

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

### Розробка установки для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів

Назва теми

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Шифр, назва

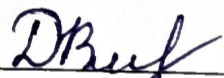
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Шифр, назва

Освітня програма «Галузеве машинобудування»

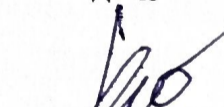
Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу  
група МБм-24-1

  
Підпис

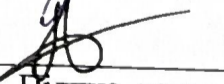
Волкотруб Д.С.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

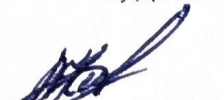
проф. Скиба М.Є.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

С.І. Пундик  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

  
Підпис, дата

доц. Неймак В.С.  
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

10 12 2025 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень магістр  
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»  
Шифр і назва  
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»  
Шифр і назва  
Освітня програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

 10. 12. 2025р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Волкотруб Денис Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка установки для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів

керівник роботи д.т.н., проф. Скиба М.Є.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики установок для подрібнення полімерів та їх характеристики

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Розробка установки для дослідження процесу подрібнення полімерів. 3. Розрахунки, що підтверджують працездатність установки для подрібнення полімерів. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Обладнання для подрібнення полімерних матеріалів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Установка для дослідження процесу подрібнення полімерів. Документ технологічний (A1). Аркуш 3. Установка для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів. Схема кінематична (A1). Аркуш 4. Установка для дослідження процесу подрібнення полімерів. Схема електрична (A1). Аркуш 5. Установка для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 6. Робочі органи для подрібнення полімерів. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

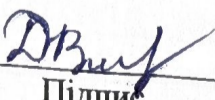
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

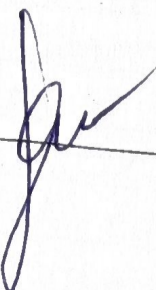
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	до 29.10.24р.	
2. Розробка установки для дослідження процесу подрібнення полімерів	до 11.11.24р.	
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність установки для подрібнення полімерів	до 21.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент

  
Підпис

Д.С. Волкотруб  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

М.Є. Скиба  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента  
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Волкотруб Денис Сергійович

2. Тема магістерської роботи Розробка установки для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 72

5. Актуальність роботи зумовлена потребою ефективної переробки полімерних відходів легкої промисловості. Подрібнення є важливим етапом підготовки сировини до повторного використання, що визначає якість вторинних матеріалів. Розробка експериментальної установки дозволяє дослідити закономірності руйнування полімерів, оптимізувати режими подрібнення та зменшити енерговитрати. Це сприяє підвищенню ефективності переробки відходів і впровадженню енергоощадних технологій. Отже, тема магістерської роботи є актуальною з наукової та практичної точки зору.

В роботі розроблена установка для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому здійснено розробку установки для дослідження процесу подрібнення полімерів. В третьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність установки для подрібнення полімерів.

Підпис студента

D.Vul

" 10 " 12 20 25 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 2 від " 19 " 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК Відмінно (А1100)

Рекомендації ЕК Впровадження у кваліфікаційний процес

Особливі відмітки -

Технічний секретар

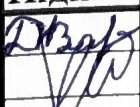
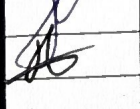

Ліжкова Д.В.

" 19 " 12 20 25 р.

# ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	8
1.1 Сучасний стан розвитку технологій переробки відходів полімерів у легкій промисловості	8
1.2 Теоретичні основи подрібнення	12
1.3 Класифікація методів подрібнення матеріалів	17
1.4 Класифікація обладнання для подрібнення полімерних матеріалів	19
1.5 Огляд обладнання для подрібнення полімерних матеріалів	23
1.6 Аналіз чинників, що впливають на процес подрібнення полімерних матеріалів	30
1.7 Висновки до першого розділу	33
2 Розробка установки для дослідження процесу подрібнення полімерів	35
2.1 Обґрунтування необхідності експериментальних досліджень і постановка задачі розробки установки	35
2.2 Розробка технологічного процесу подрібнення полімерних матеріалів на установці, що розробляється	36
2.3 Розробка кінематичної схеми установки для дослідження процесу подрібнення	38
2.4 Принцип роботи установки для дослідження процесу подрібнення полімерів	41

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Волкотруб			Розробка установки для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Скиба				М	4	72
Н.контр.					ХНУ гр.МБм-24-1			
Затвер.		Неймак						

2.5	Конструктивні особливості основних вузлів установки	45
2.6	Технічні характеристики експериментальної установки	50
2.7	Робочі органи для подрібнення полімерів	53
2.8	Розробка електричної схеми установки для подрібнення полімерних матеріалів	55
2.9	Висновки до другого розділу	57
3	Розрахунки, що підтверджують працездатність установки для подрібнення полімерів	59
3.1	Мета і вихідні припущення розрахунків	59
3.2	Енергетичні параметри приводу	62
3.3	Перевірка штока на напруження стиску та запас міцності	62
3.4	Стійкість штока від поздовжнього вигину (Ейлер)	63
3.5	Перевірка достатності моменту тертя в зоні контакту	64
3.6	Питомі енерговитрати на подрібнення	65
3.7	Підбір маси вантажів важільної системи	65
3.8	Оцінка теплового режиму зразка	66
3.9	Висновки до третього розділу	66
	Висновки	68
	Перелік джерел посилання	70
	Додаток А	

2.5	Конструктивні особливості основних вузлів установки	45
2.6	Технічні характеристики експериментальної установки	50
2.7	Робочі органи для подрібнення полімерів	53
2.8	Розробка електричної схеми установки для подрібнення полімерних матеріалів	55
2.9	Висновки до другого розділу	57
3	Розрахунки, що підтверджують працездатність установки для подрібнення полімерів	59
3.1	Мета і вихідні припущення розрахунків	59
3.2	Енергетичні параметри приводу	62
3.3	Перевірка штока на напруження стиску та запас міцності	62
3.4	Стійкість штока від поздовжнього вигину (Ейлер)	63
3.5	Перевірка достатності моменту тертя в зоні контакту	64
3.6	Питомі енерговитрати на подрібнення	65
3.7	Підбір маси вантажів важільної системи	65
3.8	Оцінка теплового режиму зразка	66
3.9	Висновки до третього розділу	66
	Висновки	68
	Перелік джерел посилання	70
	Додаток А	

## ВСТУП

Сучасний розвиток легкої промисловості України тісно пов'язаний із процесами хімізації та впровадженням нових технологій переробки полімерних матеріалів [1]. У взуттєвій, швейній та фурнітурній галузях полімери широко застосовуються для виготовлення штучних і композиційних матеріалів, плівок, елементів взуття та аксесуарів. Розширення номенклатури полімерних матеріалів і виробів з них потребує вдосконалення підготовчих виробництв, які включають процеси приготування композицій, змішування, подрібнення та обробки полімерів.

Підготовчі виробництва у легкій промисловості залишаються одними з найменш механізованих та автоматизованих ланок технологічного процесу [2]. Значна частка ручної праці та низький рівень енергоефективності обладнання призводять до підвищення собівартості продукції та зниження її якості. Одним із ключових етапів таких виробництв є подрібнення матеріалів, яке забезпечує збільшення площі поверхні твердих тіл, що істотно впливає на швидкість розчинення, хімічну взаємодію та ефективність подальших технологічних процесів.

Однак проведення теоретичних розрахунків параметрів подрібнювачів, що використовуються в промисловості, часто є неможливим без практичних експериментальних досліджень закономірностей процесів подрібнення. Відсутність достатньої кількості експериментальних даних ускладнює створення науково обґрунтованих моделей і заважає проектуванню ефективних пристроїв. Тому розробка експериментальної установки для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів є актуальним і необхідним напрямом сучасних науково-технічних досліджень.

Особливої уваги потребує проблема переробки полімерних відходів, що утворюються у процесі виробництва [3]. У взуттєвій та фурнітурній промисловості це відходи гум, шкірволону, поліетиленових колодок, браковані деталі, литтєві облойні залишки тощо. Раціональна утилізація таких відходів має значне економічне та екологічне значення, оскільки дозволяє не лише зменшити навантаження

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

на довкілля, а й отримати дешевшу вторинну сировину для виготовлення продукції.

Водночас існуючі промислові методи подрібнення полімерів характеризуються високими енерговитратами та невисокою ефективністю [4]. Вони не завжди забезпечують необхідну ступінь дисперсності матеріалу, а їхній коефіцієнт корисної дії залишається низьким через переважання деформаційних процесів над руйнуванням частинок. Це вимагає розробки нових високоефективних конструкцій подрібнювального обладнання, оптимізація якого можлива лише на основі глибокого аналізу взаємодії полімерних матеріалів із робочими органами пристрою, а також експериментального визначення основних технологічних параметрів.

Таким чином, розробка установки для дослідження процесу подрібнення полімерів дозволить вивчити вплив конструктивних і технологічних факторів на продуктивність, енергоефективність та якість подрібнення. Результати таких досліджень можуть бути використані для удосконалення промислових подрібнювачів і створення нових типів обладнання, здатних забезпечити ефективну переробку полімерних відходів легкої промисловості.

Актуальність роботи полягає в необхідності створення сучасного науково обґрунтованого підходу до подрібнення полімерних матеріалів і відходів, що дає змогу знизити енерговитрати, підвищити якість кінцевого продукту та сприяти екологізації виробництва.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

## 1.1 Сучасний стан розвитку технологій переробки відходів полімерів у легкій промисловості

У сучасних умовах господарювання легка промисловість України орієнтується на раціональне використання матеріальних ресурсів, зниження собівартості продукції та підвищення екологічної безпеки виробництва [5]. Одним із найважливіших напрямів досягнення цих цілей є переробка полімерних відходів, що утворюються у процесі виробництва та споживання. Використання вторинних полімерних матеріалів дозволяє не лише скоротити витрати на первинну сировину, а й зменшити негативний вплив на довкілля, пов'язаний із накопиченням, спалюванням або захороненням відходів.

Полімери завдяки своїм фізико-механічним, хімічним і технологічним властивостям широко застосовуються у легкій промисловості [6]. З них виготовляють підшви, каблуки, устілки, взуттєві колодки, фурнітуру, декоративні елементи, плівкові матеріали, покриття для шкіри та тканин. Водночас стрімке зростання обсягів виробництва таких матеріалів призводить до накопичення значної кількості відходів, частина яких має тривалий період розкладання у природних умовах - від кількох десятиліть до сотень років. Це створює серйозні екологічні проблеми та зумовлює необхідність пошуку ефективних технологій їх переробки.

У світовій практиці спостерігається тенденція переходу промисловості на екологічно орієнтовану модель розвитку, що передбачає створення замкнених циклів матеріальних потоків, у яких відходи одного виробництва стають сировиною для іншого. Саме тому у легкій промисловості все більше уваги приділяється впровадженню технологій вторинної переробки полімерів, які дозволяють повторно використовувати матеріали без істотної втрати їхніх властивостей. На рис. 1 представлено узагальнений розподіл основних технологій переробки полімерних

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

відходів у легкій промисловості, з якого видно, що механічні методи займають провідне місце (понад 50 %), тоді як хімічні, комбіновані та термічні процеси застосовуються значно рідше через складність реалізації та підвищену енергоємність.

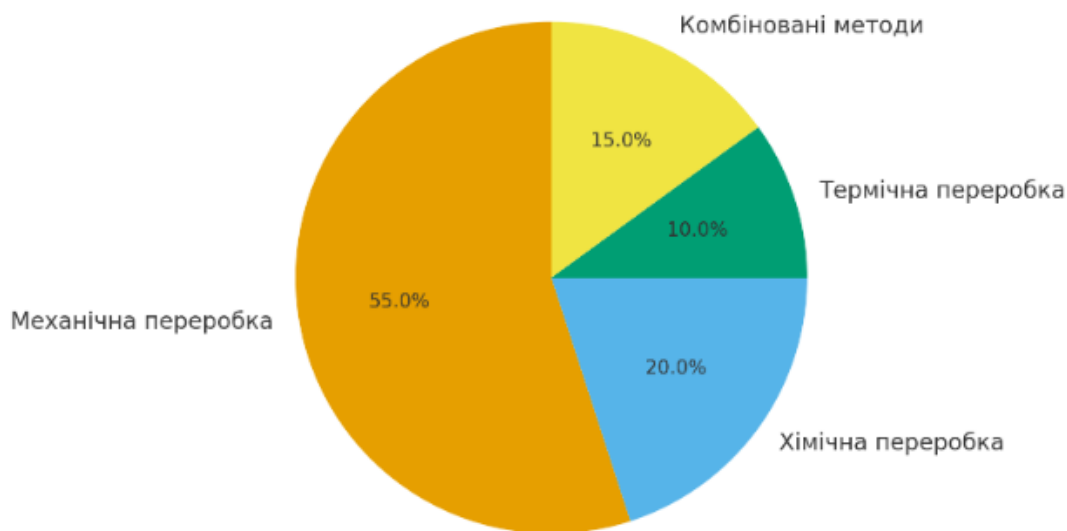


Рисунок 1.1 - Розподіл технологій переробки полімерних відходів у легкій промисловості

Механічна переробка є найпоширенішим напрямом використання полімерних відходів, оскільки вона є відносно простою, економічно вигідною та екологічно безпечною [7]. Сутність цього методу полягає у подрібненні, сортуванні, очищенні та повторному використанні полімерів у вигляді грануляту, порошку або сумішей. Такі матеріали знову надходять у виробництво як вторинна сировина для виготовлення литих і формованих виробів, плівок, композиційних матеріалів. Наприклад, у взуттєвій промисловості подрібнений поліетилен або поліуретан може використовуватися як наповнювач або модифікатор для полімерних композицій, що дозволяє зменшити витрати на первинну сировину та підвищити рентабельність виробництва.

Хімічна переробка полягає у розкладанні полімерів на мономері або низькомолекулярні сполуки шляхом піролізу, гідролізу, гліколізу чи деполімеризації. Отримані продукти можуть бути використані для повторного синтезу полімерів або як енергетичне паливо. Цей метод забезпечує високу якість вторинної сировини, проте вимагає складного обладнання, ретельного контролю технологічних параметрів, а також значних енерговитрат. У зв'язку з цим у підприємствах легкої промисловості він застосовується рідше, переважно у спеціалізованих лабораторіях або великих виробництвах з високим рівнем автоматизації.

