

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

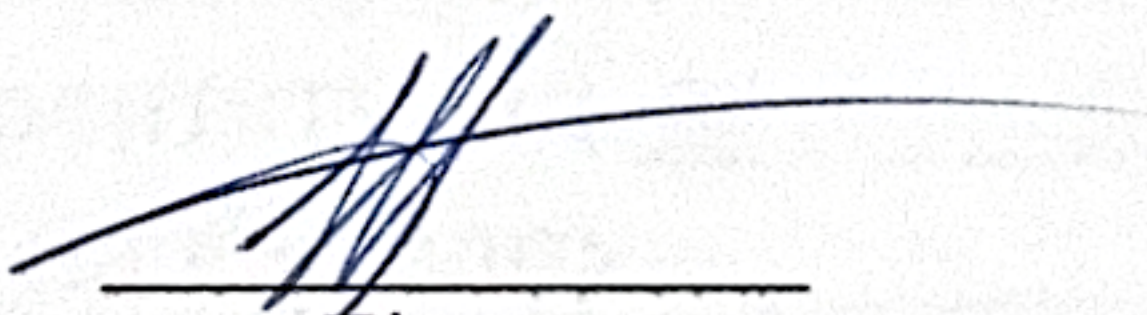
## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

# Розробка пристрою для переробки відходів легкої промисловості

Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування  
Спеціалізація Машини та апарати легкої промисловості

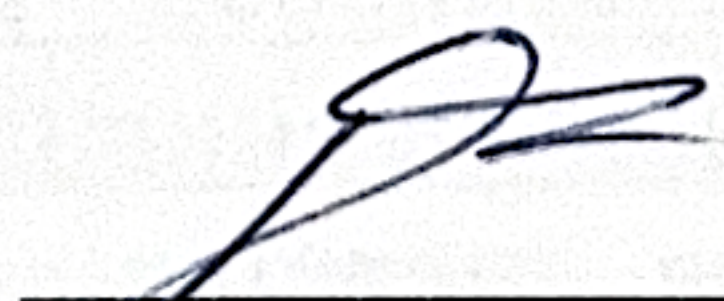
Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
2 курсу група МБм-23-1

  
Підпис

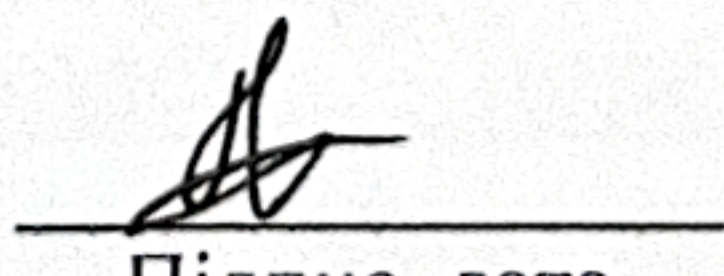
Максимчук І.А.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

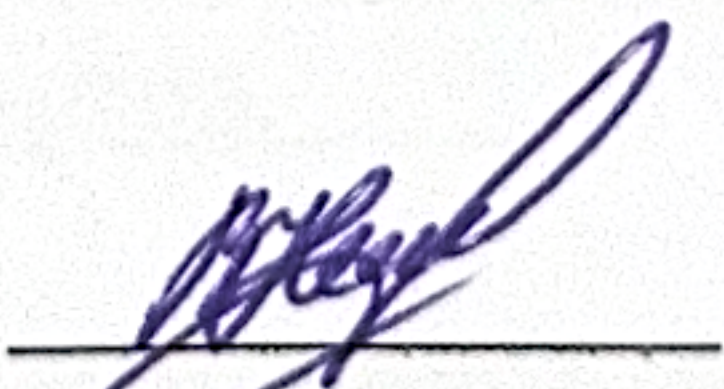
к.т.н., доц. Романець Т.П.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

С.І. Лукіньки  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.  
Ініціали, прізвище

17 12 2024 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та 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 «Машини і апарати легкої промисловості»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

Неймак . 12 . 2024р.

