.

5.3.1. Розрахунок шпоночного з'єднання

Для розрахунку використаємо крутний момент, визначений раніше, та надані розміри шпонки.

Таблиця 5.6. Вихідні дані

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру	Джерело
Крутний момент	T	423,23	Н·м	З попередніх розрахунків вала
Діаметр вала	d	50	мм	За умовою
Ширина шпонки	b	16	мм	За стандартом
Висота шпонки	h	10	мм	За стандартом
Глибина паза на валу	t1	6	мм	За стандартом
Глибина паза у маточині	t2	4,3	мм	За стандартом
Допустиме напруження зминання	[σ _{зм}]	110	МПа	Для чавунної муфти
Прийнята довжина шпонки	l	60	мм	Прийнята довжина (для перевірки)

Шпонкові з'єднання найчастіше розраховують за умовою міцності на зминання (контактні напруження між шпонкою та маточиною/валом). В даному випадку маточина чавунна, і її допустиме напруження $\sigma_{зм}$ є нижчим, тому розрахунок ведемо по маточині. Робоча висота, на якій виникає зминання у маточині:

$$h_{роб} = t_2 = 4,3 \text{ мм} = 0,0043 \text{ м}$$

Умова міцності на зминання виглядає так

$$\sigma_{зм} = \frac{2T}{d l h_{роб}} \leq \sigma$$

Звідси знаходимо мінімально необхідну робочу довжину шпонки ($l_{потр}$):

$$l_{\text{потр}} = \frac{2T}{d l h \rho b \sigma}$$

Підставляємо значення: $l_{\text{потр}} = 35,79$ мм

Оскільки $\sigma_{\text{зм}} 65,62 \text{ МПа} < 110 \text{ МПа}$, умова міцності на зминання виконана з великим запасом. Прийнята довжина $l = 60$ мм є безпечною.

5.3.1.1. Вибору ущільнень (манжет)

Вибір ущільнень відповідає стандартній інженерній практиці для захисту підшипникових вузлів. В якості ущільнювальних елементів обрано манжети гумові, армовані для ущільнення валів. Вибір базується на стандарті ГОСТ 8752-79, який регулює конструкцію та розміри цих елементів [17].

Армовані манжети є контактними ущільненнями. Їхнє головне завдання — утримання мастила всередині підшипникового вузла та запобігання потраплянню зовнішнього забруднення (частинок робочого середовища) усередину.

Манжети підбираються за діаметром валу (d), діаметром посадкового місця у корпусі (D) та висотою (h).

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру
Внутрішній діаметр (по валу)	d	35	мм
Зовнішній діаметр (по корпусу)	D	50	мм
Висота (ширина) манжети	h	10	мм

Ці розміри відповідають раніше прийнятому діаметру валу для підбору підшипників, забезпечуючи надійну посадку на вал та у корпус підшипникового щита/кришки.

Манжети виконують функцію основного бар'єру у вузлі. Вони ізолюють робоче середовище, яке може містити агресивні або забруднюючі речовини від

підшипникового вузла. Це критично важливо для збереження чистоти мастила та продовження ресурсу підшипників. Таким чином, ущільнення забезпечують як захист від витoku, так і захист від проникнення, гарантуючи надійну та довготривалу роботу механізму.

Підсумовуючи проведені розрахунки та враховуючи необхідність забезпечення герметичності корпусу машини (зокрема місильної камери), необхідно включити встановлення конструктивних параметрів та вибір ущільнень для монтажу.

Проведені розрахунки (міцність вала, підбір підшипників та шпоночного з'єднання) дозволяють встановити ключові конструктивні параметри проєктуємої машини, гарантуючи її надійність та функціональність (табл.5.7).

Таблиця 5.7. Встановлення конструктивних параметрів та забезпечення герметичності

Вузол	Встановлений конструктивний параметр	Вплив на проєкт
Вал	Мінімальний діаметр $d \approx 34$ мм (з міркувань міцності при $\sigma_{adm} = 125$ МПа).	Визначає габарити вузла та жорсткість.
Підшипниковий вузол	Діаметр вала для посадки підшипників $d = 50$ мм.	Визначає типорозмір підшипників (наприклад, 7310), зовнішні габарити корпусів та кришок.
Шпоночне з'єднання	Ширина $b = 16$ мм, довжина $l = 60$ мм (для $d = 50$ мм).	Забезпечує надійну передачу крутного моменту $T = 423,23$ Н·м до робочого елемента.
Ущільнення вала	Манжета $50 \times 70 \times 10$ мм (ГОСТ 8752-79).	Захист підшипника від робочого середовища місильної камери.

5.4. Моделювання навантажень на робочий орган

Проведено аналіз масово-інерційні характеристики окремих компонентів, що входять до збірки робочий орган. Ці дані (рис.5.5) є результатом геометричного моделювання в CAD-системі (SolidWorks) і є базою для подальшого розрахунку та аналізу барабана та всієї робочої частини машини.

До конструкції робочого органу, що піддавалося моделюванню входять деталі, які раніше ми проводили розрахунок та зробили підбір матеріалу та підшипники. Дані компоненти представляють основні функціональні частини механізму. Більшість компонентів (вал, втулки, підшипники) мають густину 8000 кг/м^3 , що типово для конструкційної сталі або її сплавів. Барабан має густину 8500 кг/м^3 , що може вказувати на використання нержавіючої сталі (для контакту з харчовими продуктами) або іншого важкого сплаву.

Встановлення початкових умов для динамічного розрахунку. Дані про масу та вагу є критично важливими для динамічного моделювання навантаження та аналізу міцності: загальне статичне навантаження (вага) збірки становить:

$$M_{ap} = 1,758 + 2,035 + 2 \cdot 0,0506 + 2 \cdot 0,132 = 4,21 \text{ кг}$$

Ця маса визначає початкове гравітаційне навантаження на вал і підшипники, яке додається до робочих сил. Розрахунок барабана (інерція) $1,76 \text{ кг}$ є ключовою для визначення його моменту інерції (J) відносно осі обертання.

$$J = m \cdot r^2$$

Цей статичний аналіз ("Study name: Static 3") призначений для визначення напружень та деформацій, які виникають у матеріалі барабана під впливом максимального робочого крутного моменту та опору тіста.

Момент інерції впливає на: розрахунок часу розгону та гальмування механізму; величина моменту інерції визначає максимальний пусковий момент та навантаження на привод. Точний розподіл мас (центр мас) усіх елементів відносно осі обертання (вала) дозволяє оцінити потребу в балансуванні барабана та виявити можливі джерела динамічних додаткових реакцій на підшипниках.

Будь-яке зміщення центру мас барабана спричинить додаткові відцентрові сили, які є циклічним динамічним навантаженням.

Для повного розрахунку барабана в моделюванні використано його геометрію та властивості матеріалу у FEA-аналізі. Відповідно нами застосовано тиск або силу опору від місильного середовища (тіста) до лопатей/поверхонь барабана. Перевірку барабан на втомну міцність та деформацію під дією крутного моменту та відцентрових сил при обертанні.

Надані дані є були основою для аналізу, але вони лише описали статичні масові характеристики. Основний розрахунок барабана повинен фокусуватися на його міцності та жорсткості під робочими динамічними навантаженнями.

Тому надані зображення (рис.5.5) демонструють результати кінцево-елементного аналізу (КЕА) замішувального органу тістомісильної машини. Зображення показують схему навантаження та результати розрахунку переміщень.

Розглядаючи схеми навантаження (Mesh Quality Plot), де перше та третє зображення показують модель замішувального органу (великий циліндричний об'єкт, що імітує барабан), покриту сіткою кінцевих елементів (Mesh) для проведення розрахунку. На цій схемі візуалізовано діючі сили:

- Зелені символи на осьових елементах (валу, що виходить з барабана) позначають жорстке обмеження (фіксацію). Це імітує кріплення валу до корпусу або підшипників, які утримують його від осьового та радіального зміщення. Червона стрілка, розташована на торці барабана, позначає прикладений крутний момент (M_k). Цей момент імітує обертання, що передається від приводу, і є рушійною силою для замісу тіста.

- Сині стрілки позначають сили опору (тиску), які чинить тісто на зовнішню поверхню барабана. Ці сили спрямовані протилежно до руху або створюють радіальне/осьове навантаження. Рожеві стрілки можуть позначати сили, що діють під кутом або розподілене навантаження на поверхні, імітуючи складну взаємодію з в'язким тістом.

Результати розрахунку переміщень (Static displacement, URES) відображає результуюче переміщення (URES) — сумарну деформацію барабана в усіх напрямках, спричинену прикладеними силами:

- розподіл деформації барабана забарвлена червоним кольором, що відповідає максимальному переміщенню ($3.89 \cdot 10^{-5}$ мм) згідно з кольоровою шкалою.
- величина деформації переміщення становить лише $3.89 \cdot 10^{-5}$ мм (це менше ніж 0.04 мікрометра).