Термічні методи переробки відходів передбачають нагрівання полімерів до високих температур для отримання енергії або вторинних нафтохімічних продуктів [8]. Вони є ефективними у сенсі зниження обсягів відходів, однак характеризуються високими енергетичними витратами та потенційною небезпекою утворення токсичних викидів. Тому їх застосування в умовах легкої промисловості є обмеженим і потребує суворого контролю екологічних показників.

Окремий напрям розвитку становлять комбіновані технології, що поєднують елементи механічної та хімічної переробки. Вони дозволяють підвищити якість отриманих матеріалів, скоротити енерговитрати й розширити можливості утилізації полімерів різного складу. Такі технології особливо перспективні для складних полімерних систем, що містять добавки, пластифікатори або армуючі волокна.

Основними джерелами полімерних відходів у легкій промисловості є взуттєві, швейні, галантерейні та фурнітурні підприємства. Найбільш поширеними є обрізки полімерних матеріалів, гумові залишки, шкірволон, поліетиленові колодки, литтєві облойні залишки, браковані підшви, каблучки та інші вироби. Залежно від типу полімерів відходи поділяються на термопластичні (поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид) і термореактивні (епоксидні, фенольні, поліуретанові смоли). Переробка термопластичних матеріалів є технічно простішою, оскільки вони здатні багаторазово плавитися без значного погіршення властивостей, тоді

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

як термореактивні полімери не піддаються плавленню і можуть використовуватися лише у вигляді порошків чи наповнювачів для композиційних матеріалів.

Одним із найважливіших етапів механічної переробки є процес подрібнення полімерних відходів, що забезпечує підготовку матеріалу до подальшої granulacji, змішування або формування [7]. Ефективність подрібнення визначається низкою факторів: фізико-механічними властивостями полімерів, конструкцією подрібнювального обладнання, режимами роботи, а також заданою дисперсністю продукту. У промисловій практиці широко застосовуються ножові, роторні, ударні, вібраційні та комбіновані подрібнювачі. Однак більшість наявних конструкцій не враховує специфічних властивостей полімерів, таких як еластичність, теплостійкість, схильність до злипання або електростатизації. Це призводить до підвищених енерговитрат, зниження продуктивності та нерівномірності подрібнення.

Сучасні дослідження у цій галузі спрямовані на вдосконалення конструкцій подрібнювачів і створення вискоефективних технологічних процесів, що забезпечують мінімальні втрати енергії. Розробляються нові типи обладнання з комбінованою дією - механічною, вібраційною, термічною або криогенною, що дозволяє враховувати властивості конкретного полімерного матеріалу. Зокрема, криогенне подрібнення, при якому полімери охолоджуються до низьких температур і стають крихкими, дає змогу значно знизити енерговитрати та підвищити однорідність отриманої фракції.

Впровадження технологій вторинної переробки полімерів у легкій промисловості має не лише економічне, а й екологічне значення. Воно дозволяє скоротити споживання первинних ресурсів, зменшити кількість відходів, що надходять на полігони, та знизити навантаження на навколишнє середовище. Такі підходи відповідають концепції циркулярної економіки, яка передбачає створення замкнених циклів виробництва, у яких матеріали багаторазово використовуються з міні-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

мальними втратами. Крім того, переробка полімерів сприяє зниженню енергоспоживання - у порівнянні з виробництвом нових матеріалів з первинної сировини економія енергії може становити до 60–70 %.

Таким чином, сучасний стан розвитку технологій переробки полімерних відходів у легкій промисловості характеризується переходом від традиційних малоефективних методів до більш енергоощадних, екологічно безпечних та науково обґрунтованих процесів. Разом із тим, значна частина проблем залишається невирішеною, особливо у сфері подрібнення полімерів різного складу та структури. Це зумовлює необхідність створення спеціалізованого експериментального обладнання, яке дозволить вивчити закономірності процесу подрібнення, визначити оптимальні параметри та на основі отриманих результатів розробити високоефективні промислові подрібнювачі. Саме ці завдання і є предметом подальшої розробки в даній магістерській роботі.

## 1.2 Теоретичні основи подрібнення

Процес подрібнення твердих матеріалів є одним із найважливіших у багатьох галузях промисловості, зокрема в хімічній, гірничій, будівельній, фармацевтичній та легкій промисловості [9]. Його метою є зменшення розмірів частинок сировини для подальшої переробки або використання у технологічних процесах. У контексті переробки полімерних матеріалів подрібнення виконує особливо важливу функцію - воно забезпечує підготовку відходів до грануляції, змішування, формування або повторного використання як наповнювачів і компонентів полімерних композицій.

З фізичної точки зору подрібнення - це процес руйнування суцільного тіла під дією зовнішніх сил, які перевищують межу міцності матеріалу. При цьому частинки матеріалу розділяються на менші, з утворенням нової поверхні. Збіль-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

шення питомої поверхні є основним критерієм ефективності подрібнення, оскільки воно визначає активність матеріалу у подальших фізико-хімічних процесах - розчиненні, дифузії, адсорбції, змішуванні тощо.

Основні закономірності процесу подрібнення [11].

Подрібнення супроводжується витратою механічної енергії, що передається матеріалу від робочих органів подрібнювача. Частина цієї енергії витрачається на подолання сил внутрішнього тертя, пластичну деформацію, нагрівання матеріалу, а лише невелика частка - на безпосереднє руйнування зв'язків у структурі тіла. Тому реальний коефіцієнт корисної дії процесу є відносно низьким, особливо при подрібненні полімерів, які характеризуються високою в'язко-пружною деформацією.

Кількісна оцінка енергетичних витрат на подрібнення здійснюється на основі емпіричних залежностей, що встановлюють зв'язок між витратою енергії та ступенем подрібнення. У науковій практиці найбільш відомими є закон Ріттингера, закон Кіка та закон Бонда, кожен із яких має певну область застосування.

Відповідно до закону Ріттингера, енергія, витрачена на подрібнення, пропорційна приросту питомої поверхні частинок [11]:

$$E = K_R \left( \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right), \quad (1.1)$$

де  $E$  - питома енергія подрібнення,  $K_R$  - коефіцієнт Ріттингера, що залежить від властивостей матеріалу,  $x_1$  та  $x_2$  - середні розміри частинок до і після подрібнення відповідно.

Цей закон справедливий для процесів тонкого подрібнення, коли основна частина енергії витрачається на створення нової поверхні.

Закон Кіка ґрунтується на припущенні, що витрата енергії пропорційна логарифму відношення початкового і кінцевого розмірів частинок:

$$E = K_K \ln \frac{x_1}{x_2}, \quad (1.2)$$

де  $K_K$  - коефіцієнт Кіка.

Цей закон описує процеси грубого подрібнення, коли головну роль відіграють пружні деформації та відносно невелике збільшення поверхні.

Закон Бонда є проміжним між попередніми і враховує, що енергія подрібнення обернено пропорційна квадратному кореню з розміру частинок:

$$E = K_B \left( \frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right), \quad (1.3)$$

де  $K_B$  - емпіричний коефіцієнт, що залежить від природи матеріалу та умов процесу.

Ця модель є найбільш універсальною і використовується для розрахунків у випадках середнього ступеня подрібнення.

Вибір конкретного закону залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, необхідного ступеня дисперсності та типу подрібнювального обладнання. Для полімерів, які мають значну еластичність і низьку теплопровідність, характерним є перехід від пружної деформації до пластичної, що ускладнює процес руйнування.

Характер енергообміну при подрібненні полімерів.

На відміну від крихких матеріалів (гірських порід, скла, мінералів), полімери під дією навантажень здатні до значних оборотних деформацій. У момент дії сили частинки не руйнуються одразу, а зазнають розтягнення та зсуву, акумулюючи частину енергії у вигляді пружної деформації. Лише після досягнення критичного навантаження відбувається розрив міжмолекулярних зв'язків і локальне руйнування структури. Цей процес супроводжується виділенням тепла, яке може

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

призвести до нагрівання матеріалу, зменшення його твердості й навіть до злипання частинок.

Для полімерних матеріалів ефективність подрібнення значною мірою визначається температурним режимом. При надмірному нагріванні відбувається термічне розм'якшення, що ускладнює руйнування та сприяє злипанню частинок. Тому важливим фактором є забезпечення відведення тепла або проведення подрібнення в умовах охолодження, наприклад, у середовищі рідкого азоту (криогенне подрібнення). При низьких температурах полімер втрачає еластичність, стає крихким, і процес руйнування відбувається за механізмом, подібним до подрібнення кристалічних речовин.

Сили, що діють під час подрібнення [12].

Основні типи механічних впливів, що реалізуються у подрібнювачах, - це стискання, удар, згинання, зрізання та стирання (тертя). Вибір виду дії залежить від властивостей матеріалу і конструкції робочих органів машини. Для полімерів найбільш ефективними є дії зрізу і тертя, оскільки вони сприяють розділенню матеріалу по межах структурної неоднорідності без надмірних втрат енергії.

При подрібненні полімерних матеріалів застосовуються різні типи навантажень: статичні, динамічні або комбіновані. У роторних подрібнювачах основну роль відіграють динамічні сили удару й зрізу, у валкових - статичне стискання, а у вібраційних - циклічні імпульсні навантаження. У більшості випадків полімери руйнуються не одномоментно, а поступово, внаслідок накопичення мікродфектів, що переростають у макротріщини.

Показники ефективності процесу [13].

Для оцінки результатів подрібнення використовують такі показники, як ступінь подрібнення, питома енергія процесу, продуктивність, гранулометричний склад продукту та однорідність отриманої фракції. Ступінь подрібнення визначають відношенням середнього розміру частинок до подрібнення до середнього розміру після подрібнення:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$i = \frac{x_1}{x_2}. \quad (1.4)$$

Чим більше значення цього показника, тим вищий ступінь подрібнення. Проте збільшення ступеня подрібнення завжди супроводжується зростанням енерговитрат, що зумовлює необхідність оптимізації процесу з урахуванням економічних та технологічних вимог.

Особливості подрібнення полімерів.

Особливістю полімерних матеріалів є їхня структурна складність - вони можуть бути аморфними або частково кристалічними, наповненими або ненаповненими, з різним ступенем пластичності. Ці властивості визначають механізм руйнування під час подрібнення. Наприклад, аморфні полімери руйнуються внаслідок зрізу і розриву макромолекулярних ланцюгів, тоді як частково кристалічні - по межах кристалічних і аморфних областей. Введення наповнювачів, пластифікаторів або армуючих волокон змінює характер деформації і, відповідно, енергетичні параметри процесу.

Важливу роль відіграє також швидкість обертання робочих органів. За надмірно високих швидкостей відбувається інтенсивне нагрівання матеріалу, що призводить до його розм'якшення. При низьких швидкостях, навпаки, зменшується продуктивність і не досягається необхідна дисперсність. Тому кожен тип полімеру потребує оптимального режиму подрібнення, який визначається експериментально.

Таким чином, теоретичні основи подрібнення полімерних матеріалів базуються на вивченні закономірностей енергообміну, характеру деформацій і руйнувань, впливу температури, швидкості та виду механічного навантаження. Глибоке розуміння цих закономірностей є необхідною передумовою для розробки ефективного обладнання, здатного забезпечити високий ступінь подрібнення при мінімальних енерговитратах.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

### 1.3 Класифікація методів подрібнення матеріалів

Процес подрібнення матеріалів має різноманітні фізичні механізми, які залежать від властивостей сировини, конструкції обладнання та технологічних умов [14]. Для ефективної реалізації процесу необхідно враховувати не лише енергетичні характеристики, а й природу руйнування матеріалу, що відбувається під дією зовнішніх механічних сил.

У загальному вигляді всі способи подрібнення можна класифікувати за видами механічного впливу на частинки матеріалу. Залежно від домінуючої сили, що зумовлює руйнування, виділяють такі основні методи подрібнення: роздавлювання, розколювання, удар та стирання. Кожен із цих методів має свої характерні особливості, область застосування та реалізується в конкретних типах подрібнювального обладнання.

На рис. 1.2 наведено основні схематичні зображення методів подрібнення матеріалів, які відображають принцип дії механічних сил у процесі руйнування твердого тіла [15].

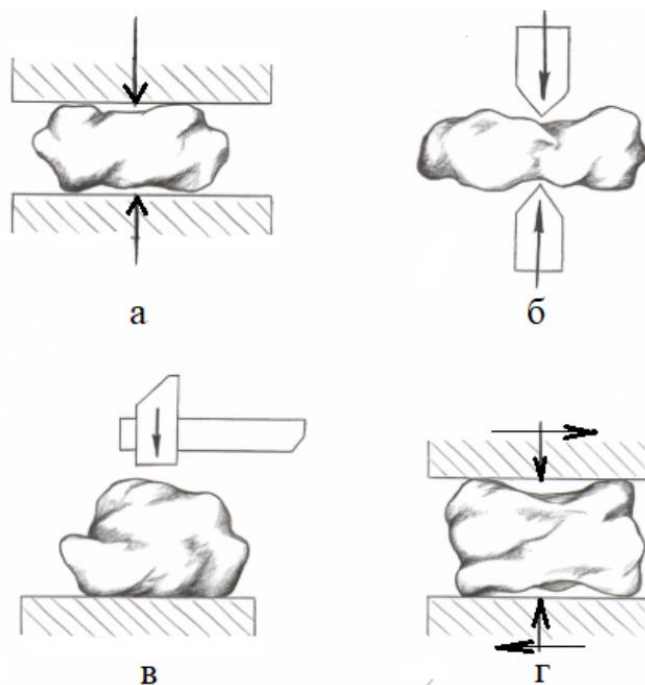


Рисунок 1.2 – Методи подрібнення матеріалів

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Роздавлювання (рис.1.2, а) застосовується для подрібнення крупних та середньої твердості матеріалів. Суть процесу полягає у стисканні частинки між двома твердими поверхнями, що рухаються назустріч одна одній. Коли прикладене зусилля перевищує міцність матеріалу, відбувається руйнування. Такий метод характерний для валкових, щокових і конусних дробарок. Основна частина енергії витрачається на стискання матеріалу та утворення тріщин у його об'ємі.

Розколювання (рис.1.2, б) базується на створенні концентрованого зусилля, яке викликає виникнення напружень розтягу у матеріалі. Руйнування відбувається вздовж площин слабкої зв'язності. Цей спосіб ефективний для крихких і ламких матеріалів, наприклад полімерів із частковою кристалічною структурою або наповнених композитів. Розколювання реалізується в обладнанні, де діють клиноподібні елементи або концентровані навантаження.