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Максимчук Іван Анатолійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка пристрою для переробки відходів легкої промисловості

керівник роботи Романець Тарас Петрович, к.т.н., доцент

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

Затверджено наказом ректора університету від 26 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом роботи на кафедру \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи звіт з переддипломної практики, технічні характеристики технологічного обладнання легкої промисловості

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

Вступ. 1. Аналіз технологій переробки відходів легкої промисловості.

2. Розробка технологічного процесу переробки відходів легкої

промисловості. 3. Розробка пристрою для пресування відходів легкої

промисловості. 4. Взаємодія робочих органів пристрою з матеріалом в процесі

гранулювання. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Процес переробки відходів легкої промисловості (ДТ, А1). 2. Кінематична

схема пристрою переробки відходів (КЗ, А2) 3. Електрична схема пристрою

переробки відходів (ЕЗ, А2). 4. Компоновка пристрою переробки відходів

(ГК, А1). 5. Пристрій для переробки відходів (ВЗ, А1). 6. Основні компоненти

та робочі органи пристрою (1,5\*А1). 5. Характеристики розробленого

пристрою (ДІ, А2).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

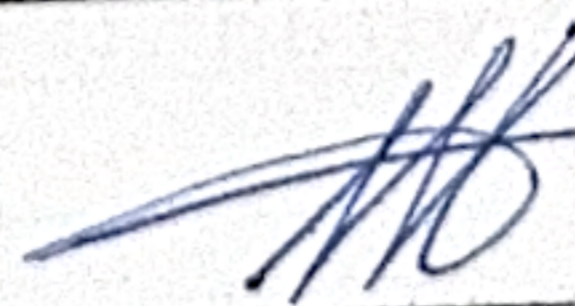
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

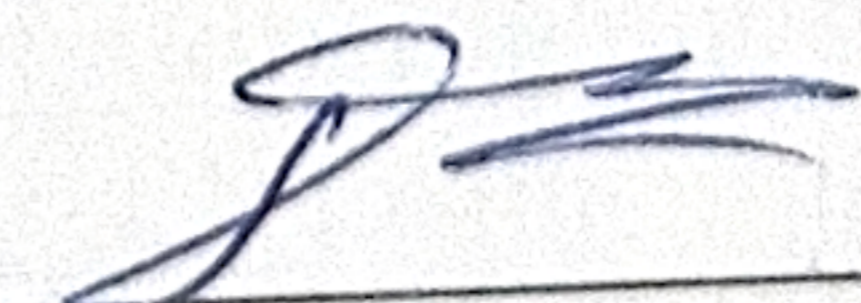
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Аналіз технологій переробки відходів легкої промисловості	до 15.10.24р.	
2. Розробка технологічного процесу переробки відходів легкої промисловості	до 30.10.24р.	
3. Розробка пристрою для пресування відходів легкої промисловості	до 15.11.24р.	
4. Взаємодія робочих органів пристрою з матеріалом в процесі гранулювання	до 30.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 10.12.24р.	

Студент

  
Підпис

І.А. Максимчук  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

Т.П. Романець  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента  
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

1. Прізвище, ім'я та по батькові \_\_\_\_\_

Максимчук Іван Анатолійович

2. Тема магістерської роботи Розробка пристрою для переробки відходів легкої промисловості

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

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

5. Жодне виробництво не є безвідходним. Європа і Америка вже давно сурмлять про велику шкоду, яку наносять навколишньому середовищу звалища відходів, забруднюючи не тільки повітря, але і ґрунт, і ґрунтові води, які врешті-решт доводиться споживати людині. Слід також зазначити, що території, на яких знаходяться звалища, навіть після їхньої ліквідації ще багато десятиків років будуть непридатні для будь-якого використання. Спалювання відходів – це теж не вихід. Отруйні гази повертаються до нас у вигляді дощу. У забрудненні навколишнього середовища одну з головних ролей відіграє хімічна промисловість, зокрема промисловість виготовлення пластмас і полімерів, взуттєва промисловість. Економісти, провівши дослідження, стверджують, що знищення відходів, а також вартість обробки цих відходів майже в 3 рази перевищує витрати на знищення побутових. Раціональна витрата матеріальних і енергетичних ресурсів, а також захист навколишнього середовища від забруднення завжди були і є сьогодні пріоритетними напрямками розвитку економіки України. А для цього необхідно не тільки зменшити кількість виробничих відходів, але також розробляти процеси їх повторного використання. Метою роботи є розробка ресурсозберігаючих технологій та обладнання для переробки відходів легкої промисловості та їх використання в матеріалах та виробках взуттєвого виробництва. В першому розділі розрахунково-пояснювальної записки проведено Аналіз технологій переробки відходів легкої промисловості. В другому розділі обґрунтовано вибір технологічного процесу переробки відходів легкої промисловості. В третьому розділі здійснено розробку пристрою для пресування відходів легкої промисловості. В четвертому розділі роботи проаналізовано взаємодію робочих органів пристрою з матеріалом в процесі гранулювання.