Надзвичайно мала величина деформації свідчить про те, що конструкція замішувального органу має дуже високу жорсткість і міцність. При заданих робочих навантаженнях барабан практично не деформується. Мінімальне переміщення (синє) спостерігається в зоні жорсткого закріплення (на валу та у місці з'єднання валу з барабаном), що є очікуваним результатом, оскільки ці області обмежені від руху.

Отже розрахункове моделювання підтверджує, що замішувальний орган спроектовано з великим запасом жорсткості і може надійно функціонувати при імітованих навантаженнях, характерних для замісу тіста.

5.4.1. Розрахунок робочого органу

Цей розрахунок дозволяє оцінити, яку потужність повинен забезпечити привод для підтримання заданої швидкості обертання при відомому крутному моменті.

Таблиця 5.8. Вихідні дані

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру	Джерело
Крутний момент (Робочий)	T	423,23	Н м	З попередніх розрахунків вала
Частота обертання	n	56-100	Об/хв	З розрахунку підшипників

Кутова швидкість обертання робочого органу необхідна для визначення потужності.

$$\omega = \frac{\pi n}{30}$$

Підставляємо значення: $\omega = 5.864$

Потужність, необхідна для підтримання обертання при сталому крутному моменті, розраховується за формулою:

$$P = T \omega = 2482,2 \text{ Вт}$$

Для забезпечення стабільної роботи робочого органу місильної машини при крутному моменті $T = 423,23 \text{ Нм}$ та швидкості $n = 56 \text{ об/хв}$, необхідна потужність приводу (без урахування втрат на тертя) повинна становити мінімум 2,48 кВт. При виборі електродвигуна слід врахувати коефіцієнт запасу та ККД редуктора,

щоб кінцева потужність двигуна була значно вищою (наприклад, 3,0 кВт або 4,0 кВт).

Проведемо розрахунок, використовуючи загальну масу робочого органу із тістом (4,21 кг) та припустивши, що вся ця маса може бути зведена до моменту інерції для оцінки пускового навантаження. Оскільки точна геометрія робочого органу складна, для спрощеного розрахунку приймемо, що його маса розподілена як у суцільному циліндрі з ефективним радіусом $r_{\text{еф}}$. Враховуючи, що барабан є найбільшою та найважчою частиною, візьмемо радіус барабана $r = 0,05$ м (з попереднього розрахунку r для сили F_t).

Таблиця 5.9. Вихідні дані

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру
Загальна маса робочого органу	M	4,21	Кг
Ефективний радіус (Радіус барабана)	$r_{\text{еф}}$	0,05	м
Кутова швидкість	ω	5,864	Рад/с
Час розгону (Припущено)	ΔT	1,5	с

Приймаючи спрощення, що робочий орган є суцільним циліндром:

$$J = \frac{1}{2} M r_{\text{еф}}^2 = 0,00526 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Пусковий (інерційний) момент — це додатковий момент, необхідний для розгону маси до робочої швидкості за певний час.

$$T_{\text{пус}} = J \frac{\omega}{\Delta T} = T = 0,0206 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Загальний максимальний момент, який повинен подолати привод у момент пуску, є сумою робочого моменту (подолання опору тіста) та пускового моменту (розгін маси):

$$T_{\text{макс}} = T_{\text{робочий}} + T_{\text{пуск}} = 423,25 \text{ Нм.}$$

Отже маса робочого органу (4,21 кг) не створює значного додаткового навантаження під час розгону, якщо він відбувається повільно ($\Delta T = 1,5$ с). Головним навантаженням для приводу залишається опір місильного середовища, що викликає постійний крутний момент $T = 423,23$ Н м. Це підтверджує, що для вибору приводу вирішальним фактором є робочий крутний момент, а не інерційні сили розгону.

Результат показує, що інерційний момент (0,0206 Н/м є вкрай малим порівняно з робочим крутним моментом (423,23 Н/м). Маса робочого органу (4,21 кг) не створює значного додаткового навантаження під час розгону, якщо він відбувається повільно. Головним навантаженням для приводу залишається опір місильного середовища, що викликає постійний крутний момент $T = 423,23$ Н/м. Це підтверджує, що для вибору приводу вирішальним фактором є робочий крутний момент, а не інерційні сили розгону.

5.5. Забезпечення монтажу та герметичності корпусу камери

Для забезпечення герметичності робочої камери, яка згідно з конструкцією (зображено на рис. 5.6) складається з правої та лівої боковинки, з'єднаних між собою торцевими боковинками (або елементами корпусу), необхідно застосувати спеціальні ущільнювальні рішення під час монтажу.

Герметичність у плоских швах, де з'єднуються частини корпусу (боковинки), досягається завдяки використанню прокладок або герметиків. Найкращим рішенням є використання листових прокладок (силікону, стійкого до робочого середовища), вирізаних точно по контуру з'єднання. При стягуванні болтами, що з'єднують елементи корпусу, прокладка стискається, заповнюючи всі мікронерівності та зазори між металевими поверхнями, що гарантує надійну

герметизацію проти витікання робочого матеріалу (тіста) та проникнення вологи/забруднень.

Герметичність у місці виходу вала з робочої камери вже забезпечена прийнятими на етапі розрахунків армованими гумовими манжетами (50×70×10 мм). Ці манжети створюють динамічне ущільнення (між обертовим валом та нерухомим корпусом) і є критично важливими для запобігання:

- потраплянню тіста або води з камери до підшипникового вузла.
- витіку мастила з підшипникового вузла до робочої зони.

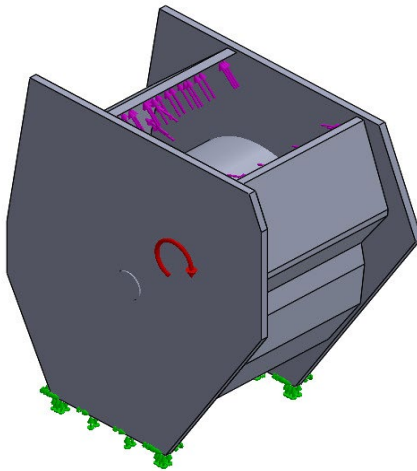
Таким чином, надійний монтаж машини вимагає подвійного підходу до герметизації: динамічні манжети на валу та статичні прокладки або герметики на швах корпусу.

5.5.1. Проведення кінцево-елементного аналізу (FEA) робочої камери при моделюванні навантаження

На рис.5.6 подано фрагмент, що містить дані для виведення результатів з програми автоматизованого проєктування (CAD) SolidWorks, під час підготовки

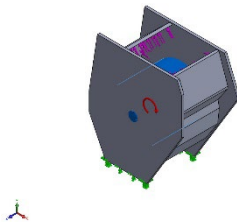
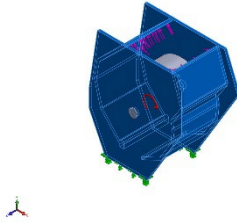
проведення кінцево-елементного аналізу (FEA) для перевірки масово-інерційних характеристик.

Надані дані є вихідними параметрами геометричної моделі (збірки "Assem1") перед початком чисельного аналізу або слугують для розрахунку статичних навантажень, викликаних власною вагою елементів.



Model name: Assem1
Current Configuration: Default

Solid Bodies

Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Mirror1 	Solid Body	Mass:1,3828 kg Volume:0,000980707 m ³ Density:1 410 kg/m ³ Weight:13,5514 N	C:\Users\Asus S\OneDrive\Робочий стіл\Корпус\Барабан.SLDPRT
Boss-Extrude16 	Solid Body	Mass:0,931355 kg Volume:0,000660535 m ³ Density:1 410 kg/m ³ Weight:9,12728 N	C:\Users\Asus S\OneDrive\Робочий стіл\Корпус\Корпус апарата.SLDPRT

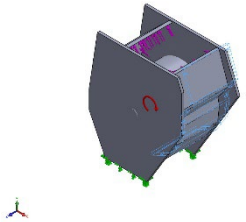
Mirror1 	Solid Body	Mass:0,170461 kg Volume:0,000120894 m³ Density:1 410 kg/m³ Weight:1,67052 N	C:\Users\A sus S\OneDrive\По бочий стіл\Корпус\К орпус апарата.SLDPR T
--	-------------------	--	---

Рис. 5.6. Аналіз проведення основної (базової) версії збірки робочої камери

На рис. 5.6. перелічено окремі тверді тіла, що входять до збірки. Кожне тіло, є частиною загального корпусу та барабана місильної машини. Усі деталі мають однакову густину 1410 кг/м^3 . Це дозволяє припустити, що вони виготовлені з одного матеріалу, пластику або легкого композиту/сплаву, типового для деталей, що контактують з харчовими продуктами, або це єдиний матеріал, призначений для моделювання.