Удар (рис.1.2, в) є одним із найпоширеніших методів подрібнення, що використовується у процесах інтенсивного руйнування частинок. Матеріал зазнає короткочасної дії великої сили, у результаті чого відбувається його розрив або розщеплення. При ударному впливі частинки руйнуються переважно за рахунок внутрішніх напружень, які виникають від імпульсного навантаження. Цей метод застосовується у роторних, молоткових, ударно-вібраційних і дезінтеграторних подрібнювачах. Для полімерних матеріалів ударне подрібнення може бути ефективним лише за умови їх охолодження до температур нижче точки склування, що забезпечує крихкість структури.

Стирання (рис.1.2, г) передбачає дію сил тертя та зсуву між частинками або між частинками й робочими поверхнями. При цьому відбувається поступове зрізання або стирання верхніх шарів матеріалу. Стирання є характерним для процесів тонкого подрібнення, коли необхідно отримати дрібнодисперсний порошок із контрольованою фракцією частинок. Цей метод широко застосовується у валкових, дискових і шарових млинах, а також у лабораторних подрібнювачах для підготовки полімерних порошків.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Кожен із наведених методів подрібнення реалізує певний механізм руйнування матеріалу, однак у більшості практичних установок вони поєднуються. Наприклад, у роторно-ножових подрібнювачах полімерів одночасно діють сили удару, зрізу та стирання, що дозволяє підвищити ефективність процесу та забезпечити більш рівномірну дисперсність. У валкових дробарках відбувається поєднання роздавлювання та стирання, а в дезінтеграторах — комбінація удару й зсуву.

Вибір методу подрібнення залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу: міцності, твердості, пружності, теплопровідності, температури склування, наявності наповнювачів або волокон. Наприклад, для еластичних полімерів (поліетилен, поліпропілен, гума) доцільним є використання низькотемпературного або комбінованого подрібнення, при якому матеріал охолоджується до крихкого стану. Для крихких полімерів (наприклад, полістиролу або оргскла) ефективним є ударно-різальний механізм.

Таким чином, класифікація методів подрібнення матеріалів дозволяє не лише описати фізичну природу процесів руйнування, а й обґрунтувати вибір типу подрібнювального обладнання залежно від властивостей полімерної сировини. Розуміння цих механізмів є основою для подальшої розробки експериментальної установки, яка дозволить досліджувати вплив конструктивних і технологічних параметрів на ефективність процесу подрібнення полімерів.

#### 1.4 Класифікація обладнання для подрібнення полімерних матеріалів

Для реалізації процесів подрібнення в промислових та дослідницьких умовах застосовується велика кількість різних машин і механізмів, принцип дії яких ґрунтується на використанні тих чи інших видів механічних впливів: стискання, удару, зрізу, стирання або їх комбінації [14]. Ефективність роботи подрібнюваль-

ного обладнання визначається не лише конструктивними параметрами, але й фізико-механічними властивостями матеріалу, що подрібнюється, а також режимами його роботи.

У загальному вигляді обладнання для подрібнення полімерних матеріалів можна класифікувати за кількома основними ознаками:

- за способом дії на матеріал - машини ударної, стискальної, різальної, зрізальної, вібраційної або комбінованої дії;

- за ступенем подрібнення - для грубого, середнього, тонкого і надтонкого подрібнення;

- за конструктивним виконанням - ножові, роторні, валкові, молоткові, дискові, кульові, вібраційні та дезінтеграторні подрібнювачі;

- за режимом роботи - періодичної (дискретної) або безперервної дії.

Кожен тип обладнання має свої переваги й обмеження, тому вибір конкретної машини визначається видом полімеру, його станом (твердий, еластичний, охолоджений), а також вимогами до фракційного складу готового продукту.

Ножові та роторно-ножові подрібнювачі є найбільш поширеними при переробці термопластичних полімерів, зокрема поліетилену, поліпропілену, полістиролу, ПВХ та гумових відходів. Принцип їх дії базується на поєднанні сил зрізу та удару. Матеріал захоплюється обертовими ножами ротора, які взаємодіють із нерухомими ножами статора, розрізаючи та дроблячи полімер на дрібні частинки. Такі подрібнювачі забезпечують високу продуктивність, рівномірність фракційного складу та відносно низькі енерговитрати. Недоліком є можливість нагрівання матеріалу під час роботи, що вимагає перерв у процесі або системи охолодження.

Валкові подрібнювачі використовують переважно для матеріалів середньої твердості та великої фракції. Подрібнення відбувається шляхом роздавлювання та стирання між двома валками, що обертаються назустріч один одному. Валкові дробарки характеризуються рівномірним навантаженням і можливістю регулювання зазору між валками, що дозволяє отримувати частинки заданого розміру. У полімерній технології такі машини застосовуються рідше через їх відносно низьку

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

швидкість і недостатню продуктивність при обробці гнучких або в'язких матеріалів.

Молоткові та ударно-роторні подрібнювачі діють за принципом удару та розриву матеріалу. Рухомі молотки, закріплені на роторі, обертаються з великою швидкістю та наносять удари по частинках полімеру, спричиняючи їх руйнування. Цей тип обладнання ефективний для попереднього подрібнення жорстких або крихких полімерів, наприклад пластмас, оргскла чи текстоліту. Водночас для еластичних полімерів такі подрібнювачі малоефективні, оскільки матеріал має здатність пружно відновлювати форму, поглинаючи частину енергії удару.

Дискові подрібнювачі використовуються для тонкого та рівномірного подрібнення. Матеріал надходить у робочу зону між двома дисками (нерухомим і рухомим), поверхня яких має нарізи або абразивне покриття. Завдяки поєднанню дії зрізу та стирання забезпечується висока якість готового порошку. Такі машини ефективні для полімерних матеріалів, що потребують подальшого гранулювання або змішування у композиційних системах.

Кульові та барабанні млини забезпечують тонке або надтонке подрібнення за рахунок ударів і стирання частинок між кулями та стінками барабана, що обертається. Вони застосовуються переважно в лабораторних або дослідних умовах, оскільки мають низьку продуктивність і високі енерговитрати. Проте їх використання виправдане, коли необхідно отримати полімерні порошки із заданою дисперсністю та контрольованим розподілом частинок.

Вібраційні та дезінтеграторні подрібнювачі використовують для інтенсивного руйнування матеріалів за рахунок високочастотних коливань або багатократних ударів. У вібраційних установках енергія передається матеріалу через сферичні або циліндричні тіла, які внаслідок коливального руху стирають і руйнують полімер. Дезінтегратори ж використовують ряди зустрічно обертових роторів з ударними елементами, які багаторазово діють на частинки матеріалу, забезпечуючи високу дисперсність продукту. Такі машини особливо перспективні для тонкого подрібнення полімерних відходів та композиційних систем.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

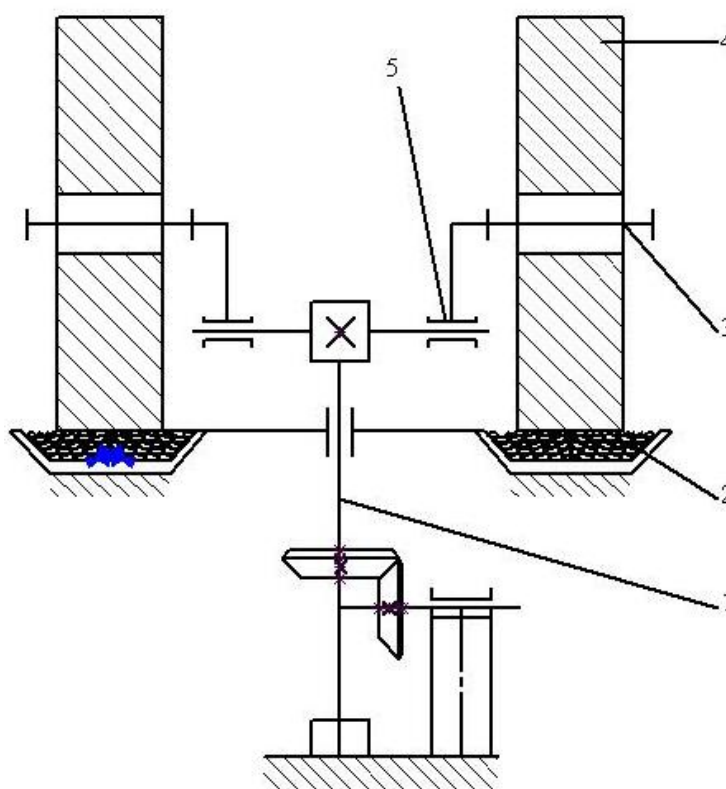


свої переваги й обмеження. Вибір конкретного типу подрібнювача залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, вимог до якості кінцевого продукту та економічної доцільності. У рамках цієї магістерської роботи особливу увагу приділено розробці установки для дослідження процесу подрібнення полімерів, яка дозволяє вивчати вплив конструктивних і технологічних параметрів на енергоефективність і продуктивність процесу.

## 1.5 Огляд обладнання для подрібнення полімерних матеріалів

### 1.5.1 Подрібнюючі машини стираючо-роздавлюючої дії [15]

Схема бігунів показана на рисунку 1.3.



1-вал вертикальний; 2-чаша; 3- вісь горизонтальна; 4- жорна (каток);  
5-кривошип

Рисунок 1.3 – Схема бігунів:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
23

Бігуни складаються з чаші 2, у яку завантажуються матеріал, та двох (рідше трьох) циліндричних катків 4. Катки здійснюють складний рух - обертаються навколо вертикальної осі разом із валом 1 і одночасно навколо власних горизонтальних осей 3.

Вал 1 приводиться в обертання від електродвигуна через конічну зубчасту передачу. Обертання катків навколо горизонтальних осей виникає завдяки тертю між їх поверхнею та матеріалом у чаші. Подрібнення відбувається шляхом роздавлювання та стирання під час набігання катків на матеріал. Стирання виникає при ковзанні циліндричної поверхні катків по масі матеріалу.

Точки поверхні катків у русі навколо власної осі мають однакову колову швидкість, а при обертанні навколо вертикальної осі - різну, пропорційну радіусу. У середній зоні поверхні ковзання відсутнє, тоді як біля країв спостерігається проковзування, швидкість якого дорівнює різниці колових швидкостей двох рухів. Максимальне проковзування виникає на краях катків.

Під час потрапляння твердих або великих частинок матеріалу жорна можуть підніматися за допомогою кривошипів 5, що запобігає перевантаженню та пошкодженню машини.

### 1.5.2 Молоткові дробарки

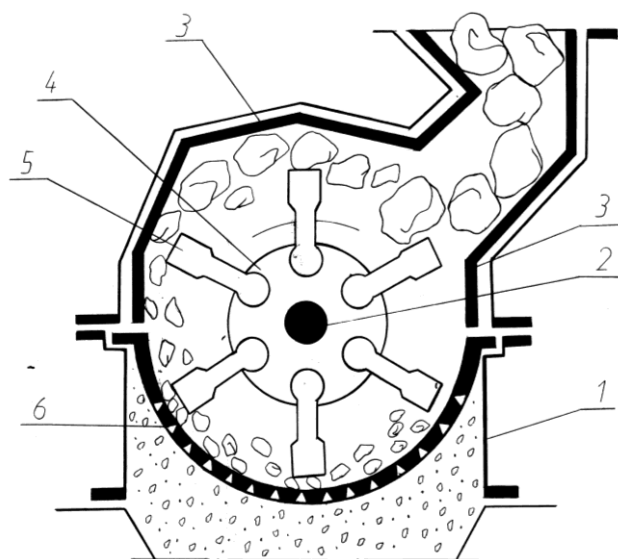
Схема молоткової дробарки подана на рисунку 1.6 [15].

Молоткова дробарка - це машина ударної дії, що складається з вала, який обертається з великою швидкістю, і шарнірно закріплених на ньому сталевих молотків. Матеріал подається зверху, захоплюється молотками 5 та подрібнюється ударами. Відскакуючи від молотків, частинки вдаряються об броньові плити 2, що додатково сприяє подрібненню. Готовий продукт виходить через розвантажувальну решітку 6, розміри отворів якої визначають фракцію подрібненого матеріалу.

У дробарках середнього й великого подрібнення матеріал руйнується головним чином ударами молотків, тоді як у дробарках для дрібного подрібнення

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

решітка розташована ближче до молотків, і процес відбувається також за рахунок роздавлювання, розколювання та стирання.



1 - корпус; 2 - вал; 3 - броньові плити; 4 - диск; 5 - молоток;  
6 - розвантажувальна решітка

Рисунок 1.4 - Схема молоткової дробарки

Робочі елементи - молотки, броньові плити та решітка - виготовляються зі зносостійких сталей (марганцевмісних або вуглецевих), поверхня яких зміцнюється твердим наплавленим сплавом.

Молоткові дробарки поділяють за кількістю роторів - на однороторні та двороторні, а за розташуванням молотків - на однорядні й багаторядні. Ступінь подрібнення становить: для однороторних дробарок  $i = 10-15$ , для двохроторних -  $i = 30-40$ .

### 1.5.3 Роторні дробарки

Схема роторної дробарки наведена на рисунку 1.5 [15].

Подрібнення в роторних дробарках здійснюється жорстко закріпленими на роторі билами, що відрізняє їх від молоткових дробарок, у яких молотки підвішені

вільно. Матеріал подається у зону ротора, який обертається з великою швидкістю, і зазнає багаторазових ударів билами. Під їх дією шматки руйнуються та відкидаються на відбійні плити або колосники, які утворюють камеру подрібнення. Відбиваючись від футеровки, частинки знову потрапляють під дію ротора, доки не досягнуть потрібної крупності та не пройдуть через вихідну щілину або зазори між колосниками.