Підпис студента \_\_\_\_\_

" 17 " 12 20 24 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від " 23 " 12 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК добре /с

Рекомендації ЕК \_\_\_\_\_

Особливі відмітки \_\_\_\_\_


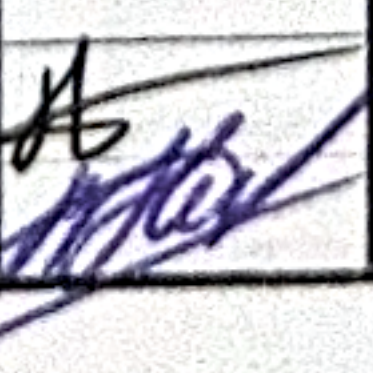

Технічний секретар \_\_\_\_\_

" 23 " 12 20 24 р.

## Зміст

	с.
Вступ .....	5
1 Аналіз технологій переробки відходів легкої промисловості	7
1.1 Структура й методи рециклінгу відходів легкої промисловості	7
1.2 Проблеми нагромадження полімерних відходів у світі .....	11
1.3 Утилізація взуття .....	20
1.4 Вторинна переробка пластику в гранули .....	21
2 Розробка технологічного процесу переробки відходів легкої промисловості .....	29
2.1 Розробка рецептури й технології виробництва .....	30
3 Розробка пристрою для пресування відходів легкої промисловості .....	33
3.1 Компоновка конструкції гранулятора .....	34
3.2 Електрична схема приводу гранулятора .....	37
4 Взаємодія робочих органів пристрою з матеріалом в процесі гранулювання .....	42
4.1 Визначення тиску вирізання полімерної сировини із спресованого шару .....	43
4.2 Визначення тиску в кінчному каналі .....	44
4.3 Визначення тиску в циліндричному каналі матриці .....	55
4.4 Визначення повного тиску пресування .....	66
Загальні висновки .....	69
Перелік джерел посилань .....	70
Додаток А .....	73

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Максимчук І.А			Розробка пристрою для переробки відходів легкої промисловості	М	4	72
Перевір.		Романець Т.Г				ХНУ гр. МБМ-23-1		
Н.контр. Затвер.		Пундик Неймак В.С.						

## ВСТУП

За останнє століття людство досягло таких успіхів, які не могли бути досягнуті за попередні 2 000 років. Звичайно, безвідходного виробництва не існує [1, 9]. Європа і США вже давно сурмлять про масштаби шкоди, яку завдає скидання відходів навколишньому середовищу. Вони забруднюють не тільки повітря, а й ґрунт і ґрунтові води, які в кінцевому підсумку споживаються людиною. Такий закон великого кругообігу води. Слід також зазначити, що території, на яких розташовані звалища, залишаються непридатними для використання протягом десятиліть після того, як звалище зникне. Отруйні гази повертаються до нас у вигляді дощу. Немає можливості спалювати відходи.

Великий бізнес - найбільший забруднювач довкілля. Саме завдяки їхній діяльності був придуманий термін «глобальні екологічні проблеми». Безумовно, ефективне та раціональне використання відходів переробки та вторинних матеріальних ресурсів впливає на інтенсивність економічного розвитку і, що найголовніше, вимагає нових підходів до економії матеріалів і сировини.

Більшість розвинених країн уже досягли успіху в боротьбі з цими проблемами завдяки новітнім технологіям переробки та вторинного використання сировини.