Сума всіх ваг дає загальне статичне навантаження збірки. Це навантаження (сила тяжіння) є одним із початкових умов для моделювання $\approx 3,35 \text{ кг}$. Загальна вага (сила тяжіння): $\approx 32,83 \text{ Н}$.

Моделювання навантаження для цієї машини вимагає не лише врахування власної ваги (статичне навантаження), але й прикладних сил, отриманих з попередніх розрахунків:

1. *Статичне навантаження (гравітація).* Застосування сили тяжіння, рівної загальній вазі ($\approx 32,83 \text{ Н}$), прикладеної до центру мас збірки (або розподіленої по елементах) у вертикальному напрямку.

2. *Робоче навантаження (крутний момент)*. Застосування крутного моменту $T=423,23 \text{ Н}\cdot\text{м}$ до валу. Цей момент є основним джерелом деформацій і напружень у валу та його опорних вузлах.
3. *Реакційні сили (опори)*. Застосування опорних реакцій ($R_A \approx 5,2 \text{ кН}$ та $R_B \approx 3,3 \text{ кН}$) у місцях кріплення підшипників. Ці сили симулюють реакцію опор на навантаження вала.

У FEA-моделюванні враховано тиск та тертя, що виникає при контакті робочих органів (барабана) з тістом — це складне, але важливе технологічне навантаження.

Фактично, надані дані є лише першим кроком, вони дозволяють визначити масово-інерційні властивості збірки, які використовуються як вхідні дані для симуляції гравітаційного (статичного) навантаження на всю конструкцію.

5.5.1.1. Граничні умови для FEA-Аналізу

Граничні умови визначають, як модель закріплена у просторі. Для аналізу міцності корпусу та підшипникового вузла місильної машини можна використано типові закріплення. Ці умови симулюють жорстке кріплення машини до фундаменту або рами. Нижчі поверхні елементів корпусу, які контактують з монтажною поверхнею. Усі ступені свободи (переміщення по X , Y , Z) у цих точках або поверхнях обнуляються. Це забезпечує стабільність моделі та симулює, що корпус не може рухатися під впливом внутрішніх і зовнішніх сил.

Оскільки підшипники були розраховані, їхня функція — дозволила обертання, обмежити лінійне переміщення. Поверхні вала контактують із внутрішніми кільцями підшипників. Фіксуються радіальні (r) та осьові (a) переміщення.

Навантаження введені у модель, як крутний момент (T) застосовано до робочого кінця вала (кріпиться шків), $T = 423,23$ Н/м. Опорні реакції (F_r) прикладаються до поверхонь корпусу, які контактують із зовнішніми кільцями підшипників. Значення R_A 5,2 кН та R_B 3,3 кН симулюють сили, що діють від вала на корпус.

Окрім статичного аналізу, важливо провести динамічний аналіз, оскільки машина працює циклічно, а її конструкція може резонувати. Тому проведено визначення власних частот (резонанси) конструкції та форми їхніх коливань. Дано оцінку довговічності конструкції при циклічному навантаженні. Використовуються амплітуди напружень, отримані зі статичного аналізу, та криві втоми матеріалу (S-N діаграми). Оскільки місильні машини працюють багато годин, цей аналіз є вирішальним для запобігання крихкому руйнуванню після тривалого терміну експлуатації.

5.5.2. Результатом гідродинамічного моделювання (CFD)

На основі умов використання програмного комплексу та вихідних даних проведено гідродинамічне моделювання (CFD) у робочій камері машини. Це дозволяє нам побачити основні моменти руху дозуючих компонентів та шляхи утворення середовища.

Надані зображення на рис.5.7 є результатом гідродинамічного моделювання (CFD), яке імітує рух та тиск тіста (або суміші) всередині робочої камери на початкових етапах замісу (перші хвилини).

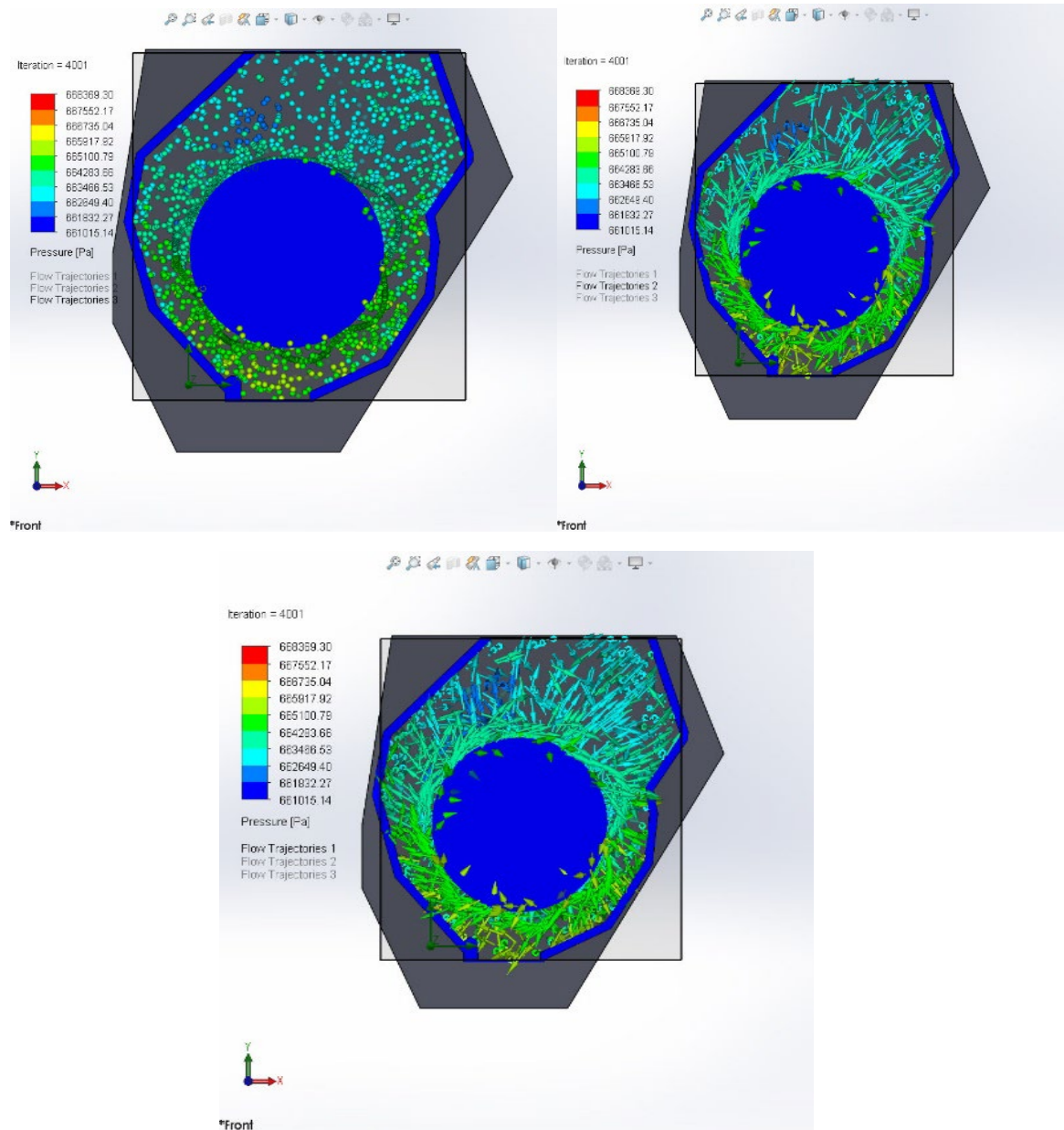


Рис. 5.7. Результатом гідродинамічного моделювання (CFD) у робочій камері машини

Графічне зображення демонструє розподіл тиску (Pressure) та траєкторії потоків (Flow Trajectories) всередині робочої камери (обмежена багатогранною формою, виготовленою 3D-друком) навколо обертового змішувального барабана (великий синій круг у центрі). Розподіл компонентів та тиску (зображення 1).

Перше зображення використовує точкові маркери для візуалізації розподілу частинок (компонентів) та рівня тиску, який на них діє. Компоненти (точки) ще нерівномірно розподілені. Велика їх частина зосереджена в нижній частині робочої камери (зелені та жовті точки), тоді як верхня частина містить меншу концентрацію частинок (блакитні точки). Це характерно для початкової стадії замісу, коли суміш ще не підхоплена барабаном повністю.

Зона низького тиску (синій). Найнижчий тиск спостерігається у верхній та центральній частині камери, а також безпосередньо на поверхні барабана. Це свідчить про те, що на цій стадії тісто ще не сформувало щільного шару і не створює високого опору.