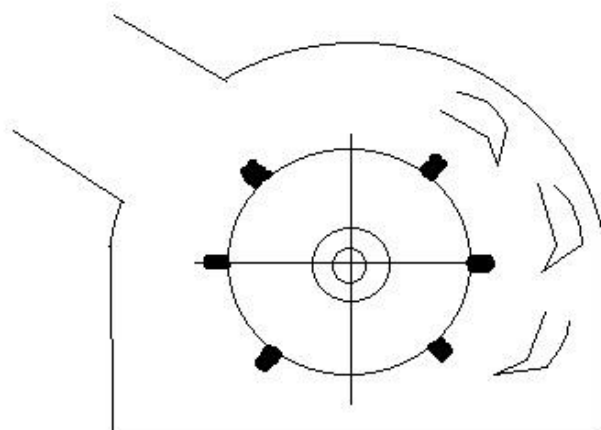


Рисунок 1.5 – Схема роторної дробарки

Принцип роботи роторних дробарок загалом аналогічний молотковим, однак завдяки жорсткому кріпленню бил у процесі удару бере участь вся маса ротора, що забезпечує вищу енергію удару. Це дозволяє застосовувати такі дробарки на першій стадії подрібнення для руйнування великих шматків міцних матеріалів, а також для середнього та дрібного подрібнення.

Існують однороторні й двороторні роторні дробарки. У двохроторних подрібнення може здійснюватися послідовно кожним ротором або одночасно двома роторами. Конструкції бувають з нижньою контрольною (колосниковою) решіткою або без неї.

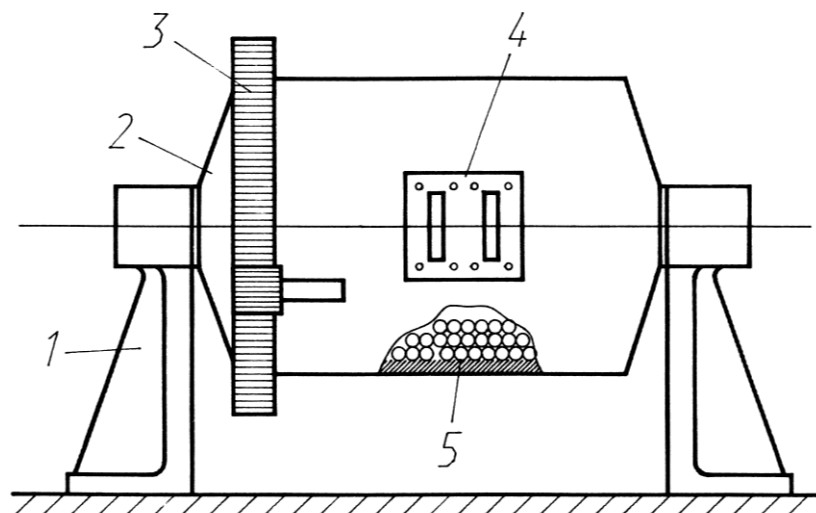
Однороторні дробарки поділяються на реверсивні, у яких напрям обертання ротора можна змінювати, та нереверсивні, що обертаються в один бік. Такий поділ аналогічний класифікації молоткових дробарок.

Роторні дробарки відзначаються потужними ударами, високою продуктивністю й універсальністю у використанні. Вони придатні для подрібнення полімерів, твердих пластмас, а також інших матеріалів із підвищеною міцністю.

#### 1.5.4 Барабанні млини

Для тонкого подрібнення матеріалів застосовують барабанні млини, які являють собою футерований броньовими плитами барабан, частково заповнений подрібнювальними тілами - кулями, стержнями або галькою [15]. Під час обертання барабану подрібнювальні тіла під дією відцентрової сили притискаються до його стінок, піднімаються на певну висоту і, падаючи, подрібнюють матеріал ударами. Одночасно в нижній частині барабану, під час перекочування тіл, відбувається додаткове стирання частинок.

У дрібносерійному виробництві та на дослідних установках використовують млини періодичної дії (рисунок 1.6). Завантаження та розвантаження матеріалу здійснюється через люк у стінці барабану. Такі млини часто поєднують процес подрібнення з іншими фізичними або хімічними операціями.



1 - опори; 2 - барабан; 3 - зубчастий привод; 4 - люк;  
5 - подрібнюючі тіла

Рисунок 1.6 – Схема барабанного млина для тонкого подрібнення матеріалів:

У промислових масштабах застосовують млини безперервної дії, які мають дві порожнисті цапфи: через одну подається вихідний матеріал, через іншу відбувається вивантаження продукту. Розвантаження може здійснюватися струменем води - при мокрому подрібненні, або струменем повітря - при сухому подрібненні. Подача рідини чи повітря відбувається через завантажувальну цапфу.

Для відділення подрібненого матеріалу від повітря чи води застосовують відстійники, циклони, фільтри або гідроциклони. Оскільки у продукті можуть міститися частинки, більші за заданий розмір, млини часто працюють у замкненому циклі з класифікуючими пристроями. Дрібні частинки виводяться як готовий продукт, а крупні повертаються на повторне подрібнення.

Діаметр барабанних млинів для сухого подрібнення може досягати 3,8 м при довжині 5,5 м, а для мокрого - відповідно 3,2 м і 3,1 м.

#### 1.5.5 Вібраційні млини

Схема вібраційного млина наведена на рисунку 1.7 [15].

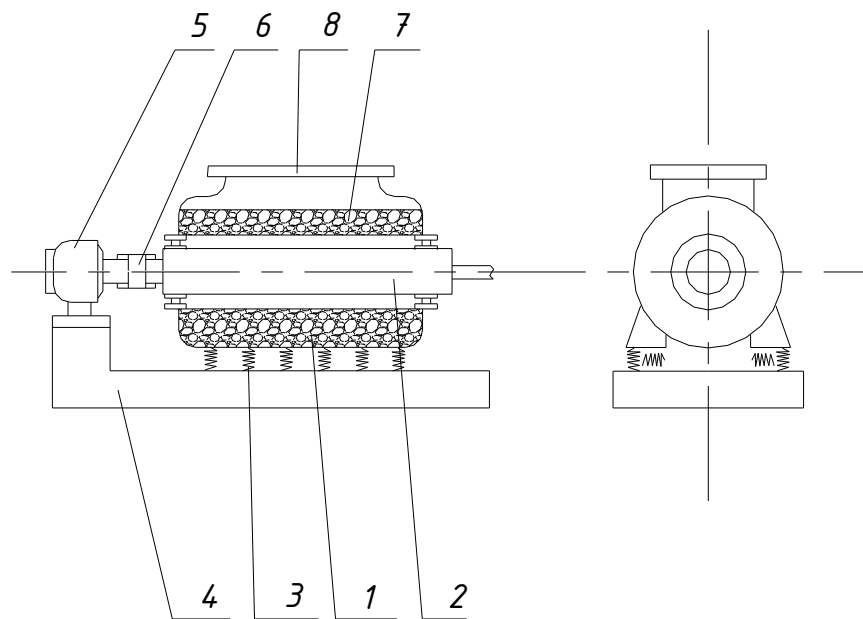
Для надтонкого подрібнення матеріалів застосовують вібраційні млини, які складаються з циліндричного корпусу, заповненого на 80–90 % об'єму металевими кулями та матеріалом, що подрібнюється. Корпус закріплений на валу з дебалансом, розташованим ексцентрично відносно осі обертання. Під час роботи млин вібрує, передаючи коливання кулям, що спричиняють інтенсивне подрібнення матеріалу завдяки частим ударам і стиранню.

Частота коливань відповідає швидкості обертання електродвигуна і становить 1000–3000 об/хв, амплітуда - 2–4 мм. Корпус спирається на пружини або дерев'яні бруски, а двигун з валом з'єднаний еластичною муфтою, що зменшує передавання вібрацій на фундамент і електропривід.

Вібраційні млини можуть працювати як у періодичному, так і в безперервному режимі. У безперервному режимі подача матеріалу (розмір частинок до 2–3

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

мм) і виведення готового продукту (частки не менше 60 мкм) здійснюються через спеціальні штуцери за допомогою струменя повітря.



1 - корпус; 2 - вібратор; 3 - опора; 4 - рама; 5 – електродвигун;  
6 - муфта; 7 - подрібнююча куля; 8 - люк

Рисунок 1.7 - Схема вібраційного млина:

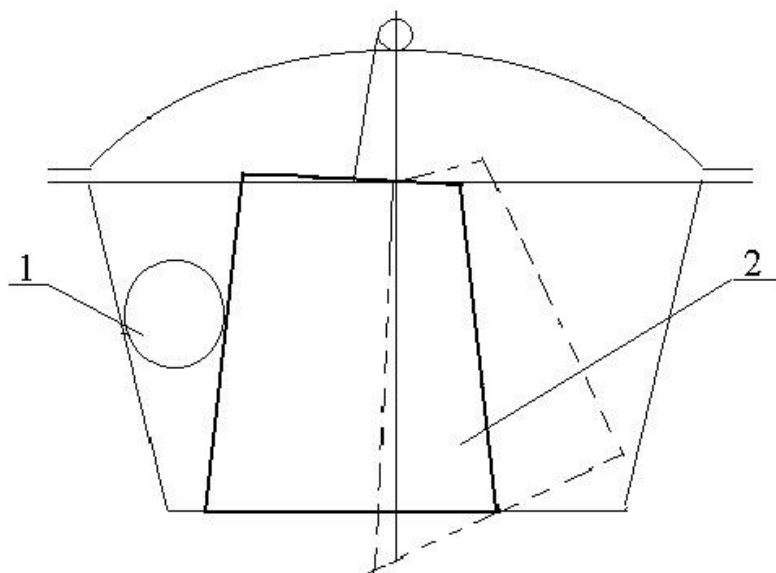
Попри високу тонкість подрібнення, такі млини мають певні недоліки - значний знос куль, низьку продуктивність, складні умови роботи підшипників і можливе перегрівання матеріалу. Об'єм робочої камери зазвичай не перевищує 1 м<sup>3</sup>, а потужність електродвигуна становить близько 75 кВт.

#### 1.5.6 Конусні дробарки

Схема подрібнення в конусній дробарці наведена на рисунку 1.8 [15].

Конусні дробарки застосовують для крупного, середнього та дрібного подрібнення матеріалів. Подрібнення відбувається в кільцевому просторі між нерухомою зовнішньою конічною чашею 1 (верхня частина станини) і рухомим подрібнювальним конусом, розташованим усередині неї. Конструкція та форма камери подрібнення залежать від призначення дробарки.

У дробарках крупного подрібнення усічений конус чаші розташований більшою основою вгору, тоді як у дробарках середнього та дрібного подрібнення - донизу. Подрібнювальний конус у всіх типах машин звернений великою основою вниз: у дробарках крупного подрібнення він має крутий профіль, а в середніх і дрібних - пологий, що забезпечує відповідний характер руйнування матеріалу.



1-конічна чаша; 2-робочий орган

Рисунок 1.8 – Схема подрібнення в конусній дробарці:

Основною відмінністю між дробарками різних ступенів подрібнення є величина ексцентриситету стакана, який визначає амплітуду коливань рухомого конуса. У дробарках крупного подрібнення ексцентриситет не перевищує 25 мм, тоді як у дробарках середнього та дрібного подрібнення він може сягати 100 мм і більше, що забезпечує інтенсивніше перемелювання матеріалу.

#### 1.6 Аналіз чинників, що впливають на процес подрібнення полімерних матеріалів

Процес подрібнення полімерних матеріалів є складним фізико-механічним явищем, на перебіг якого впливає велика кількість чинників, пов'язаних як із властивостями самого матеріалу, так і з конструкцією обладнання та режимом роботи

подрібнювача [15]. На відміну від традиційних мінеральних або кристалічних речовин, полімери мають в'язко-пружну структуру, здатність до значних деформацій без руйнування та істотну залежність своїх властивостей від температури. Це зумовлює специфічні особливості процесу подрібнення та потребує окремого аналізу впливових факторів.

Фізико-механічні властивості полімерного матеріалу. Одним із головних чинників, що визначає ефективність подрібнення, є структура та фізико-механічні властивості полімеру. Для аморфних полімерів (наприклад, полістиролу, ПВХ) характерна відносна крихкість, тому вони подрібнюються легше — за ударного або зрізального впливу. Частково кристалічні полімери (поліетилен, поліпропілен, поліаміди) мають більшу в'язкість і пружність, тому при подрібненні деформуються, поглинаючи частину енергії, що ускладнює процес руйнування.

Важливим параметром є температура склування ( $T_g$ ). Нижче цієї температури полімер переходить у крихкий стан, а вище - у в'язко-пружний, що значно знижує ефективність подрібнення. Тому для термопластів часто застосовують охолодження (криогенне подрібнення), коли матеріал стає крихким і легко руйнується під дією механічних навантажень.

На процес також впливають модуль пружності, твердість, густина, вміст наповнювачів, вологість і теплопровідність матеріалу. Наприклад, наявність мінеральних наповнювачів підвищує крихкість полімеру, полегшуючи подрібнення, тоді як підвищена вологість або пластифікація зменшує жорсткість і ускладнює процес.

Конструктивні параметри подрібнювального обладнання. Другу групу чинників становлять конструктивні особливості подрібнювачів - геометрія робочих органів, форма і розташування ножів або валків, кут атаки, розміри вихідної щілини, швидкість обертання ротора та маса ударних елементів.

Наприклад, у ножових подрібнювачах ефективність залежить від гостроти лез, кута різання та зазору між ножами. Надто малий зазор призводить до підви-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

щеного зношування, а надто великий - до зниження якості подрібнення. У роторних і молоткових дробарках важливу роль відіграють маса та швидкість руху робочих елементів, які визначають енергію удару.

Валкові дробарки характеризуються залежністю ефективності від діаметра валків, їх поверхневої шорсткості та зусилля притискання, тоді як у барабанних або вібраційних млинах ключовими параметрами є розмір і маса подрібнюючих тіл, частота обертання або коливань, ступінь заповнення барабана.

Технологічні режими подрібнення. До технологічних чинників належать швидкість обертання ротора, температура в робочій зоні, ступінь заповнення камери матеріалом, тривалість подрібнення, а також тип подачі матеріалу - безперервний або періодичний.

Висока швидкість обертання збільшує інтенсивність подрібнення, але водночас викликає нагрівання полімеру, що призводить до його розм'якшення, злипання частинок і зниження ефективності. Надто низька швидкість, навпаки, зменшує продуктивність і ступінь дисперсності. Оптимальний режим визначають експериментально, враховуючи властивості конкретного полімеру.

Температура у зоні подрібнення є одним із критичних параметрів: при перевищенні межі термостійкості можливе часткове плавлення або термічне руйнування полімеру. Тому подрібнювачі оснащують системами охолодження повітрям, водою або інертним газом.