Однак це не вирішує повністю проблеми, з якими стикаються багато виробничих підприємств. У розвинених країнах вирішенню цієї проблеми приділяється особлива увага. Багато компаній вже давно включили у свої виробничі плани спеціалізовані машини для переробки вторинних матеріальних ресурсів і різних технологічних відходів. Такі машини вирізняються високим ступенем автоматизації, наявністю автоматичних систем управління та універсальністю конструкції.

Автоматизовані лінії з переробки вторинних матеріальних ресурсів і відходів включають у себе різні технічні процеси (наприклад, виробництво взуттєвого картону, нетканих матеріалів, пряжі та текстилю різного призначення).

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сьогодні випускаються машини для переробки відходів з різних сумішей матеріалів у високоякісні продукти з високим вмістом відходів або з чистої вторинної сировини. Хімічна промисловість, особливо шкіряна, пластмасова та полімерна, відіграє важливу роль у забрудненні довкілля.

Економісти проводили дослідження і стверджували, що вартість утилізації відходів та їхньої переробки приблизно втричі перевищує вартість переробки побутових відходів і у вісім разів - вартість переробки інших промислових матеріалів. Однак останніми роками ситуація не поліпшується. Структурні зміни в економіці та зміна співвідношення цін на сировину, енергоресурси та кінцеву продукцію призвели до протиріччя між об'єктивною необхідністю переробки відходів з використанням наявних технічних можливостей та економічною не вигідністю і рентабельністю цих виробництв. Водночас триває пошук нових технологій і нових напрямів використання відходів виробництва.

Рациональне використання матеріальних і енергетичних ресурсів та охорона довкілля завжди були пріоритетними напрямками розвитку економіки України. Для цього необхідно не тільки скорочувати обсяги відходів виробництва, а й розробляти та вивчати процеси їх повторного використання.

Метою дослідження є розробка ресурсозберігаючих обладнання та технологій для переробки відходів легкої промисловості та їхньої утилізації в матеріали та вироби для виробництва взуття.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

## 1.1 Структура й методи рециклінгу відходів легкої промисловості

Розвиток промисловості висуває нові вимоги до рівня технічних процесів виробництва, переробки та повторного використання полімерних матеріалів [1]. Про збільшення обсягів вторинної переробки полімерів свідчить статистика утворення та переробки відходів.

Широке використання відходів переробки полімерів у виробках стимулюється, з одного боку, відсутністю надійного обладнання, що забезпечує переробку вторинної сировини в задану форму з подальшим поверненням в основні технічні процеси, а з іншого - нерозвиненістю сектора утилізації вторинної сировини.

У легкій і хімічній промисловості широко використовують вторинну сировину, одержувану під час виробництва виробів із полімерних матеріалів, таких як гума, поліолефіни, полівінілхлорид і поліуретан. Вторинну сировину, отриману в той чи інший спосіб, використовують в основних технічних процесах, наприклад, у виробництві взуття (підшви, підбори, набійки тощо) або супутніх товарів (покриття для підлоги, тара тощо).

Асортимент виробів з відходів полімерних матеріалів розширюється з кожним роком. Останніми роками розроблено технології використання подрібнених полімерних матеріалів у чистому вигляді, сумішах і як наповнювачів [3]. З вищесказаного випливає, що незалежно від способу подальшого використання термопластичних матеріалів, відходів гуми та деяких інших полімерів, подрібнення є необхідним проміжним етапом їхньої переробки. У взуттєвій промисловості ступінь і методи переробки відходів різні [17].

Слід зазначити, що для підвищення ефективності взуттєвого виробництва можливе як максимальне використання відходів, так і включення в технічний

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процес відходів полімерних матеріалів з інших галузей промисловості та повсякденного життя. Відходи еластомерів, штучних шкіроподібних матеріалів, поліуретану і термопластів належать до категорії відходів, які можуть бути використані для виготовлення підошов взуття.

Технічні проблеми, що виникають під час переробки відходів полімерних матеріалів у взуттєвому виробництві, залежать від типу матеріалу, сфери його подальшого застосування і критеріїв якості одержуваної з нього сировини. Поліолефінові відходи Поліолефін (ПО) є найпоширенішим термопластом, і його виробництво постійно зростає. Як і у випадку з іншими термопластами, переробка є найбільш перспективним способом утилізації відходів ПО.