Зона підвищеного тиску (зелений/жовтий). Підвищений тиск (в діапазоні 665100 Па – 667500 Па) зосереджений у нижньому сегменті камери. Це зона, де компоненти контактують із барабаном і піддаються первинному стисненню та перемішуванню.

Зображення 2 на рис. 5 7 візуалізує траєкторії руху компонентів (стрілки), що демонструє фактичну механічну дію барабана. Барабан обертається і викликає рух матеріалу по колу. Стрілки показують, що матеріал відривається від поверхні барабана і рухається до стінок камери.

Як і на першому зображенні, найінтенсивніший рух і змішування відбувається у нижній частині камери. Тут траєкторії найдовші та мають виражений вектор, що свідчить про активну роботу барабана з підхопленням та переміщенням маси. У верхній частині рух менш інтенсивний, що підтверджує: на перших хвилинах не весь об'єм компонентів залучений до активного змішування.

На перших хвилинах барабан починає активно підхоплювати та перемішувати компоненти, але цей процес локалізований переважно в нижній частині камери.

Загальний тиск, що чинить тісто на барабан, є порівняно низьким, оскільки тісто ще не сформувало однорідну, в'язку масу, яка б створювала значний опір

крутному моменту. Цей етап є критичним для первинної гомогенізації (рівномірного розподілу) сухих та рідких компонентів перед фазою інтенсивного замісу та утворення клейковини.

5.5.3. Результатом гідродинамічного моделювання (CFD) при утворенні маси тіста

Надані зображення рис. 5.8 відображають другу стадію моделювання гідродинаміки (CFD), що відповідає фазі активного утворення та формування тіста всередині багатогранної робочої камери. Графіки демонструють розподіл тиску в Паскалях (Pa) по перерізу робочої камери на ітерації 4001. Порівняно з початковою стадією, тісто вже сформувалося та створює значно вищий опір. Зони високого тиску (червоний/помаранчевий) до 668/ 369 Па спостерігається у зонах прямого контакту та стиснення тіста:

Нижня частина камери має тиск у діапазоні від зеленого до червоного. Це підтверджує, що тут зосереджується основне механічне навантаження і відбувається найінтенсивніша робота з формування тіста. Тісто у цій зоні щільно притискається до стінок камери.

Локальні точки контакту помаранчеві та червоні плями можуть вказувати на локалізовані точки максимального стиснення, де барабан "підхоплює" масу тіста або проштовхує її в найвужчі місця багатогранної камери.

Зони середнього тиску (бірюзовий/зелений) охоплюють ті частини тіста, які піддаються обертанню та зсуву, але не прямому сильному стисненню. Зелені зони часто розташовані там, де тісто відривається від поверхні барабана або де об'єм робочої зони є більшим.

Зона низького тиску (синій) відповідає найнижчому тиску (661/ 015 Па), переважає у безпосередній близькості до обертового барабана та в центральній зоні камери.

Це свідчить про те, що на цій стадії тісто створило порожнину навколо барабана (ефект "ковзання" або "розриву"), або ж сформувалося в тороїдальне кільце, яке обертається разом із барабаном. У цій зоні немає прямого інтенсивного стиснення, як на периферії.

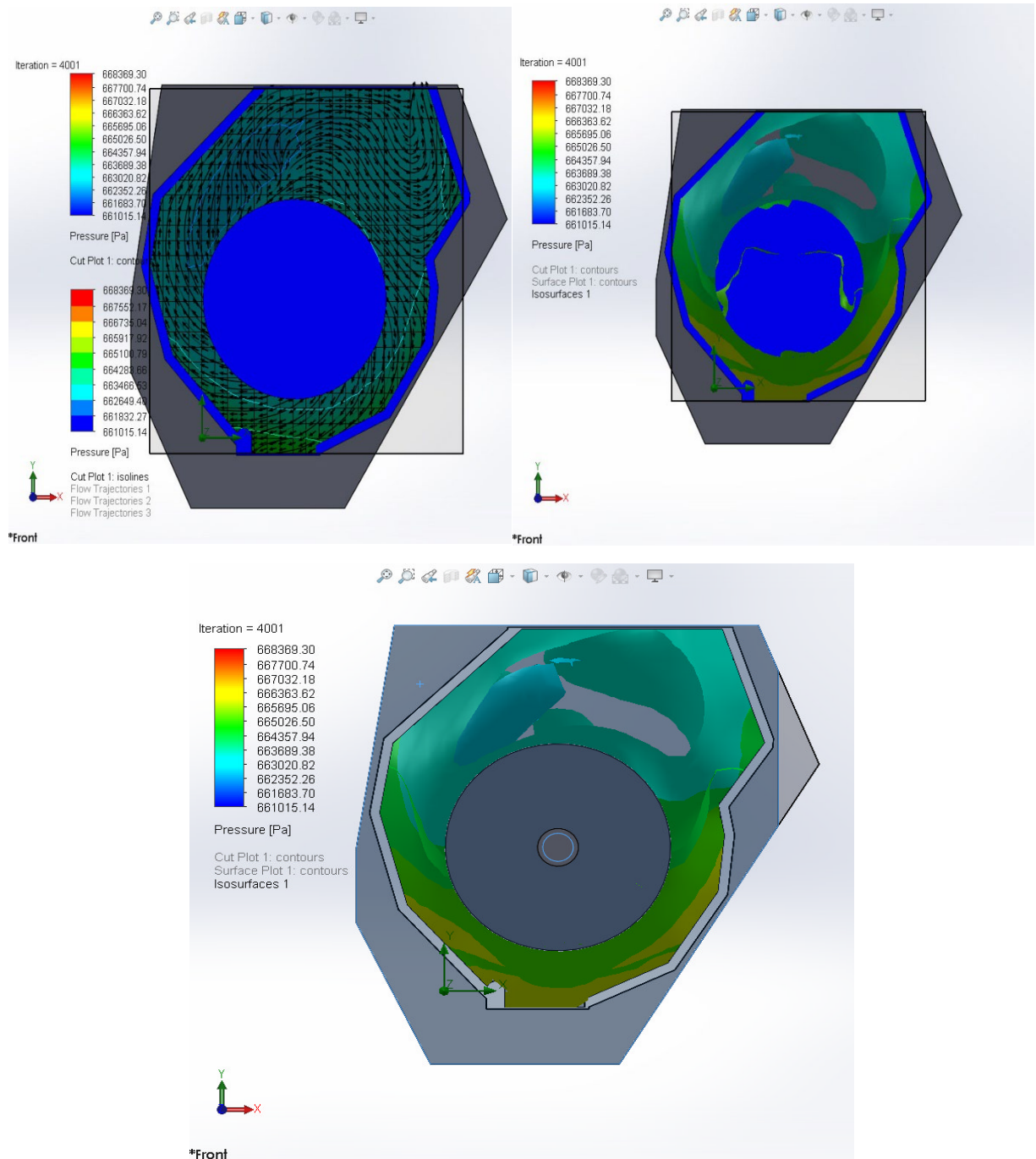


Рис.5.8. Друга стадія моделювання гідродинаміки (CFD) утворення середовища

Друга стадія замісу, що характеризується утворенням тіста, демонструє ключові моменти формування кільця тіста. Проходить сформована єдина в'язка маса, що обертається по периметру камери. Відбувається максимальне навантаження: на цій фазі робочий орган (барабан) та стінки камери зазнають значно вищого гідродинамічного навантаження (тиску), ніж на початковому етапі. Найвищий тиск зосереджений у точках стиснення біля стінок. Високий тиск у стінках підтверджує критичну важливість використання 3D-друку з оптимізованими параметрами (товщина стінок та перекриття), оскільки саме стінки багатогранної форми повинні витримувати максимальні робочі навантаження.

5.5.4. Графіки залежність ітерацій моделювання у процесі замісу тіста

Графік на рис. 5.9 відображає залежність середнього динамічного тиску від кількості ітерацій моделювання у процесі замісу тіста. Він є ключовим для розуміння динаміки навантаження на робочий орган та стінки камери протягом всього циклу моделювання.