Зовнішні та експлуатаційні чинники. Серед зовнішніх чинників важливими є вологість навколишнього повітря, температура середовища, стан робочих органів, знос ножів або валків, вібрації та стійкість до засмічення робочої камери. Зі зростанням зносу різальних елементів зменшується гострота леза, що погіршує якість подрібнення і збільшує енерговитрати.

Експлуатаційні параметри - коефіцієнт завантаження, режим подачі матеріалу, наявність системи пиловидалення - також впливають на рівномірність по-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

дрібнення та безпечність процесу. Нерівномірна подача або перевантаження подрібнювача можуть спричинити вібрації, перегрів та швидке зношування робочих органів.

Взаємозв'язок факторів і шляхи підвищення ефективності. Усі зазначені чинники взаємопов'язані. Наприклад, зміна температури впливає на пружність полімеру, що, у свою чергу, визначає оптимальну швидкість обертання або форму робочих елементів. Тому ефективність процесу подрібнення визначається комплексним урахуванням фізичних, конструктивних і технологічних параметрів.

Підвищення ефективності можливе шляхом: вибору раціонального режиму подрібнення (швидкість, температура, навантаження); застосування охолодження для крихких режимів подрібнення полімерів; оптимізації геометрії робочих органів; автоматичного контролю температури та струму споживання; використання комбінованих механізмів дії (удар + зріз + стирання).

Комплексний аналіз і оптимізація цих чинників дозволяють знизити енерговитрати, підвищити рівномірність гранулометричного складу продукту та забезпечити стабільну роботу обладнання при подрібненні полімерних матеріалів різної природи.

### 1.7 Висновки до першого розділу

У результаті аналізу встановлено, що процес подрібнення полімерних матеріалів є ключовим етапом їх підготовки до переробки та суттєво впливає на якість і собівартість готової продукції.

Розглянуто основні методи подрібнення - роздавлювання, розколювання, удар і стирання - та типи обладнання, що їх реалізують. Найпоширенішими у переробці полімерів є ножові, роторні, молоткові, дискові й вібраційні подрібнювачі, які поєднують кілька механізмів дії для досягнення високої дисперсності.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Проведено класифікацію обладнання, визначено їх конструктивні особливості, переваги й сфери застосування. Вибір конкретного типу подрібнювача залежить від фізико-механічних властивостей полімеру та вимог до готового продукту.

На основі теоретичних положень (законів Ріттінгера, Кіка, Бонда) показано, що енерговитрати на подрібнення визначаються зміною питомої поверхні частинок.

Встановлено, що на процес найбільше впливають температура, пружність і структура полімеру, швидкість обертання, геометрія робочих органів, режим охолодження та інші технологічні параметри. Надмірне нагрівання призводить до розм'якшення й злипання матеріалу, тому важливим є контроль температури та застосування охолодження.

Незважаючи на широкий досвід використання подрібнювачів, бракує експериментальних даних щодо впливу конструктивних і технологічних факторів на ефективність процесу. Це обґрунтовує необхідність створення експериментальної установки для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів, що стане базою для подальших наукових і практичних розробок.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБ- НЕННЯ ПОЛІМЕРІВ

### 2.1 Обґрунтування необхідності експериментальних досліджень і постано- вка задачі розробки установки

Одним із ключових етапів під час вибору технологічних режимів подрібнення полімерних матеріалів, а також під час проектування відповідного обладнання, є визначення технологічних зусиль, що виникають у процесі взаємодії робочих органів з матеріалом, і прогнозування фізико-хімічних змін, які при цьому відбуваються. Знання цих характеристик дозволяє правильно оцінити енерговитрати, забезпечити стабільність процесу та запобігти руйнуванню або перегріванню полімеру.

Особливо інтенсивні механічні деформації спостерігаються саме під час подрібнення у різних типах механічних пристроїв - ножових, роторних, дискових, валкових та вібраційних подрібнювачах. У цих умовах матеріал зазнає складної комбінації механічних впливів - стискання, розтягнення, зсуву, удару та тертя. Внаслідок цього відбувається не лише руйнування частинок, а й зміна фізико-хімічних властивостей полімеру: орієнтація макромолекул, часткове нагрівання, утворення нових поверхонь і дефектів структури.

Складність опису цих процесів полягає в тому, що під час подрібнення деформується не однорідне монолітне тіло, а полідисперсна суміш частинок різної форми, розміру та ступеня пружності. У результаті поведінка системи стає стохастичною, а її реологічні властивості змінюються залежно від дисперсного складу, температури, швидкості прикладення навантаження та умов тертя між частинками.

Такі складні взаємозв'язки практично неможливо адекватно описати аналітично лише теоретичними методами. Тому для отримання достовірних даних про закономірності деформування полімерів у процесі подрібнення необхідно

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

проводити експериментальні дослідження із використанням спеціалізованого стенду або лабораторної установки. Саме експериментально-статистичний підхід дозволяє встановити залежності між конструктивними параметрами подрібнювача, режимами навантаження, температурою та показниками ефективності процесу.

Розробка такої установки є важливою науково-практичною задачею, оскільки вона дозволить:

- досліджувати взаємодію робочих органів із полімерним матеріалом у різних режимах;
- вимірювати зусилля, швидкість подрібнення, енерговитрати та ступінь дисперсності продукту;
- вивчати вплив температури та швидкості обертання на характер руйнування частинок;
- отримувати експериментальні дані для побудови математичних моделей процесу подрібнення.

Таким чином, основною метою даного етапу роботи є розробка експериментальної установки, що забезпечить дослідження закономірностей процесу подрібнення полімерних матеріалів, визначення технологічних зусиль, енергетичних характеристик і впливу конструктивних параметрів на якість подрібнення. Отримані результати стануть основою для оптимізації реальних промислових подрібнювачів і підвищення ефективності переробки полімерних відходів.

## 2.2 Розробка технологічного процесу подрібнення полімерних матеріалів на установці, що розробляється

На рисунку 2.1 представлено технологічну схему процесу роботи установки для подрібнення полімерних матеріалів [16, 17]. Процес подрібнення відбувається послідовно в декілька основних етапів, кожен із яких має важливе значення для забезпечення точності експерименту та відтворюваності результатів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Першим етапом є завантаження стакану полімерним матеріалом. У робочу камеру установки поміщають попередньо підготовлену дозу полімерного матеріалу певного гранулометричного складу. Завантаження виконується вручну або за допомогою спеціальної воронки, що забезпечує рівномірний розподіл зразка по площі дна стакану.



Рисунок 2.1 – Технологічний процес подрібнення полімерних матеріалів на установці, що розробляється

На другому етапі здійснюється встановлення важеля та вантажів. Важільна система дозволяє створити необхідне осьове навантаження на шток через змінні вантажі, маса яких визначається попередніми розрахунками. Це навантаження моделює процес деформування матеріалу при різних тисках, що впливають на ефективність подрібнення.

Третім етапом є вмикання електричного двигуна, який через систему передач приводить у рух робочий вал зі змінним деформуючим елементом. Електродвигун забезпечує стабільну частоту обертання вала, що дає можливість досліджувати процес подрібнення при різних швидкісних режимах.

Далі відбувається робота установки протягом заданого часу. У цей період на зразок діють сили стискання, зсуву та тертя, які сприяють руйнуванню полімерних частинок. Процес триває до досягнення необхідного ступеня подрібнення, при цьому можуть реєструватися основні параметри - крутний момент, навантаження, час і температура в зоні подрібнення.

Останнім етапом є вивантаження подрібненого полімеру. Після завершення експерименту важелі знімаються, стакан розвантажується, а отриманий порошковий матеріал збирається для подальшого аналізу. Дослідження гранулометричного складу проводиться шляхом просіювання або оптичного аналізу, що дозволяє оцінити ефективність подрібнення.

Таким чином, технологічний процес роботи установки для подрібнення полімерів включає підготовку матеріалу, встановлення параметрів навантаження, активацію приводу, проведення процесу подрібнення та подальший аналіз отриманого продукту. Послідовність операцій забезпечує стабільність дослідів, контрольованість параметрів і точність визначення впливу різних факторів на процес руйнування полімерних матеріалів.

### 2.3 Розробка кінематичної схеми установки для дослідження процесу подрібнення

З метою проведення експериментальних досліджень процесу подрібнення полімерних матеріалів була розроблена та виготовлена спеціальна експериментальна установка, кінематична схема якої наведена на рисунку 2.2 [18-20].

Основним завданням установки є визначення залежностей між технологічними зусиллями, енергетичними параметрами та зміною гранулометричного

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

складу полімерного матеріалу під час його деформування і руйнування. Вона дозволяє проводити експерименти за різних умов навантаження, швидкості обертання, початкової дисперсності зразка та способу прикладення навантаження.

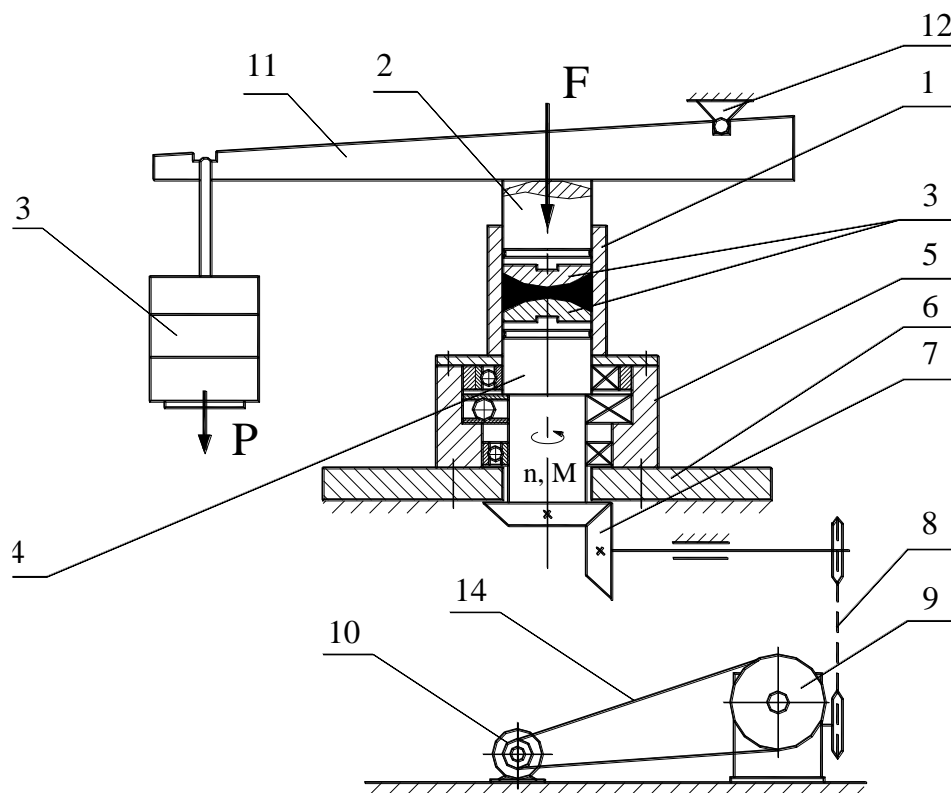


Рисунок 2.2 – Кінематична схема експериментальної установки для дослідження процесу подрібнення полімерів

Установка конструктивно складається з чотирьох основних вузлів:

- вузла деформування і подрібнення матеріалу,
- приводного механізму,
- механізму навантаження,
- системи вимірювання параметрів (на схемі не показана).

Основним робочим елементом є вузол деформування, який складається зі стакану 1, штока 2, валу 4 та змінних деформуючих елементів 3, що встановлюються на штоку та валу за допомогою шліцьових з'єднань. Така конструкція дозволяє змінювати тип робочого інструменту залежно від характеру досліджуваного процесу - стискання, зсуву, тертя або комбінованої дії.

Вал 4 обертається в корпусі 5, змонтованому на двох радіальних і одному упорному підшипнику, що забезпечує точність обертання та стабільність навантаження. Корпус підшипників надійно закріплено на опорній плиті 6, яка виконує роль несучої основи всієї установки.

Передача обертального руху до робочого органу здійснюється за допомогою багатоступеневої системи передач, що забезпечує зниження частоти обертання і збільшення крутного моменту.

Привід складається з:

- електродвигуна 10,
- клинопасової передачі 14,
- черв'ячного редуктора 9,
- ланцюгової передачі 8,
- відкритої конічної зубчастої передачі 7.

Така кінематична схема дозволяє отримати широкий діапазон робочих швидкостей обертання, що важливо для дослідження процесів подрібнення при різних інтенсивностях навантаження. Застосування черв'ячного редуктора забезпечує плавність ходу та можливість самогальмування, що підвищує безпеку під час експлуатації.

Для створення осьового тиску на зразок передбачено механізм навантаження, який складається з важеля 11, упору 12 та набору вантажів 13. Важільна система дозволяє плавно регулювати прикладене навантаження, а зміна маси вантажів забезпечує встановлення різних рівнів деформування матеріалу. При цьому навантаження передається на шток 2, який контактує з полімерним зразком, створюючи умови для його стискання або зсуву залежно від конфігурації деформуючих елементів.

Сила навантаження  $F$  визначається як добуток маси вантажів  $P$  на плечове співвідношення важеля, що дозволяє точно розрахувати прикладений тиск. Така система відзначається простотою, надійністю та високою точністю регулювання.

Експериментальна установка дозволяє:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- досліджувати вплив швидкості обертання, величини навантаження та температури на характер подрібнення полімерів;
- визначати зусилля деформування та крутний момент на валу;
- аналізувати зміну гранулометричного складу матеріалу після обробки;
- виявляти оптимальні режими подрібнення для різних типів полімерів.

Завдяки модульній конструкції установка може бути адаптована для різних типів випробувань - наприклад, вивчення тертя, зсуву або стирання полімерних матеріалів при різних температурах.

Таким чином, розроблена кінематична схема забезпечує комплексне дослідження процесу подрібнення полімерів у лабораторних умовах і створює передумови для подальшої розробки промислового обладнання з покращеними енергетичними та технологічними характеристиками.