У взуттєвій промисловості значний інтерес представляє переробка поліетиленових відходів, що утворюються під час лиття під тиском використаних поліетиленових колодок і деталей взуття (наприклад, підборів і устілок модельного взуття). Вибір технічних параметрів переробки поліетиленових відходів і застосування одержуваних із них виробів визначаються їхніми фізико-хімічними, механічними та технічними властивостями, які істотно відрізняються від властивостей первинних полімерів. Відходи на основі полівінілхлориду (ПВХ).

Відходи, що утворюються під час виробництва деталей підошви взуття з еластопластичних матеріалів на основі полівінілхлориду, є термопластичними і часто переробляються. Вони переробляються в гранули і додаються до певної кількості первинного матеріалу в процесі виготовлення деталей. Крім того, відходи полівінілхлориду можуть бути перероблені у вироби різного призначення (наприклад, з них можуть бути виготовлені пластини, які використовуються як ріжучі блоки під час різання деталей на пресах).

Складність переробки ПВХ і його відходів полягає в тому, що ПВХ є найменш стабільним із промислових вуглеводневих полімерів: реакція розкладання ПВХ починається за температури понад 100°C і дуже швидко протікає за 170°C. У результаті термічного окислення ПВХ відбуваються процеси агрегації

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та дисоціації - зшивання і розпаду. відбуваються. Під час розроблення технологій перероблення відходів виробництва виникає питання про кількісний і якісний склад відходів, що утворюються на підприємстві.

Для розв'язання завдань із розроблення технологій переробки штучних і синтетичних взуттєвих матеріалів було зібрано інформацію про обсяги відходів, що утворюються на підприємствах взуттєвої промисловості.

Аналіз даних про обсяг і ступінь утворення відходів виробництва на підприємствах взуттєвої промисловості показав, що перше місце посідають відходи хромових шкір для верху та підошви взуття, друге місце - більша частина відходів просоченого та крейдованого картону, третє місце - відходи поліуретану та еластичного пінополіуретану.

Аналіз структури відходів, що утворюються на підприємствах, показує, що переробляються тільки відходи, які відрізняються так званою «чистотою». Наприклад, легко переробляються відходи полімерних матеріалів (якщо вони не забруднені іншими відходами), відходи натуральних матеріалів (без полімерного покриття або просочення), відходи паперу та картону. Інші матеріали практично не підлягають переробці і зазвичай утилізуються на полігонах твердих побутових відходів після отримання відповідних дозволів на захоронення на полігонах.

Однак відходи зі штучних синтетичних матеріалів, які нині виробляють здебільшого з полівінілхлориду (ПВХ) і поліуретану, належать до III класу небезпечних відходів, і їхню утилізацію на полігонах суворо регламентовано, тож захоронення на сміттєзвалищах категорично заборонено. Жорсткі умови зберігання та утилізації відходів, що містять полімерні матеріали, ставлять взуттєві компанії в складне становище.

З одного боку, їм необхідно збільшувати асортимент продукції, що містить синтетичні матеріали, щоб випускати конкурентоспроможну продукцію. З іншого боку, мало хто переробляє ці матеріали, а через їхні небіорозкладні компоненти їх не можна утилізувати на звичайних підземних полігонах. Особ-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ливо складно утилізувати відходи, що містять штучні або синтетичні компоненти.

Це пов'язано з тим, що більша частина відходів є сумішшю полімерних матеріалів у вигляді міцно пов'язаних (або змішаних) з іншими видами матеріалів. Ще більше ускладнює ситуацію розширення асортименту матеріалів, пов'язане з використанням різних видів просочених, тиражованих синтетичних і штучних матеріалів. У цьому випадку повне перероблення можливе тільки за допомогою хімічних методів обробки.

Використання цих методів, здійснюваних за допомогою різних розчинників, дає змогу отримати оригінальні полімерні компоненти. Однак такі способи виробництва ефективні тільки в разі утилізації великих однорідних партій відходів, що можливо за умови використання матеріалів одного кольору і складу. Найоптимальнішим вирішенням цієї проблеми було б будівництво переробних підприємств для переробки відходів взуттєвого виробництва.