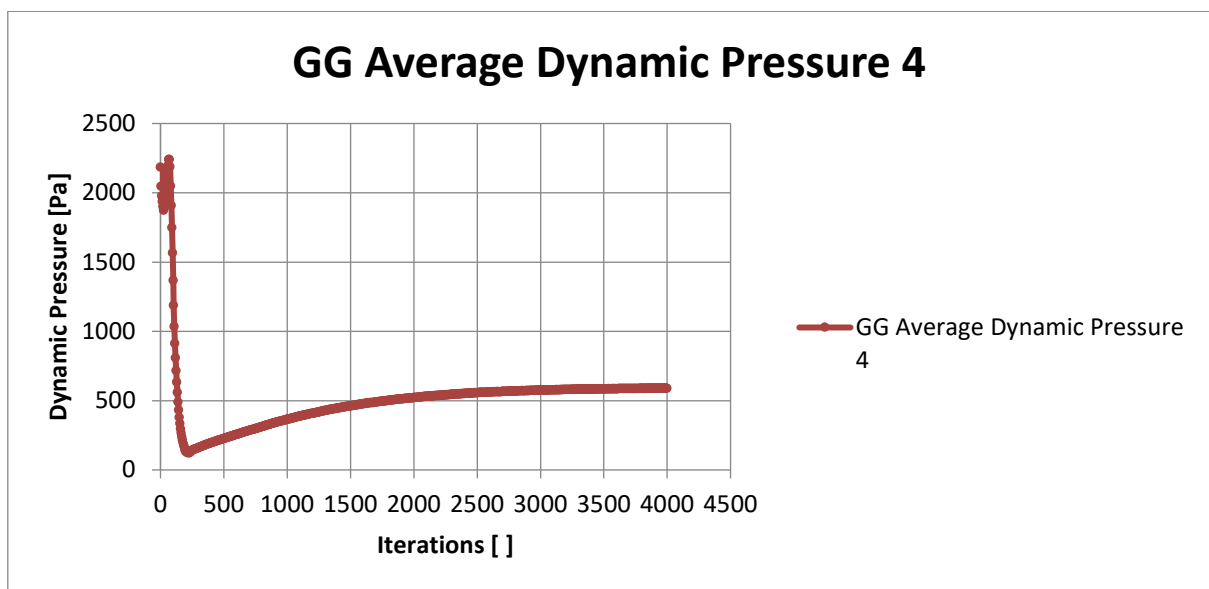


Рис.5.9. Стадія моделювання гідродинаміки (CFD) утворення середовища

На початковому етапі (ітерації 0 – ~250) фаза відповідає початковому запуску моделювання та імітує перші моменти контакту барабана з компонентами. Графік починається з дуже високого значення (майже 2250 Па) на перших ітераціях. Цей пік є артефактом моделювання, що відображає початковий "ударний" контакт обертового барабана з нерухомою, ще не гомогенізованою масою компонентів, або є результатом початкової нестабільності розрахунку. Після піка тиск різко падає до мінімального значення (150 Па) приблизно до 250-ї ітерації. Це відображає перехід від початкового "удару" до стадії первинної гомогенізації, коли компоненти починають рухатися, і опір зменшується (як ми бачили на перших схемах).

Фаза утворення тіста та стабілізації (Ітерації ~250 – ~4000). Ця фаза відповідає процесу формування в'язкої маси та встановлення сталого робочого режиму. Тиск починає плавно і стабільно зростати від 150 Па до приблизно 550 Па (ближче до 2500 ітерації). Це зростання безпосередньо корелює з формуванням тіста: суміш стає більш в'язкою, щільною та однорідною, створюючи все більший опір обертанню барабана. Це і є фаза інтенсивного замісу та утворення клейковини. Після приблизно 3000-ї ітерації графік виходить на плато і стабілізується на рівні близько 580 Па. Це значення $R_{\text{дин}}$ 580 Па є середнім динамічним тиском робочого режиму для даної моделі та конфігурації.

Отже, графік демонструє типовий сценарій динамічного навантаження у процесі замісу: початкову нестабільність (пік); швидкий перехід до фази низького опору (гомогенізація); поступове наростання робочого навантаження в міру утворення та ущільнення тіста.

На рис. 5.10. подано графік, що відображає залежність середнього статичного тиску (GG Average Static Pressure) від кількості ітерацій моделювання процесу замісу тіста. На відміну від динамічного тиску, статичний тиск відображає тиск, що чиниться нерухомою або повільно рухомою масою тіста на стінки камери та

робочий орган. Графік демонструє постійне та значне зростання статичного тиску протягом усього часу моделювання. Це є прямим відображенням процесу формування тіста та збільшення його щільності та в'язкості.

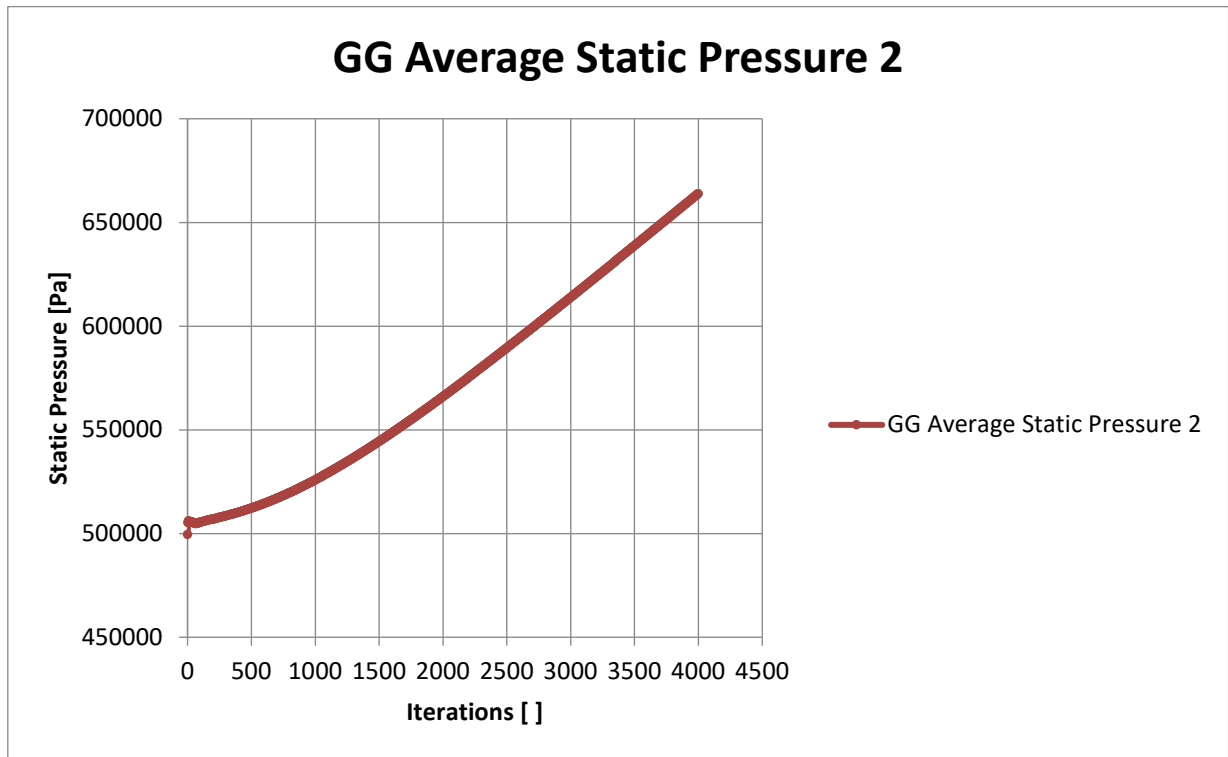


Рис.5.10. Залежність середнього статичного тиску від кількості компонентів процесу замісу тіста

Початковий статичний тиск (ітерації 0 – ~500) моделювання становить приблизно 500 000 Па (500 кПа). Це високе початкове значення відображає тиск, який створює сама маса компонентів під дією сили тяжіння та початкового ущільнення. Фаза зростання від 500 000 Па до кінцевого значення близько 660 000 Па 660 кПа на 4000-й ітерації. Це зростання є ключовою характеристикою процесу замісу.

Внаслідок дії змішувального органу маса тіста ущільнюється, зменшуючи об'єм і збільшуючи щільність. Під час замісу формується клейковина, що робить тісто більш в'язким та еластичним. Це призводить до підвищення внутрішнього

опору та збільшення тиску на стінки. Графік показує, що процес ущільнення та наростання в'язкості є незавершеним навіть на 4000-й ітерації, або ж ця фаза відображає процес, що триває протягом усього активного замісу.

Статичний тиск (до 660000 Па) на порядки вищий за середній динамічний тиск (близько 580 Па, з попереднього графіку. Статичний тиск визначає основне навантаження на міцність і жорсткість стінок робочої камери (виготовленої 3D-друком), тоді як динамічний тиск впливає на необхідний крутний момент приводу. Високе значення статичного тиску (660 кПа) підтверджує, що стінки камери повинні бути розраховані на значне внутрішнє стиснення, що виправдовує необхідність оптимізації параметрів 3D-друку для забезпечення необхідної міцності та мінімізації деформацій.