#### 2.4 Принцип роботи установки для дослідження процесу подрібнення полімерів

Експериментальна установка призначена для дослідження процесів інтенсивного механічного впливу на полімерні матеріали в умовах, наближених до реальних технологічних режимів подрібнення. Її конструкція дає змогу регулювати основні параметри навантаження, швидкість обертання робочих органів, форму деформуючих елементів і, відповідно, керувати характером взаємодії зразка з інструментом. Це створює можливість отримати експериментальні залежності між параметрами деформування, енергетичними витратами та гранулометричним складом кінцевого продукту.

Перед початком досліду в стакан 1 (рис.2.2) робочої камери завантажуються певна доза полімерного матеріалу, попередньо підготовленого та класифікованого за фракційним складом. Вибір початкової дисперсності має важливе значення, адже вона визначає інтенсивність взаємодії частинок і величину контактних напружень у зоні деформування.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Після цього у стакан вставляється шток 2 із деформуючим елементом 3, який має змінну форму - конічну, плоску, зубчасту або рифлену - залежно від характеру дослідження. Змінність робочого профілю дозволяє моделювати різні типи навантаження: стискання, зсув, тертя чи їх комбінацію.

На опорний вузол установки монтується важіль 11, на кінець якого підвішуються вантажі 13. Комбінація мас вантажів визначає величину прикладеного тиску. Завдяки важільній системі створюється регульований осьовий тиск  $F$ , який діє на зразок через шток, забезпечуючи стабільне контактне навантаження в зоні подрібнення. Така схема забезпечує не лише плавне регулювання навантаження, а й можливість точного розрахунку сили деформування за допомогою важільного співвідношення.

Після підготовки зразка і встановлення навантаження запускається електродвигун 10, який через багатоступеневу систему передач (клинопасову, черв'ячну, ланцюгову та конічну) приводить у обертання вал 4. Передавальний механізм забезпечує необхідне зниження частоти обертання при збільшенні крутного моменту на виході, що дозволяє проводити дослідження в широкому діапазоні швидкостей.

Обертальний рух валу передається деформуючому елементу, який взаємодіє з полімерним матеріалом, розташованим у стакані. В результаті виникає комбінований процес деформування - частинки матеріалу піддаються одночасно дії стискання, зсуву, удару та стирання. При цьому між частинками та поверхнею інструмента утворюються локальні зони високих напружень, які сприяють руйнуванню зв'язків у структурі полімеру.

Матеріал деформується в умовах високого гідростатичного тиску, що створює сприятливі умови для пластичного зсуву та подрібнення без значного утворення тепла. Тривалість обробки задається фіксованим часом, що контролюється таймером або програмним блоком. Це дозволяє зберігати сталі умови випробувань і забезпечує відтворюваність результатів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

У ході експерименту проводиться вимірювання крутного моменту на валу 4. Для цього на корпусі установки встановлено тензометричний датчик, який змонтований на металевій пластині, жорстко з'єднаний із натяжним роликком ланцюгової передачі 8 (на схемі не показано). Під дією моменту опору, який виникає в процесі деформування, відбувається пружна деформація пластини, що сприймається тензорезисторами.

Отриманий електричний сигнал з тензодатчика надходить до підсилювача, а далі до аналого-цифрового перетворювача, після чого реєструється комп'ютером у цифровому вигляді. Програмне забезпечення дозволяє відображати результати у вигляді графіків залежностей моменту опору від часу, швидкості обертання або величини навантаження.

Таким чином, у процесі одного експерименту можливо зафіксувати:

- миттєве значення крутного моменту на валу;
- зусилля деформування;
- швидкість обертання деформуючого елемента;
- час впливу;
- температуру в зоні обробки (при необхідності за допомогою термометра).

Отримані дані дозволяють визначити енерговитрати на подрібнення і дослідити вплив різних факторів - форми інструмента, маси вантажів, швидкості обертання - на інтенсивність процесу.

Після завершення експерименту полімерний зразок виймається зі стакана та висушується (у разі вологого подрібнення). Отриманий продукт піддається granulometric analysis методом ступеневого просіювання, що дозволяє визначити розподіл частинок за розмірами. Для цього використовується набір стандартних сит із різними діаметрами отворів, крізь які послідовно пропускають порошок. Кожна фракція зважується, а результати заносяться в таблицю, за якою будується крива розподілу частинок.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Порівнюючи отримані дані з початковою дисперсністю зразка, можна визначити ступінь подрібнення і коефіцієнт диспергування, що є основними показниками ефективності процесу.

Конструкція установки дозволяє змінювати ключові параметри процесу, що робить її універсальним інструментом для дослідження поведінки різних типів полімерів:

Тиск у камері регулюється масою вантажів на важелі.

Швидкість обертання валу змінюється варіюванням передатного числа редуктора або частоти живлення двигуна.

Профіль деформуючих елементів вибирається відповідно до типу навантаження, що моделюється (удар, стирання, зсув тощо).

Температура процесу може підтримуватися стабільною або змінюватися за допомогою охолодження або підігріву робочої камери.

Тип і дисперсний склад матеріалу задаються заздалегідь, що дає можливість досліджувати поведінку різних полімерів - від еластомерів до термопластів.

Розроблена установка дозволяє моделювати процеси, що відбуваються в промислових подрібнювачах, але з можливістю точного контролю та реєстрації параметрів. Це забезпечує накопичення експериментально-статистичних даних, необхідних для:

- побудови емпіричних залежностей і математичних моделей подрібнення полімерів;
- визначення оптимальних режимів роботи обладнання;
- зменшення енерговитрат у промислових системах;
- розробки нових типів робочих органів із підвищеною ефективністю.

Таким чином, експериментальна установка є універсальним дослідницьким стендом, який поєднує механічну, вимірювальну та аналітичну підсистеми. Вона дозволяє комплексно досліджувати процес подрібнення полімерних матеріалів, враховуючи як механічні, так і фізико-хімічні чинники, що визначають поведінку полімерів під дією зовнішніх навантажень.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2.5 Конструктивні особливості основних вузлів установки

Експериментальна установка для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів має модульну конструкцію та складається з таких основних вузлів:

- привідного механізму;
- робочої камери (вузла деформування);
- важільної системи навантаження;
- системи вимірювання технологічних параметрів;
- набору змінних вантажів;
- несучої рамної конструкції.

Установка змонтована на міцній сталевій рамі, що забезпечує стійкість, зниження вібрацій та точне відтворення умов деформування при експериментах.

Привідний механізм (рисунок 2.3) слугує для створення обертального руху нижнього деформуючого елемента робочої камери. Привід складається з асинхронного електродвигуна потужністю 0,6 кВт, клинопасової передачі, черв'ячного редуктора та ланцюгової передачі.

Від електродвигуна обертання через ремінну передачу передається на вхідний вал редуктора, який знижує швидкість обертання до 0,2 об/с (12 об/хв) та забезпечує значне підвищення крутного моменту. Далі через ланцюгову й конічну передачі рух передається на вертикальний вал робочої камери.

Така схема дозволяє отримувати високі крутні моменти при невеликих швидкостях обертання, що необхідно для дослідження процесів подрібнення з високими питомими тисками. Елементи приводу закріплені на нижньому рівні рами, що зменшує центр ваги установки й забезпечує її стійкість під час роботи.

Робоча камера (рисунок 2.4) є основним функціональним елементом, у якому відбувається деформування полімерного матеріалу. Вона складається зі стакана, штока діаметром 30 мм, змінних деформуючих елементів, опорної плити та підшипникового вузла.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.3 – Вузол приводу установки

Шток передає осьове навантаження від важільної системи до зразка, який розміщений у стакані. Нижній деформуючий елемент обертається на валу, встановленому у корпусі з двома радіальними та одним упорним підшипником, що гарантує плавність руху та точність центрування.



Рисунок 2.4 – Робоча камера установки

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
46

Робоча камера забезпечує створення тиску до 120 кН, що дозволяє проводити дослідження в умовах, близьких до промислових процесів подрібнення. Матеріали вузлів підібрано з урахуванням підвищених вимог до міцності й зносостійкості.

Важільна система (рисунок 2.5) слугує для створення регульованого осьового тиску на шток. Вона складається з жорсткого сталевого важеля, опорного вузла, регульованого упору та набору змінних вантажів.



Рисунок 2.5 – Важільна система навантаження

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Один кінець важеля спирається на вісь, закріплену на корпусі установки, інший - має гак для підвішування вантажів. Положення важеля дозволяє змінювати співвідношення плечей, що забезпечує плавне регулювання навантаження.

Максимальне зусилля, яке створюється системою, становить до 120 кН, що достатньо для моделювання процесів інтенсивного стискання та зсуву полімерних матеріалів різної твердості.

Система вимірювання (рисунок 2.6) призначена для реєстрації крутного моменту на валу в процесі подрібнення. Основним елементом є тензометричний датчик, змонтований на пластині, що жорстко з'єднана з натяжним роликот ланцюгової передачі [21].

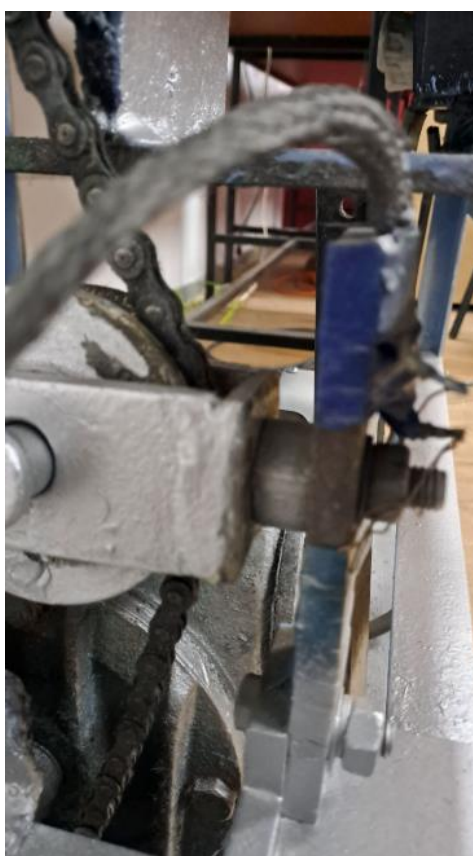


Рисунок 2.6 – Система вимірювання крутного моменту

Під час роботи, коли матеріал чинить опір обертанню деформуючого елемента, виникає деформація пластини, яка сприймається тензорезисторами. Сиг-

нал із датчика надходить до підсилювача, потім до аналого-цифрового перетворювача, і далі - до комп'ютера, де відбувається цифрова реєстрація моменту опору та розрахунок питомих енерговитрат.

Система має високу чутливість і дозволяє отримувати дані з точністю до  $\pm 1\%$  від вимірюваного значення.

Набір змінних металевих вантажів (рисунок 2.7) використовується для створення регульованого навантаження на важіль. Вантажі виконані у вигляді циліндрів із пазом для зручного підвішування. Їх маса варіюється в межах від 2 до 10 кг, що дозволяє змінювати навантаження в широкому діапазоні.

Завдяки комбінації декількох вантажів можна точно задавати необхідне навантаження до досягнення граничного зусилля 120 кН.



Рисунок 2.7 – Комплект змінних вантажів для створення навантаження

На рисунку 2.8 представлений загальний вигляд установки. Всі вузли закріплені на зварній сталевій рамі габаритами  $1200 \times 800 \times 1500$  мм. Рама має посилені поперечини та антивібраційні опори, що знижують динамічні навантаження під час роботи.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Маса установки без вантажів становить 165 кг, що забезпечує її стійкість навіть при роботі під великим тиском. Компактність конструкції дозволяє розміщувати установку у звичайних лабораторних умовах, а зручне розташування вузлів спрощує обслуговування та заміну елементів.



Рисунок 2.8 – Загальний вигляд експериментальної установки для дослідження процесу подрібнення полімерів

Отже, конструктивні особливості установки забезпечують високу точність регулювання параметрів, надійність роботи й можливість багаторазового повторення експериментів. Завдяки потужному приводу, точній важільній системі та вимірювальному комплексу установка дозволяє ефективно вивчати закономірності процесів подрібнення полімерних матеріалів різних типів і властивостей.

## 2.6 Технічні характеристики експериментальної установки

Експериментальна установка для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів розроблена з урахуванням необхідності забезпечення високих зусиль деформування при відносно низьких швидкостях обертання. Такий підхід

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

дозволяє моделювати реальні умови подрібнення полімерів у промислових дробарках та млинах, але з точним контролем параметрів і можливістю реєстрації експериментальних даних.

Конструкція установки забезпечує стабільну роботу в режимах високого тиску та низької швидкості зсуву, що дозволяє уникати надмірного нагрівання полімерного матеріалу та забезпечує достовірність експериментальних результатів.

Основні технічні характеристики установки наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики установки

№ п/п	Параметр	Позначення	Значення
1	Потужність електродвигуна	$P$	0,6 кВт
2	Частота обертання валу	$n$	0,2 об/с ( $\approx 12$ об/хв)
3	Максимальне зусилля на штокові	$F_{max}$	120 кН
4	Діаметр штока	$d$	30 мм
5	Габаритні розміри установки	$L \times B \times H$	1200 × 800 × 1500 мм
6	Маса без вантажів	$m$	165 кг

Аналіз технічних параметрів.

1. Потужність електродвигуна (0,6 кВт) забезпечує достатній запас енергії для обертання робочих органів у режимі інтенсивного навантаження. Такий показник дозволяє підтримувати сталу швидкість навіть при зміні властивостей матеріалу чи збільшенні сили тертя в зоні деформування.

2. Частота обертання валу (0,2 об/с) відповідає низькошвидкісному режиму, який є оптимальним для дослідження полімерних матеріалів, оскільки запобігає перегріванню зразка й дозволяє фіксувати зміну моменту опору в реальному часі.

3. Максимальне зусилля на штокові (120 кН) забезпечує можливість дослідження поведінки полімерів під дією великих стискальних і зсувних навантажень. Це дає змогу імітувати роботу промислових подрібнювачів і пресів, а також вивчати вплив тиску на зміну структури матеріалу.

4. Діаметр штока (30 мм) обрано виходячи з умови забезпечення міцності та жорсткості при передаванні зусиль без втрат точності. Поверхня штока має високу чистоту обробки, що знижує втрати на тертя та зношування ущільнювальних елементів.

5. Габаритні розміри установки (1200 × 800 × 1500 мм) забезпечують зручність розміщення у лабораторії та дозволяють оператору легко отримувати доступ до всіх основних вузлів під час підготовки або обслуговування.