Однак і в цьому випадку для переробки всієї партії необхідно спочатку зібрати однорідні відходи. Це необхідно для того, щоб забезпечити високу продуктивність очисних споруд та отримати економічну вигоду від вторинної переробки. На жаль, поточна економічна ситуація не дозволяє будувати такі очисні споруди. Крім того, підприємства, що займаються рециклінгом, стикаються з перерахованими вище проблемами під час переробки невеликих обсягів відходів.

Виходом із цієї ситуації могло б стати впровадження на кожному взуттєвому підприємстві термомеханічного методу переробки відходів із використанням прес-грануляторів. Перевагами цього методу є універсальність, що дає змогу швидко переходити від одного виду відходів до іншого, і здатність переробляти відходи синтетичних і штучних матеріалів.

Суть методу полягає в такому: відходи виробництва подрібнюються в роторній ножовій дробарці, якщо вони містять хоча б один термопластичний компонент. Потім подрібнені відходи засипаються в бункер грануляційного

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

преса, де термопластичний компонент стає в'язким і текучим і змішується з відходами нетермопластичних (або з високою температурою плавлення) компонентів, утворюючи композитний матеріал. Ця технологія переробки є екологічно чистою, якщо використовуються реагентні добавки, а єдиний матеріал, вироблений за розробленою технологією, є гігієнічно безпечним.

## 1.2 Проблеми нагромадження полімерних відходів у світі

Поліуретани - один із видів полімерних матеріалів, що мають велике промислове значення і володіють найбільшим потенціалом для переробки та повторного використання. Поліуретани являють собою високомолекулярні сполуки, що містять значну кількість уретанових груп, незалежно від структури інших молекул.

Як правило, такі полімери отримують під час взаємодії поліізоціанатів із речовинами, що мають кілька гідроксильних груп, наприклад, гліколями. Ці речовини можуть містити й інші реакційноздатні групи, наприклад, амінні або карбоксильні. Тому поліуретани можуть містити, крім уретанових груп, амідні групи, складноефірні (прості або складні) групи, ароматичні та аліфатичні радикали. Такі полімери іноді називають «поліуретанами» або «ізоціанатними полімерами».

Виробництво поліуретанів (ППУ) - одна з галузей промисловості, яка найшвидше зростає, і інтерес до неї у виробників ППУ виник насамперед через можливість отримання цілої низки технічно цінних матеріалів на основі ППУ. До них відносяться монолітні еластомери і пластики, піни, волокна, клеї, лаки, адгезиви і герметики. При цьому найбільше споживання припадає на еластичні та жорсткі пінополіуретани (ППУ) - 75% від загального обсягу виробництва [6]. Високий рівень виробництва та споживання ППУ призводить до накопичення відходів виробництва та використаної продукції, спричиняючи екологічні та економічні проблеми.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Традиційні методи утилізації відходів, такі як захоронення і спалювання, неприйнятні для ПУ. У першому випадку під час контакту з водою утворюються токсичні аміновмісні продукти, у другому - токсичні гази, такі як ціаністий водень і оксиди азоту. Водночас невідновлюваність природних ресурсів та їхня висока вартість роблять використання вторинних матеріалів нагальною потребою.

Питання вторинної переробки поліуретану стає дедалі актуальнішим, особливо в Європі, де місця для захоронення відходів скорочуються, а вартість утилізації значно зростає. Додатковим стимулом для переробки поліуретану є зростаючі законодавчі вимоги до замкнутого циклу життєвого циклу поліуретанової продукції. За останнє десятиліття з'явилося безліч інноваційних технологій переробки, але лише деякі з них використовуються регулярно.

Відходи поліуретану (ПУ) і його похідних у великих кількостях утворюються в автомобільній, авіаційній, взуттєвій, клейовій, побутовій, синтетичній, текстильній, трикотажній і швейній промисловості. Їх використовують під час виробництва автомобілів, що відслужили свій термін, деталей для різних видів техніки, взуття, поліамідних килимів, поліуретанових манжетів, прокладок і ущільнювачів, а також інших технічних і побутових виробів.