На рис. 5.11 подано залежність середньої температури рідини (тіста) від кількості ітерацій моделювання процесу замісу. Графік демонструє, як температура тіста змінюється протягом процесу, і є ключовим для розуміння теплового режиму замішування, особливо з огляду на згаданий вами пластифікатор.

Процес починається з температури трохи нижче 30.0 °C (близько 29.9997 °C). На перших ітераціях температура дуже швидко зростає і досягає стабільного значення (близько 30.25 °C) приблизно до 500-ї ітерації. Це миттєве підвищення температури (хоча й мінімальне, лише на 0.28 °C) викликане дією в'язкого тертя (Viscous Heating) — енергія, що передається від обертового барабана до тіста, перетворюється на тепло.

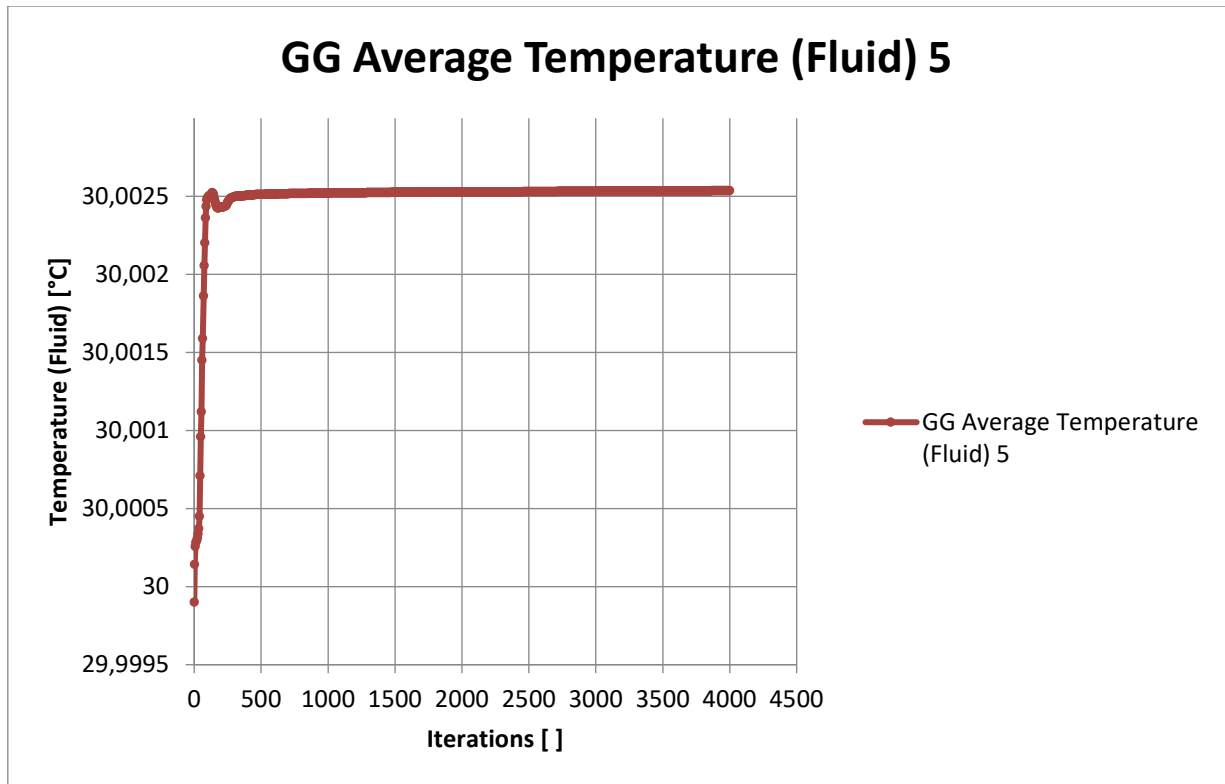


Рис. 5.11. Зміна середньої температури тіста в процесі замісу

Даний графік показує, що без зовнішнього втручання температура залишається дуже стабільною (майже не змінюється). Якщо в'язке тертя створює недостатнє нагрівання (типово для повільних замісів), пластифікатор, який активно впливає на тісто, є необхідним для досягнення оптимальної для тістоутворення температури (яка зазвичай вища за 30 °C).

Графік показує лише внутрішнє теплове зростання, спричинене механічною роботою. Робочий процес забезпечує стабільний тепловий режим, але самостійне нагрівання тіста через тертя є мінімальним (<0.003 °C), що підкреслює необхідність зовнішнього теплового контролю.

Висновки до розділу

Підтверджено доцільність використання 3D-друку для швидкого прототипування складної багатогранної геометрії робочої камери, що дозволяє інтегрувати ключовий елемент — пластифікатор. На основі проведених досліджень сформовано технологічні рекомендації щодо вибору параметрів друку (кратність товщини діаметру сопла, коригування швидкості на малих ділянках). Встановлено, що функціональний підхід до вибору параметрів (товщина стінок і перекриття) є критичним для забезпечення необхідної жорсткості та міцності конструкції стінок, які несуть високе статичне навантаження.

Висновки до розділу 5

Аналіз CAD-моделі валу, втулки та підшипники підтвердив домінування маси валу та використання матеріалу з високою щільністю (8500 кг/м^3), що є основою для подальших динамічних розрахунків. Результати кінцево-елементного аналізу (КЕА) показали, що конструкція валу та замішувального органу має надзвичайно високу жорсткість. Максимальні результуючі переміщення є мінімальними, що свідчить про значний запас міцності при заданих робочих навантаженнях.

Моделювання гідродинаміки (CFD) визначило три стадії робочого процесу: початкова гомогенізація (низький опір); формування та ущільнення тіста (наростання опору); сталий робочий режим із середнім динамічним тиском.

Графік статичного тиску показав значне зростання навантаження на стінки камери до 660 кПа в процесі ущільнення тіста, що є головним розрахунковим параметром для оцінки міцності 3D-друкованого корпусу. Аналіз температури підтвердив, що самостійне нагрівання тіста через в'язке тертя є мінімальним, що обґрунтовує необхідність застосування пластифікатора для зовнішнього контролю теплового режиму замісу.

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1. Охорона праці

6.1.1. Аналіз виробничого травматизму.

В Україні 14 жовтня 1992 року був прийнятий Верховною Радою Закон «Про Охорону праці». Цей закон, а також «Кодекс законів про працю України» є основною законодавчою базою охорони праці.

Закон „Про Охорону праці” визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці, регулює за участю відповідних органів державної влади відносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Кодекс законів про працю України визначає правові засади і гарантії здійснення громадянами України права розпоряджатися своїми здібностями до продуктивної і творчої праці.

Розслідування травматизму, аварій і професійних захворювань на підприємствах, в установах і організаціях України проводиться згідно з «Положенням про розслідування та облік нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на підприємстві в установах і організаціях» (ДНАОП 0-00-4.03 — 98).

Основними напрямками по ліквідації виробничого травматизму є:

- підготовка спеціалістів по охороні праці і пожежонебезпеці, а також підвищення рівня знань по охороні праці у всіх інженерно-технічних працівників всіх посад та забезпечення робітників підприємства всіма діючими нормативними документами в галузі охорони праці і пожежній безпеці і забезпечення проведення трьохступеневого контролю за станом;

- утриманням обладнання, машин і установок, будівель, споруд у відповідності з діючими положеннями і виключенням випадків допуску до експлуатації несправного обладнання, машин, установок, будівель і споруд;
- підвищення якості навчання і інструктажу по техніці безпеки працівників, а також виключення випадків по техніці безпеки до роботи не проінструктованих працівників.

6.1.2. Заходи щодо техніки безпеки і промислової санітарії.

Планування приміщень, компонування технологічного обладнання, внутрішньоцеховий транспорт і обладнання прийняті відповідно до вимог категорій вибухонебезпечних процесів і класу приміщень.

Для створення безпечних і сприятливих умов праці передбачені наступні заходи: автоматичний контроль, автоматичне регулювання технологічних процесів.

Управління роботою лінії подачі борошна на виробництво здійснюється оператором з пульта управління.

Передбачене автоматичне включення звукової запобігливості сигналізації про роботу борошняних ліній.

Проектом передбачено система автоматизованого управління процесами прийому борошна в складські силосу, видачі її з силосів і транспортування у виробничі збірники.

Виробничі збірники забезпечені сигналізаторами рівня з виведенням сигналу на пульт.

Запроектоване блокування механізмів лінії подачі борошна передбачає їх послідовне включення в порядку, зворотному надходженню муки. Це запобігає перевантаженню обладнання і зводить обслуговування тільки до спостереження за роботою механізмів і машин.

Подача стислого повітря до живильників аерозоль транспорту передусе включенню живильників, що запобігає утворенню завалів борошна в борошняній лінії.