6. Маса установки без вантажів (165 кг) гарантує її стійкість при роботі під навантаженням і знижує рівень вібрацій. Конструкція рами виконана зі сталевих профілів, що забезпечують жорсткість і тривалий термін експлуатації.

Експлуатаційні можливості установки.

Завдяки технічним характеристикам установка забезпечує:

- моделювання процесів подрібнення та інтенсивного деформування полімерних матеріалів при різних режимах навантаження;
- отримання експериментальних залежностей між енерговитратами, гранулометричним складом і механічними властивостями зразків;
- регулювання основних параметрів (тиску, швидкості обертання, форми деформуючого елемента);
- високий рівень точності вимірювань і повторюваність результатів.

Таким чином, за своїми технічними параметрами установка є універсальною лабораторною системою для дослідження процесів механічного подрібнення

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

полімерних матеріалів у контрольованих умовах, а її компактність, потужність і стабільність роботи роблять її придатною як для навчальних, так і для науково-дослідних цілей.

## 2.7 Робочі органи для подрібнення полімерів

Робочі органи є основними елементами експериментальної установки, безпосередньо відповідальними за реалізацію процесу механічного впливу на полімерний матеріал. Вони забезпечують перетворення обертального руху приводу у деформування та подрібнення зразка за рахунок дії сил стискання, зсуву, тертя або їх комбінації.

На рисунку 2.9 представлено комплект змінних робочих органів, виготовлених у вигляді металевих циліндрів із центральним пазом, який використовується для їх фіксації на валу або штоку за допомогою шпонкового з'єднання. Така конструкція забезпечує надійну передачу крутного моменту без провертання та дозволяє легко замінювати робочі елементи залежно від типу експерименту.



Рисунок 2.9 – Робочі органи для подрібнення полімерів

Конструкція та матеріал виготовлення.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		53

Кожен робочий орган являє собою стальний циліндр діаметром 30 мм, що відповідає діаметру штока установки. Поверхня циліндрів має високу точність обробки, що забезпечує рівномірність навантаження на полімер під час обертання.

Виготовлення здійснено із вуглецевої або конструкційної сталі підвищеної твердості (наприклад, Ст45 або 40Х), що має достатню міцність для роботи під тиском до 120 кН і стійкість до стирання при контакті з полімером.

На робочих поверхнях деяких елементів передбачено різні профілі (гладкий, рифлений, шорсткий), що дозволяє відтворювати різні режими деформування:

- гладкі поверхні застосовуються для дослідження стискання та зсуву без додаткового тертя;
- рифлені або насічені – для моделювання процесів стирання або інтенсивного подрібнення;
- комбіновані профілі – для одночасної дії сил тертя, зсуву та руйнування частинок.

Принцип роботи робочих органів.

Під час роботи установки нижній циліндричний елемент обертається разом із валом, тоді як верхній залишається нерухомим і створює тиск на полімерний зразок через шток. У зоні контакту матеріал зазнає складної дії — компресійного тиску та зсувних навантажень, що призводять до його руйнування, утворення тріщин і зменшення розміру частинок.

Завдяки змінній конструкції робочих елементів установка дозволяє проводити експерименти з різними типами полімерів (термопластами, еластомерами, композитами), а також оцінювати вплив геометрії інструмента на ефективність процесу подрібнення.

Переваги змінних робочих органів:

- універсальність. Можливість швидкої заміни елементів дозволяє досліджувати різні режими подрібнення без демонтажу всієї системи;

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- надійність фіксації. Пазове з'єднання запобігає проковзуванню при великих моментах;
- тривалий ресурс роботи. Завдяки високій твердості сталі робочі органи зберігають форму навіть після багаторазового використання;
- висока повторюваність експериментів. Стандартизовані розміри та форма забезпечують стабільність умов під час серійних досліджень.

Таким чином, змінні робочі органи виконують ключову роль у моделюванні процесів подрібнення полімерних матеріалів. Їх конструкція дає змогу регулювати характер механічного впливу на зразок, забезпечуючи універсальність і надійність експериментальної установки.

## 2.8 Розробка електричної схеми установки для подрібнення полімерних матеріалів

На рисунку 2.10 наведено розроблену електричну принципову схему установки для подрібнення полімерних матеріалів [23].

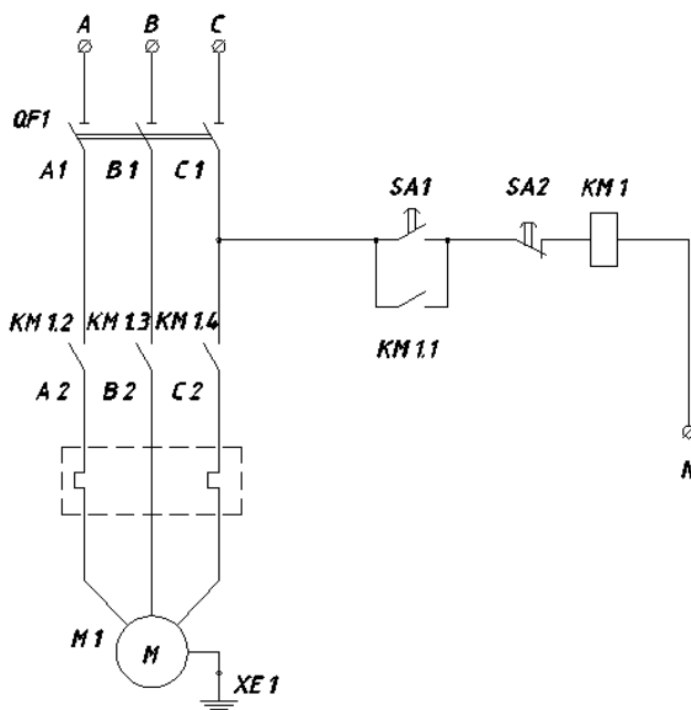


Рисунок 2.10 – Електрична схема установки для подрібнення полімерних матеріалів

Вона забезпечує запуск, зупинку та електричний захист трифазного асинхронного електродвигуна, який є основним приводом робочого вузла установки. Схема побудована за класичним принципом керування електродвигуном через магнітний пускач і містить основні елементи: автоматичний вимикач QF1, магнітний пускач KM1, кнопки керування SA1 і SA2, а також двигун M1.

Живлення установки здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В, яка подається на автоматичний вимикач QF1. Цей елемент виконує подвійну функцію - захищає схему від коротких замикань і перевантажень, а також дозволяє вручну знеструмлювати установку. Вихідні клеми автомата з'єднані із силовими контактами магнітного пускача KM1, який подає напругу на обмотки двигуна M1.

Керування пускачем здійснюється за допомогою кнопкової станції, що складається з кнопок «Пуск» SA1 і «Стоп» SA2 (рис.2.11). При натисканні кнопки «Пуск» SA1 живлення подається на котушку пускача KM1, яка замикає свої силові контакти й подає трифазний струм на двигун M1. Після цього допоміжний контакт KM1.1 утримує коло в замкненому стані — це так зване «самопідхоплення», що дозволяє двигуну працювати без необхідності постійно утримувати кнопку. Для зупинки двигуна натискається кнопка «Стоп» SA2, яка розриває коло живлення котушки пускача, внаслідок чого головні контакти розмикаються, і двигун вимикається.

Силове коло двигуна складається з трьох фаз А, В, С, які через контакти пускача KM1 подаються безпосередньо на обмотки двигуна M1. Електричне заземлення здійснюється через роз'єм XE1, що забезпечує безпеку роботи оператора. У схемі також передбачена можливість підключення теплового реле або запобіжників для додаткового захисту від перевантаження.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.11 – Кнопкова станція керування пускачем

Завдяки такій структурі схема забезпечує просте і надійне керування електродвигуном, має високий рівень захисту, не вимагає складного технічного обслуговування та може бути легко адаптована для подібних лабораторних установок. Вона повністю відповідає вимогам електробезпеки і є типовим рішенням для малопотужних систем із трифазним приводом.

## 2.9 Висновки до другого розділу

У другому розділі розроблено та описано експериментальну установку для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів, призначену для визначення впливу технологічних і конструктивних параметрів на ефективність подрібнення.

Розглянуто принцип дії установки, конструктивну схему та основні вузли – робочу камеру, привід, важільну систему навантаження, вимірювальний комплекс і робочі органи. Встановлено, що застосована схема дозволяє відтворювати

умови інтенсивного деформування полімерів у лабораторних умовах при тисках до 120 кН і частоті обертання 0,2 об/с.

Визначено технічні характеристики установки, що забезпечують стабільну роботу, точне регулювання навантаження та можливість дослідження полімерів різного типу.

Розроблені змінні робочі органи забезпечують варіативність режимів подрібнення та дозволяють вивчати вплив форми інструмента на дисперсність продукту.

Отримані технічні рішення створюють основу для проведення експериментальних досліджень, аналізу енергетичних витрат процесу подрібнення та оптимізації конструкцій подрібнювального обладнання для полімерних матеріалів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ПОЛІМЕРІВ

### 3.1 Мета і вихідні припущення розрахунків

#### 3.1.1. Мета розрахунків

Мета цього розділу - підтвердити працездатність і безпечність експериментальної установки для подрібнення полімерів на заданих режимах роботи, а також кількісно оцінити запас міцності й енергетичні можливості вузлів. Результати використовуються для:

- вибору раціональних режимів (навантаження, швидкість, час впливу);
- обґрунтування конструктивних рішень (параметри штока, валів, вузлів тертя);
- планування експериментів і калібрування вимірювальної системи.

#### 3.1.2. Об'єкти аналізу

Перевірці підлягають:

- енергетика приводу (кутова швидкість, крутний момент, вплив ККД передач);
- шток і робоча камера (стиснення, стійкість від поздовжнього вигину);
- контакт «інструмент–полімер» (достатність моменту зсуву/тертя);
- важільна система (зв'язок маси вантажів і осьового зусилля);
- тепловий режим зразка (орієнтовний нагрів під час досліду).

За наявності додаткових геометричних даних виконуються перевірки валів, шпонок, підшипників та передач.

#### 3.1.3. Вихідні дані

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Потужність електродвигуна  $P=0,6$  кВт.

Частота обертання вихідного вала  $n=0,2$  об/с (12 об/хв).

Максимальне зусилля на штокові  $F_{\max}=120$  кН.

Діаметр штока  $d=30$  мм.

Габарити установки  $1200 \times 800 \times 1500$  мм; маса без вантажів 165 кг.

Матеріали (прийнято): конструкційна сталь для штока ( $\sigma_y=350-400$  МПа,  $E=210$  ГПа)

Коефіцієнт тертя «сталь–полімер» для різних зразків (робочий діапазон)  $\mu=0,15 \dots 0,35$ .

Орієнтовний зведений ККД приводу  $\eta_{\Sigma}=0,65 \dots 0,75$  (ремінь + черв'як + ланцюг + конічна передача).

### 3.1.4. Допущення і межі застосовності

1. Навантаження на шток квазістатичне, концентровано прикладене; ексцентриситет незначний (за потреби вводиться поправка).
2. Деформації елементів у межах пружності; пластичні деформації не допускаються.
3. Становлення режиму відбувається швидко; розрахунки виконують для усталеного стану.
4. Температурні ефекти враховуються грубою оцінкою енергетичного нагріву (точніші розрахунки - за результатами температурних вимірювань).
5. Для перевірки стійкості штока використовується формула Ейлера з коефіцієнтом закріплення ККК відповідно до реальної схеми (консоль/шарнір).
6. Для контакту «інструмент–полімер» застосовується спрощена модель  $T_{\text{тр}}=\mu F R_{\text{eq}} T$  з еквівалентним радіусом зсуву.

### 3.1.5 Критерії працездатності

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Енергетика. Доступний крутний момент на інструменті  $T_{\text{інст}} = \eta \Sigma P / \omega$  має бути  $\geq$  моменту, потрібному для зсуву матеріалу  $T_{\text{потр}} \leq \mu F R_{\text{еқ}}$ .

Міцність штока:  $\sigma_c = F / A \leq \sigma_{\text{доп}}$  з запасом  $n_\sigma \geq 2$  (для статичного навантаження).

Стійкість штока:  $P_{\text{ст}} / F \geq n_{\text{ст}}$  (рекомендовано  $n_{\text{ст}} \geq 1,5$ ).

Тепловий режим:  $\Delta T$  за час досліду не перевищує допустимого інтервалу щодо  $T_g$  полімеру (без злипання/оплавлення).

Важіль/вантажі: забезпечують потрібний діапазон  $F$  без перевищення граничних прогинів і контактних напружень у вузлах.

### 3.1.6 Методика виконання розрахунків [23-25]

1. Обчислення  $\omega$ , базового  $T$  і робочого  $T_{\text{інст}}$  з урахуванням ККД.
2. Перевірка стискання штока: площа, напруження, запас.
3. Перевірка стійкості штока: критична сила Ейлера, вплив довжини та закріплення.
4. Порівняння моментів: вимога  $T_{\text{інст}} \geq \mu F R_{\text{еқ}}$  визначення мінімального  $R_{\text{еқ}}$  для заданих  $F$ ,  $\mu$ .
5. Оцінка питомих енерговитрат  $E_{\text{уд}} = Pt/m$  для планованих мас/тривалостей.
6. Розрахунок мас вантажів за геометрією важеля  $m_v = FL_{\text{ш}} / (gL_B)$ .
7. Перевірки валів, шпонок, підшипників — після уточнення реальних розмірів і типорозмірів.

### 3.1.7 Невизначеності та їх урахування

ККД приводу: приймається інтервал  $\eta_\Sigma = 0,65 \dots 0,75$ ; у висновках використовують «гірший» випадок.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт тертя  $\mu$ : залежить від полімеру, шорсткості та температури; у розрахунках на достатність моменту перевіряються сценарії  $\mu=0,15;0,20;0,30$

Ефективна довжина штока  $L$ : визначається компоновкою і наявністю на-  
прямних; для гарантії стійкості береться запас  $n_{st} \geq 1,5$

Тепловиділення: частка дисипації  $\eta_{дис}$  приймається  $0,2-0,5$ ; температуру контролюють експериментально.