Питання економічної та екологічно безпечної переробки пластикових відходів має сьогодні велике значення, оскільки щорічно у світі виробляють сотні мільйонів тонн пластику [2]. За останні два десятиліття обсяг відходів ПУ і ПА, які переробляють, стрімко збільшувався: у 2010 році світове виробництво полімерів становило 200 млн 50 млн тонн, при цьому середньорічний приріст становив 5-6%. Споживання полімерів у розвинених країнах досягло 85-90 кг/особа/рік і продовжує зростати. Усі вироблені полімерні матеріали після закінчення терміну експлуатації перетворюються на полімерні відходи, які необхідно утилізувати [6].

Рециклінг - це повторне використання відходів. Хоча Україна виробляє і споживає менше полімерних матеріалів, ніж розвинуті країни, кількість полі-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мерних відходів у нашій країні наразі оцінюється в 200 000 тонн на рік [2]. Полімерні відходи, що утворюються в домашніх господарствах, включають поліетилен, поліетилентерефталат, ламінований папір, полівінілхлорид, полістирол і поліпропілен.

Значну частину полімерних відходів становлять відходи пакування, які 2000 року становили 0,3 млн т, з яких 0,15 млн т припадало на поліетилентерефталат (темно-пляшковий полімер). Ці оцінки не включають значну кількість промислових полімерних відходів, представлених поліуретаном [8]. Утворення та накопичення твердих відходів у результаті життєдіяльності людини є глобальною проблемою через її економічні та екологічні наслідки.

Важливою частиною цієї проблеми є утилізація полімерних відходів, які є різноманітними за структурою та властивостями і мають свою специфіку. Хоча вміст використаних полімерних виробів у побутових відходах відносно невеликий (близько 7-8% за вагою), низька густина робить ці відходи досить помітними (близько 18-20% за обсягом). Завдяки високій стійкості до впливу навколишнього середовища ці матеріали довго зберігаються в природних умовах [6].

З огляду на високу стійкість полімерних матеріалів до фізичного, хімічного та біологічного руйнування, а також їхню властивість поступово виділяти токсичні сполуки, питання їхньої утилізації має важливе екологічне значення [2]. Однак сьогодні проблема утилізації відходів полімерних матеріалів стала актуальною не тільки з погляду охорони довкілля.

В умовах дефіциту органічної сировини полімерні відходи є багатим матеріальним та енергетичним ресурсом, тобто є важливим економічним чинником. Їх повторне використання дає змогу скоротити використання природних ресурсів, викиди в навколишнє середовище і споживання енергії. Застосовність того чи іншого процесу переробки для конкретного продукту залежить від поєднання характеристик матеріалу, економічних та екологічних чинників. Наприклад, спалювання поліуретанових відходів для використання енергії, нако-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

пиченої в матеріалі, може бути технічно можливим рішенням, коли змішується багато різних продуктів і існують законодавчі обмеження на захоронення відходів на полігонах.

Однак часто набагато вигідніше розділяти відносно чисті відходи на корисні мономерні/поліуретанові сировинні матеріали. Європейський союз (ЄС) поступово запроваджує нові суворі стандарти з переробки та вилучення енергії з матеріалів, що використовуються в пакувальній, автомобільній, електротехнічній та електронній промисловості.

Ці норми поширюються на пластики загалом і на поліуретан зокрема. Крім того, в Центральній Європі в найближчі кілька років будуть поступово ліквідовані всі звалища. У Північній Америці правила утилізації відходів менш суворі, але багато компаній, що виробляють і споживають пластмаси в цьому регіоні, розробили програми добровільного перероблення та утилізації. Їхня мета - знизити ймовірність введення обов'язкового державного регулювання або обов'язкових технічних рішень, які можуть виявитися більш дорогими, ніж добровільні програми.

Кілька галузевих асоціацій, таких як американський Альянс поліуретанової промисловості (API) і Європейська асоціація виробників ізоціанатів (ISOPA), зробили свій внесок у розвиток галузевих ініціатив з переробки поліуретану [16]. Переробку та утилізацію поліуретану можна здійснювати шляхом: механічної переробки, переробки сировини, рекуперації енергії, вторинного спінювання пінополіуретану, піролізу, спалювання твердих побутових відходів, пресування клею, гідрогенізації, парових установок із киплячим шаром, компаундування часток, газифікації, обертових печей.