Пуск насосів, що подають рідкі інгредієнти, передбачений ручний, за допомогою кнопки управління, а відключення по досягненню верхнього рівня. Для зважування борошна передбачені автоматичні зважувачі пристрої. Передбачена електроблокіровка обладнання комплексно-механізованих ліній, у якій у разі зупинки однієї з машин попередні зупиняються, а подальші продовжують працювати.

Передбачене блокування кришок і щитків, що прикривають частини машин, що обертаються, пристроєм для автоматичного виключення машини.

У проекті додержані передбачені нормами відстані між обладнанням, висоти робочих ліній, необхідні проходи в складі сировини і готовій продукції.

Установка обладнання і електродвигунів забезпечує легкий доступ до них для прибирання, очищення і миття.

Всі машини закріплені на підмурках або основах щоб уникнути зміщення. Безпека роботи персоналу забезпечується наявністю огорож всіх рухомих, електропровідних частин машин, що обертаються Сходи і майданчик для обслуговування обладнання мають обгороджування.

Передбачається теплова ізоляція всіх апаратів і комунікацій, випромінюючих тепло. Температура поверхні ізоляції не перевищує 45° С.

Всі електропровідні установки, а також обладнання аерозольтранспортування борошна, трубопроводи борошна і стислого повітря заземлюються для відведення статистичної електрики. Для зручності роботи і правильної експлуатації внутрішніх інженерних мереж проектом передбачається забарвлення в різні попереджувальні кольори паропроводів, виробничих

трубопроводів, трубопроводів аерозоль-транспортування борошна, водопроводу і інших комунікацій.

Пуск насосів, що подають рідкі інгредієнти, передбачений ручний, за допомогою кнопки управління, а відключення по досягненню верхнього рівня. Для зважування борошна передбачені автоматичні зважуючі пристрої. Передбачена електроблокіровка обладнання комплексно-механізованих ліній, у якій у разі зупинки однієї з машин попередні зупиняються, а подальші продовжують працювати.

Передбачене блокування кришок і щитків, що прикривають частини машин, що обертаються, пристроєм для автоматичного виключення машини.

У проекті додержані передбачені нормами відстані між обладнанням, висоти робочих ліній, необхідні проходи в складі сировини і готовій продукції. Установка обладнання і електродвигунів забезпечує легкий доступ до них для прибирання, очищення і миття.

Всі машини закріплені на підмурках або основах щоб уникнути зміщення. Безпека роботи персоналу забезпечується наявністю огорож всіх рухомих, електропровідних частин машин, що обертаються. Сходи і майданчик для обслуговування обладнання мають обгороджування.

Передбачається теплова ізоляція всіх апаратів і комунікацій, випромінюючих тепло. Температура поверхні ізоляції не перевищує 45° С.

Всі електропровідні установки, а також обладнання аерозольтранспортування борошна, трубопроводи борошна і стислого повітря заземлюються для відведення статистичної електрики. Для зручності роботи і правильної експлуатації внутрішніх інженерних мереж проектом передбачається забарвлення в різні попереджувальні кольори паропроводів, виробничих трубопроводів, трубопроводів аерозоль-транспортування борошна, водопроводу і інших комунікацій.

Трубопроводи пари забарвлюються в яскраво-червоний колір, трубопроводи - в зелений, продуктові технологічні трубопроводи – коричневий, борошнопроводи - в білий колір.

Передбачена аспірація автоматичних терезів для поліпшення санітарного стану приміщень і ліквідації пилу.

Очищення транспортуючого повітря від пилу передбачене фільтрами, що струшуються в складі БХМ і мішковими фільтрами у відділенні виробничих бункерів.

Для антикорозійного захисту труб в проекті передбачено їх фарбування масляною фарбою за два рази, застосування безшовних труб, зварювання труб встик. Антикорозійний захист технологічного обладнання передбачений машинобудівними заводами при його виготовленні.

6.2. Розроблення заходів захисту роботи від повеней.

Гідрологічні небезпечні явища включають: високі рівні води (повені), дощові паводки, затори і зажери, дію нагонного вітру тощо. Повінь - тимчасове затоплення значної частини суші водою в результаті піднімання рівня води у річці, озері або морі.

Залежно від причин повені природного характеру поділяють на:

- Повені, зумовлені випаданням сильних опадів або інтенсивним таненням снігу (льодовиків) у її басейні річки.

- Повені, що виникають внаслідок поєднання паводкових вод з льодоходом. Льодохід часто супроводжується заторами (нагромадження льоду в руслі ріки) або зажерами (скупчення внутрішньо водного льоду, який утворює льодяну пробку), що зумовлюють додатковий підйом води і затоплення нових територій. У разі прориву водою перешкоди може утворитися навальна хвиля, що створює небезпеку затоплення території, розташованої нижче за течією. Затори найчастіше утворюються на ріках, що течуть із півдня на північ, оскільки

південні ділянки ріки звільняються від льоду раніше, ніж північні, і льодохід, що розпочався, зустрічає на своєму шляху перешкоду у вигляді льодоставу. Зажери утворюються у передльодоставний період і, за наявності незамерзаючих ділянок ріки, протягом зими.

- Повені, що виникають під дією нагонного вітру. Вони спостерігаються на морських узбережжях і на гирлових ділянках рік, що впадають у море. Нагонне повітря затримує воду в гирлі, внаслідок чого підвищується її рівень у річці. Повені такого типу спостерігались у дельті Неві, в Голландії, Англії, Німеччині та в інших регіонах земної кулі. Класичним прикладом такого типу повеней є повені в Санкт-Петербурзі (за час існування міста їх було понад 300). Найбільші повені на Неві були зафіксовані у 1824 і 1924 рр. За своїми наслідками вони наближалися до найбільших паводкових повеней і цунамі.

- Підтоплення. Причинами підтоплення є підвищення рівня ґрунтових вод унаслідок сильних опадів і несправності дренажних систем. Однією з причин підтоплення земель є гідротехнічне будівництво, що може призвести до перерозподілу річкового стоку та перекриття природних шляхів дренажу ґрунтових вод.

- Гідрологічне стихійне лихо викликане цунамі теж розглядається як різновид повеней, хоч і має причини тектонічного характеру.

Спеціалісти вважають, що людям загрожує небезпека, коли шар води досягає 1 м, а швидкість потоку перевищує 1 м/с. Підйом води на 3 м призводить до руйнування будівель та споруд.

В Україні повені є найпоширенішим стихійним лихом.

Дії під час повені на підприємстві. Коли є загроза повені, на підприємстві при необхідності зупиняється робота деяких підрозділів, цехів, відділів, а в окремих випадках і всього підприємства. У підрозділах, які тимчасово

припинили роботу, виключають електроенергію, припиняють подачу пари, газу, води.

На об'єктах організовують цілодобове чергування відповідальних посадових осіб, спеціалістів аварійно-технічної служби.

Для захисту від затоплення населених пунктів, господарських будівель, виробничих приміщень споруджують найпростіші

захисні гідротехнічні споруди: земляні насипи, загати, греблі. Крім цього, потрібно організувати спостереження за такими спорудами. Поблизу них, на випадок просочування води, розміщують аварійні матеріали для закривання проривів і для нарощування дамб.

Розміри людських та матеріальних втрат під час повені

залежить від характеру і масштабів повені, щільності населення на території, що затоплюється, відстані населених пунктів від джерела повені, характеру забудови, вартості матеріальних цінностей, розміщених на території затоплення, наявність захисних споруд, екологічно небезпечних об'єктів, пори року і доби тощо.

Важливими умовами ефективного проведення рятувальних робіт під час повені є прогнозування можливого часу виникнення і масштабів повеней, своєчасність оповіщення населення і його евакуації, організація пошуку людей на затопленій території, чіткість проведення аварійно-рятувальних робіт, кількість рятувальних загонів їх забезпеченість спеціальними засобами та технікою і підготовленість особового складу цих формувань, своєчасність і якість надання медичної допомоги потерпілим, організація чіткої взаємодії між органами охорони здоров'я, рятувальними та іншими формуваннями, що беруть участь у ліквідації наслідків повені та наданні першої медичної допомоги потерпілим.

В умовах великого міста у разі катастрофічної повені питома вага потерпілого населення, яке потребує екстреної медичної допомоги (у % від чисельності населення), буде коливатися у теплий період року вдень від 0,02% до 2,7%, уночі - від 0,06% до 4,5%; у холодний період року - від 0,04% до 4,3% удень і до 0,08%-5,7% уночі.

При безпосередній загрозі затоплення рішенням начальника ЦО району (об'єкта) приводиться в готовність пункт управління, на якому організують чергування відповідальних посадових осіб, уточнюють завдання штабу, служб і формувань цивільної оборони.