### 3.2 Енергетичні параметри приводу

Кутова швидкість:

$$\Omega = 2\pi n = 2\pi \cdot 0,2 = 1,257 \text{ рад/с.} \quad (3.1)$$

Крутний момент на виході приводу:

$$T = P/\omega = 600/1,257 \approx 4,77 \times 10^2 \text{ Н} \setminus M = 477 \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (3.2)$$

Отримане значення - це безперервно доступний момент на робочому ор-  
гані за умови, що сукупний ККД передач близький до 1. Якщо врахувати реальний  
ККД приводу (ремінь + черв'як + ланцюг + конічна передача), наприклад  $\eta_{\Sigma} \approx 0,7$ ,  
то на інструменті очікувано буде:

$$T_{инст} \approx \eta_{\Sigma} T \approx 0,7 \cdot 477 \approx 334 \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (3.3)$$

Це значення слід використовувати для «гіршого» випадку.

### 3.3 Перевірка штока на напруження стиску та запас міцності

Площа перерізу штока  $d=0,03$  м:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$A=\pi d^2/4=\pi\cdot 0,03^2/4\approx 7,07\times 10^{-4}\text{ м}^2. \quad (3.4)$$

Нормальні напруження при  $F = 120$  кН:

$$\sigma_c=F/A=120000/7,07\times 10^{-4}\approx 170\text{ МПа}. \quad (3.5)$$

Для конструкційної сталі з границею текучості  $\sigma_y\approx 350\text{--}400$  МПа запас міцності:

$$n_\sigma=\sigma_y/\sigma_c\approx 350/170\approx 2,1. \quad (3.6)$$

Запас прийнятний для статичного навантаження. За циклічного режиму або підвищеної температури бажано мати запас  $\geq 2,5$ . Цього можна досягти або зменшенням робочого максимуму зусилля, або збільшенням діаметра/введенням напрямних, що знижують ексцентриситет.

### 3.4 Стійкість штока від поздовжнього вигину (Ейлер)

Момент інерції круга:

$$I=\pi d^4/64=\pi 0,03^4/64\approx 3,98\times 10^{-8}\text{ м}^4. \quad (3.7)$$

Критична сила:

$$P_{cr}=\pi^2 EI/(KL)^2, E\approx 210\text{ ГПа}. \quad (3.8)$$

Отримуємо формулу:

$$P_{cr}\approx 8,25\times 10^4/(KL)^2\text{ Н}.$$

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для шарнірного закріплення ( $K=1$ ): щоб  $P_{cr} \geq 120 \text{ кН} \rightarrow L \leq 0,829 \text{ м}$ .

Для консолі ( $K=2$ ):  $L \leq 0,414 \text{ м}$ .

У практиці приймають запас стійкості  $n_{st} = P_{cr}/F \geq 1,5$ .

Тоді допустимі довжини:  $L \leq 0,68 \text{ м}$  ( $K=1$ ) або  $L \leq 0,34 \text{ м}$  ( $K=2$ ). Якщо фактична вільна довжина більша — слід застосувати напрямні/муфти, що зменшують ефективну довжину, або збільшити діаметр штока.

### 3.5 Перевірка достатності моменту тертя в зоні контакту

Максимальний момент, який може бути реалізований у робочому контакті:

$$T_{тр} = \mu F R_{eq}, \quad (3.9)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя «полімер–інструмент»,  $R_{eq}$  - еквівалентний радіус дії сил зсуву.

Для забезпечення роботи без зриву ковзання потрібно  $T_{тр} \geq T_{інст}$

Потрібний еквівалентний радіус

$$R_{eq} = T_{інст} / \mu F. \quad (3.10)$$

Підставимо  $T_{інст} = 334 \text{ Н}\cdot\text{м}$  (з урахуванням ККД),  $F = 120 \text{ кН}$ :

за  $\mu = 0,30 \rightarrow R_{eq} \approx 334 / (0,30 \cdot 120000) \approx 9,3 \text{ мм}$ ;

за  $\mu = 0,20 \rightarrow R_{eq} \approx 13,9 \text{ мм}$ ;

за  $\mu = 0,10 \rightarrow R_{eq} \approx 18,6 \text{ мм}$ ;

Потрібні радіуси сумісні з геометрією робочої зони (діаметр штока 30 мм), отже привід має достатній момент навіть для «слизьких» полімерів ( $\mu \approx 0,15$ ). Для підвищення інтенсивності зсуву можна застосовувати рифлення/насічку інструмента (підвищення  $\mu$ ).

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

### 3.6 Питомі енерговитрати на подрібнення

Енергія, спожита за експеримент:

$$W=Pt. \quad (3.11)$$

Питома енергія на масу проби  $m$ :

$$E_{уд}=W/m=Pt/m=600t/m \text{ Дж/кг} \quad (3.12).$$

При  $t=60$  с,  $m=0,20$  кг отримаємо:

$$E_{уд}=600 \cdot 60 / 0,20 = 180 \text{ кДж/кг}. \quad (3.13)$$

### 3.7 Підбір маси вантажів важільної системи

Навантаження на шток:

$$F=m_B g(L_B/L_{ш}), \quad (3.14)$$

де  $m_B$  - сумарна маса вантажів,  $L_B$  - плече до вантажів,  $L_{ш}$  - плече до точки прикладання сили на шток.

Потрібна маса:

$$m_B = F L_{ш} / g L_B. \quad (3.15)$$

Розрахунок мас вантажів для умов  $L_B=1,6$  м,  $L_{ш}=0,1$  м.

Отже, 1 кг вантажів створює  $\approx 156,96$  Н (0,157 кН) на шток.

Розраховані значення зведено в таблицю 3.1.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Значення розрахованих мас

№	Потрібне зусилля F, кН	Маса вантажів, m <sub>в</sub> кг
1	5	25,52
2	10	51,04
3	15	102

### 3.8 Оцінка теплового режиму зразка

Частка потужності, що переходить у тепло зразка:  $\eta_{\text{дис}}$  (типово 0,2–0,5).

Підвищення температури за час t:

$$\Delta T \approx \eta_{\text{дис}} P t / m c_p, \quad (3.16)$$

де  $c_p$  - теплоємність полімеру ( $\approx 1400\text{--}2000$  Дж/(кг·К)).

При  $\eta_{\text{дис}}=0,3$ ,  $t=60$  с,  $m=0,20$  кг,  $c_p=1500$ :

$$\Delta T \approx 0,3 \cdot 600 \cdot 60 / 0,2 \cdot 1500 = 36 \text{ С.}$$

### 3.9 Висновки до третього розділу

У третьому розділі проведено розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність експериментальної установки для подрібнення полімерних матеріалів.

Визначено, що привід потужністю 0,6 кВт забезпечує крутний момент до 477 Н·м, чого достатньо для реалізації процесу деформування полімерів при низьких швидкостях обертання.

Розрахунок штока діаметром 30 мм показав напруження стиску 170 МПа, що забезпечує запас міцності близько двох разів. Перевірка на стійкість підтвердила відсутність втрати форми при робочій довжині до 0,4–0,8 м.

Механічна схема установки забезпечує достатній момент тертя при коефіцієнті  $\mu = 0,15-0,30$  і радіусах контакту 10–20 мм. Для створення навантаження 120 кН при співвідношенні плечей 1,6 : 0,1 потрібна маса вантажів близько 102 кг.

Розрахунки питомих енерговитрат ( $\approx 180$  кДж/кг) і теплового підвищення ( $\approx 35$  °С) підтвердили енергоефективність і стабільність процесу.

Отже, конструкція установки є працездатною, надійною та придатною для проведення експериментальних досліджень процесу подрібнення полімерів у широкому діапазоні режимів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано повний комплекс досліджень, спрямованих на розробку та обґрунтування конструкції установки для дослідження процесу подрібнення полімерних матеріалів. Проведено аналітичний огляд існуючих технологічних процесів і обладнання для подрібнення полімерів у легкій промисловості, визначено основні недоліки промислових подрібнювачів, такі як високі енерговитрати, низький коефіцієнт корисної дії та відсутність глибоких теоретичних досліджень у цій галузі. На основі аналізу встановлено, що ефективність подрібнення полімерів значною мірою залежить від конструктивних параметрів обладнання, режимів навантаження та фізико-механічних властивостей матеріалу.

У другому розділі роботи розроблено кінематичну та електричну схеми експериментальної установки, яка дозволяє відтворювати процеси інтенсивного деформування та подрібнення полімерних матеріалів у контрольованих умовах. Встановлено основні конструктивні вузли установки - привід, робочу камеру, важільну систему навантаження, вимірювальний комплекс і змінні деформуючі елементи. Проведено аналіз принципу роботи установки, визначено можливості зміни параметрів тиску, швидкості зсуву та геометрії робочих органів. Розроблено електричну схему керування, що забезпечує безпечну роботу приводу, захист від перевантажень і зручність експлуатації.

У третьому розділі здійснено розрахунки, які підтвердили працездатність конструкції установки. Визначено основні навантаження на шток, моменти, що передаються на вал, енергетичні характеристики приводу та параметри важільної системи. Розрахункові результати показали, що всі елементи установки мають достатній запас міцності, а механічна система здатна забезпечити необхідне зусилля деформації до 120 кН при мінімальних енерговитратах. Підтверджено, що обрана конструкція є ефективною, надійною і відповідає умовам проведення експериментальних досліджень.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Розроблена експериментальна установка дозволяє проводити дослідження впливу конструктивних і технологічних параметрів на процес подрібнення полімерних матеріалів, визначати закономірності зміни гранулометричного складу залежно від навантаження, часу та швидкості деформації. Отримані результати можуть бути використані для подальшого удосконалення промислового обладнання, розробки енергоефективних технологій переробки полімерів та оптимізації процесів утилізації відходів у легкій промисловості.

Таким чином, виконана магістерська робота має теоретичне та практичне значення, оскільки створена установка є універсальною експериментальною базою для дослідження закономірностей подрібнення полімерних матеріалів і може бути використана для розробки нових вискоефективних технологічних рішень у сфері переробки полімерних відходів.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Другий том збірника тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології». Дніпро. – 2019. – Т. II. – 138 с.

2. Гурин В.А., Врстріков В.П., Кузьмич Л.В. Основи промислових технологій і матеріалознавства: навч. посібник. – Рівне: НУВГП, 2019. – 310с.

3. Сталінська І. В. Технології переробки та утилізації відходів : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища / І. В. Сталінська, О. В. Хандогіна ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 152 с.

4. Мікульонок І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія. – К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. – 265 с.: іл. – Бібліогр.: с. 239–262.

5. Стан легкої промисловості в Україні: виклики та перспективи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hub.kyivstar.ua/articles/stan-legkoji-promislovosti-v-ukrayini-vikliki-ta-perspektivi>.

6. Властивості та застосування полімерів. Де використовуються пластмаси? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.products.pcc.eu/uk/blog/%D0%B2%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96-%D1%82%D0%B0-%D0%B7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%81%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%96%D0%BC%D0%B5%D1%80/>.

7. Переробка пластику [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BA%D0%B0\\_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D1%83](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BA%D0%B0_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D1%83).

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

8. Кожухар В.Я. Методи очистки та переробки викидів та відходів : навчальний посібник / В.Я. Кожухар, В.В. Брем, І.В. Дмитренко, Л.В. Тимошевська. Одеса: ОП, 2021. - 222 с.

9. Конспект лекцій до розділу «Механічні процеси» з курсу —Процеси та апарати хімічних виробництв» для студентів III-IV курсів механічних спеціальностей / Укл. С.О. Опарін. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2012. – 112 с.

10. Закономірності процесу подрібнення матеріалів. Організація процесу подрібнення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/13461856/page:7/>.

11. Відповідно до закону Рітгінгера [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/b8b0418d-3a28-447a-b8cb-d9dd4b3292e9/content>

12. Механічні процеси. Подрібнення твердих матеріалів. Класифікація і сортування матеріалів. Змішування твердих матеріалів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2021/02/Processes-and-apparatus-of-chemical-productionLecture12.pdf>

13. Підвищення ефективності процесу подрібнення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/7645/1/1.pdf>.

14. Аналіз способів подрібнення та визначення витрат енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/tsapk\\_2/page19.html](https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/tsapk_2/page19.html).

15. Місяць В.П. Розвиток наукових основ проектування обладнання для подрібнення відходів термопластичних і гумових матеріалів тегкої промисловості. Дисертація на здобуття наукового ступеня д.т.н. – Київ, 2007.

16. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Інжиніринг паковань та пакувального обладнання» спеціальності 131 «Прикладна механіка» та «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / І. О. Мікульонок. 2-ге вид., переробл. та доповн. ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. –

Електронні текстові дані (1 файл: 7,21 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 292 с. – Бібліогр.: с. 287–288.

17. Суберляк О.В., Баштанник П.І. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. – Київ.: 2006. - 270 с.

18. Переробка відходів гуми та термопластичних матеріалів: монографія/[О.П.Бурмістенков, В.П. Місяць, І.В. Панасюк, Б.М. Злотенко]. –К.: Кафедра,2012. – 240 с/

19. Мікульонок І.О., Радченко Л.Б. Переробка вторинної сировини екструзією.К.:ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2006. - 184 с.

20. Синюк О.М. Наукові основи проектування обладнання для переробки полімерних відходів у виробі легкої промисловості : автореф. дис. ...д-ратехн. наук : 05.05.10 / О. М. Синюк. – Київ : ХНУ, 2018. – 44с.

21. Тензодатчики. Загальні відомості та принцип роботи. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://asvik.kiev.ua/ua/articles/5>.

22. Схеми підключення трифазних електродвигунів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://xn--80addceesnhi0axzh6mb.com.ua/ua/news/?ELEMENT\\_ID=343&srsltid=AfmBOorWxutjEhcTMcKd\\_SYHR9NHIRI-ak3G9WW8Obx5yY\\_GCva2s5NS](https://xn--80addceesnhi0axzh6mb.com.ua/ua/news/?ELEMENT_ID=343&srsltid=AfmBOorWxutjEhcTMcKd_SYHR9NHIRI-ak3G9WW8Obx5yY_GCva2s5NS).

23. Деталі машин і основи конструювання : конспект лекцій / укладач В. В. Стрелец. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 150 с.

24. Деталі машин : підручник / [Міняйло А.В., Тіщенко Л.М., Мазоренко Д.І. та ін.]. – К. : Агроосвіта, 2013. – 448 с.

25. Деталі машин [Текст]: навч. посібник : рекомендовано МОН України / І.І. Мархель. - К. : Алерта, 2005. - 368 с.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		