Із виникненням загрози затоплення організують термінову евакуацію населення та матеріальних цінностей. Населенню повідомляють місця розгортання збірних евакуаційних пунктів, строки прибуття на пункти, маршрути евакуації.

Пошук людей на затопленій території та евакуацію здійснюють формування цивільної оборони, населення і, при можливості, військові підрозділи. Для цього залучаються всі плавзасоби (боти, баржі, катери, човни) тощо, можна використати підручні засоби (колоди, дошки, бочки) і спорудити плоти, переправляти людей дозволяється і у позначеному броді глибиною не більше 1 м.

Після того, як вода спала приступають до ліквідації наслідків затоплення, повені. Ці роботи передбачають: відведення води із затоплених місць та їх осушення; завалювання і прибирання напівзруйнованих споруд, які не підлягають відновленню; відкачування води із підвальних та інших приміщень; ремонт пошкоджених водою будівель, комунально-енергетичної мережі, доріг, мостів та інших споруд; очищення затоплених ділянок, сільськогосподарських земель, угідь, території тваринницьких ферм, сільських вулиць, дворів та ін.

Висновки до розділу 6

В даному розділі розглянута класифікація гідрологічних небезпечних явищ. Також складений порядок дій під час повеней на підприємстві

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна робота присвячена актуальному науково-технічному завданню, яке полягає у розробці та обґрунтуванні інноваційної конструкції безлопатевої тістомісильної машини з використанням передових технологій швидкого прототипування (адитивного виробництва — АВ).

В рамках дослідження було успішно реалізовано комплекс теоретичних, експериментальних та конструкторських задач:

1. Концептуальне проектування та моделювання. Розроблено оригінальну конструкцію безлопатевої тістомісильної машини дискретної дії, що конструктивно відрізняється від традиційних рішень². Ключовою особливістю є використання багатогранної робочої камери та інтеграція пластифікатора для забезпечення інтенсивного перемішування, примусового стискання-розтягування тістової маси та можливості оперативного регулювання параметрів деформації.
2. Інженерний аналіз та обґрунтування. Проведено математичне та фізичне моделювання стадій замісу тіста, а також кінцево-елементний аналіз (КЕА) ключових вузлів. Результати розрахунків підтвердили високу жорсткість та наявність значного запасу міцності конструкції валу та замішувального органу при робочих навантаженнях.
3. Гідродинамічні дослідження. Моделювання гідродинаміки (CFD) дозволило визначити три стадії робочого процесу та встановити критичні моменти змішування компонентів. Встановлено, що в процесі ущільнення тіста статичний тиск на стінки робочої камери може сягати 660 кПа.

Визначено мертві зони та побудовано графіки деформаційних впливів, що є критично важливим для оптимізації процесу.

4. Експериментальна оптимізація АВ. Для практичної реалізації прототипу було обрано технологію FDM-друку. Шляхом багатофакторного експерименту здійснено оптимізацію технологічних режимів друку (товщина стінок, перекриття, швидкість), що є фундаментальним для підвищення якості кінцевої продукції.
5. Практична цінність. Сформовано практичні рекомендації щодо вибору параметрів 3D-друку, орієнтовані на забезпечення необхідної геометричної точності, жорсткості та міцності деталей, виготовлених за цією технологією. Завдяки швидкому прототипуванню, з використанням АВ, було виготовлено збірну конструкцію машини, що значно скоротило час на її розробку та обробку компонентів.

Таким чином, у роботі було успішно поєднано передове інженерне проєктування з можливостями адитивного виробництва для створення інноваційного обладнання, що закладає основу для подальшого впровадження "цифрового" виробництва усферу харчового машинобудування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрощук Г.О. 3D-друк в епоху інноваційних технологій: проблеми регулювання / Г.О. Андрощук, Я.В. Копил // Інтелектуальна власність в Україні. — 2016. — № 5. — С. 17–26.
2. Stadnyk I., V Piddubnyi, Mykhailyshyn, Petrychenko, V. Fedoriv, V.Kaspru (2021) The influence of rheology and design of modelling rolls on the flow and specific gravity during dough rolling and injection. Journal of Advanced Manufacturing System. Vol. 22, No. 01. 35-48.<https://doi.org/10.1142/S021>
3. Wohlers T. Wohlers report 2014: Additive manufacturing and 3D-printing state of the industry: Annual world-wide progress report, Wohlers Associates, 2014. — 276 p.
4. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (II частина) / Андрощук Г. О. // Рецензований журнал «Наука, технології, інновації» №2 2017 рік – С.29-36
5. Яригін В.А. Аналіз параметрів, що впливають на якість 3d друку / В.А. Яригін., С.П. Вислоух // Materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar “Modern questions of production and repair in industry and in transport”, March 23-29, 2020, Kosice, Tbilisi, Georgia. – С. 180-183.
6. Чонка Е.Я. Аналіз точності формування поверхонь деталей виготовлених на 3d-принтері / Е. Я Чонка, В.С. Антонюк // Збірник праць XV Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» 10-11 грудня 2019 року – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2019. – С. 197-200.
7. Переваги ПЗ Creo Parametric // [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://www.ptc.com/ru/products/cad/creo>
8. Яригін В.А. Про сучасні методи та засоби моделювання / В.А. Яригін, С.П. Вислоух // Збірник праць XV Науково-практичної конференція студентів,

аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» 10-11 грудня 2019 року – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2019. – С. 211-213.

9. Документація для встановлення і використання програмного продукту Repetier Host, / Marcus Littwin // repetier.com інформаційний сайт виробника програмного забезпечення Repetier Host – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.repetier.com/documentation/repetier-firmware/z-probing/>.

10. Яригін В.А. Методологія покращення характеристик міцності деталі, що виготовлена методом 3d друку // В.А Яригін., С.П Вислоух.// збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю Процеси механічної обробки, верстати та інструмент м. Житомир, 6–9 листопада 2019 р. - С. 209-213 83

11. Шорсткість поверхні // [Електронний ресурс] – режим доступу: https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%D0%BEA8%D0%BE%D1%80%D1%81%D1%82%D0%BA%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%BF%D0%BD%D1%96&oldid=27033958

12. Гаврилюк В. Г., Кукляк М. Л. Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання. Навчальний посібник для студентів механічних та машинобудівних спеціальностей. — К: УМКВО, 1990. — 210с.

13. Яригін В.А. Особливості отримання прототипів за допомогою 3d друку / В.А Яригін., С.П Вислоух.// Збірник наукових праць XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р. м. Київ, – К: К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. Центр учбової літератури. – 2020. – С. 139 – 142.

14. Яригін В.А. Дослідження параметрів якості деталей, отриманих шляхом 3d друку / В.А Яригін., С.П Вислоух // Збірник тез всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених,

присвяченої Дню науки, 11-15 травня 2020 року м.Житомир , – К.:Державний університет «Житомирська політехніка» – С. 125 – 126.

15. Миронова Н.А., Дубровин В.І. Огляд методів аналітичної ієрархії // Інтелектуальні системи ухвалення рішень і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. Том 1. Херсон: ХНТУ, 2009. С. 192-194. 7. Міжнародний стандарт ISO/ASTM 52900 Additive manufacturing – General principles – Terminology. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/74514.html> (дата звернення 28.10.2020).

16. Бізюк А.В., Вовк О.В., Ткаченко В.П. Основи наукових досліджень: навч. посібник. Харків: ХНУРЕ, 2019. 180 с.

17. Igor Stadnyk, Volodymyr Piddubnyi, Anna Sabadosh, Mikhailo Mushtruk, Andrii Chahaida, Viktor Fedorov, Khrystyna Kravcheniuk, Svitlana Krasnozhon, Andriy Derkach, Iurii Radchenko. Determination of specific power when mixing components of yeast dough. Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences vol. XX, XXXX, p. XX-XX 1337-0960 <https://doi.org/10.5219/XXXX>

18. I. Stadnyk, V. Piddubnyi, O. Kolomiiets, A.Chahaida, O.Kravets et. al. (2025). Determining the influence of drum mixer parameters on the change in dough components concentration at the initial mixing stage. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 2 No. 11(134), 6–15.

19. Improvement of environmental sustainability of milk processing enterprises / Oleh Kravets, Mariia Shynkaryk, Viktor Kravets // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2024. — Vol 114. — No 2. — P. 111–118.

20. Piddubnyi, V., Stadnyk, I., Kravets, O., Chahaida, A., Hushtan, T., Kahanets-Havrylko, L., Karpovych, I., Tupitska, O., Kostiuk, T., & Rozbytska, T. (2023). Characteristics of mucous-forming polysaccharides extracted from flax seeds. Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences, 2023. Vol. 17, P. 677–693.

21. World Intellectual Property Report Breakthrough Innovation and Economic Growth [electronic resource]. — Access: http://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_944_2015.pdf