За даними Ради з переробки і відновлення поліуретану (PU RRC), підрозділу API, поліуретан складає 5% усіх пластикових відходів. Особливо високий рівень переробки автомобільних килимків: за даними PU RRC, у 2002 році близько 98 % поліуретану, використовуваного в автомобільних килимках у США,

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

було отримано з відходів пінополіуретану. Із загальної кількості використовуваних відходів 6% припадає на відходи після споживача.

Наявні дані про рівень перероблення полімерних відходів у розвинених країнах свідчать, що ці вторинні матеріали та енергоресурси наразі використовуються лише в обмеженій мірі. У більшості країн основним розв'язанням проблеми полімерних відходів є їхнє поховання, однак це найменш сприятливий з екологічного погляду варіант, що являє собою незворотну втрату дорогих матеріалів і енергії.

Полімери є досить інертними компонентами відходів, але поступово вони руйнуються і виділяють шкідливі для живих організмів речовини, зокрема надтоксичні сполуки (діоксини та фурани). Спалювання відходів і використання їхньої теплової енергії менш поширені. Однак існує необхідність в ефективному очищенні димових газів від шкідливих продуктів згоряння.

Крім того, внесок матеріальної (механічної, хімічної та термічної) обробки полімерних відходів незначний, але ця група методів чинить найменший негативний вплив на навколишнє середовище [8, 9]. Однак слід зазначити, що частка полімерних відходів, що переробляються як вторинні матеріали або енергоресурси, з кожним роком збільшується.

З одного боку, у розвитку переробки полімерних відходів, як і раніше, домінує їх енергетична переробка, тобто спалювання з отриманням енергії. З іншого боку, існують об'єктивні передумови для збільшення обсягів рециклінгу матеріалів. Правові, політичні та економічні механізми, прийняті в розвинених країнах, стають потужними стимулами для розвитку систем переробки полімерних відходів. Крім того, вартість переробки полімерів поступово знижується.

Методи обробки відходів поліамідів і поліуретанів можна розділити на три групи: а) термічні (рекуперація енергії), б) механічні (термомеханічні) і в) хімічні. Якщо поліуретан є частиною великого потоку недиференційованих відходів, що складається з різних горючих матеріалів, таких як тверді побутові відходи або подрібнені вироби, які відслужили свій термін, то спалювання і те-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рмічна регенерація енергії часто є найбільш підходящими методами переробки. Як паливо поліуретан має енергетичну цінність, порівнянну з вугіллям за вагою.

При спалюванні поліуретан зменшується до 1 % від свого початкового обсягу, що знижує навантаження на полігони. Дослідження з переробки та утилізації поліуретану показали, що поліуретан можна додавати в тверді побутові відходи в кількості до 20 % від їхньої загальної ваги без збільшення небажаних викидів газу і золи ISOPA повідомляє, що поліуретан можна використовувати в установках рекуперації енергії та установках оброблення продуктів згоряння газу і може використовуватися в сучасних сміттєспалювальних установках у поєднанні з установками рекуперації енергії та установками оброблення продуктів згоряння газу.

Вважається, що такі комбіновані установки здатні забезпечити до 10 % потреб місцевого населення в електроенергії. Поліуретанові відходи також використовують як паливо для опалення будинків і цементних печей. Механічні методи, інакше кажучи, фізичні, засновані на зв'язуванні або термопластифікації подрібнених полімерів, а також на комбінації цих методів.

Як сировину для цього процесу використовують відходи вживаних виробів, а також рослинний брухт і відходи. Поліуретанова крихта використовується як наповнювач під час виробництва пінополіуретанів і еластомерів. При використанні як наповнювача крихта зазвичай спочатку включається в поліольний компонент у процесі виробництва поліуретану.

Формовані поліуретанові вироби, такі як автомобільні підголівники, можуть містити до 20 % переробленого матеріалу без шкоди для якості та експлуатаційних характеристик. Механічні подрібнювачі переробляють поліуретан на крихту за допомогою різних процесів подрібнення і нарізки. Для використання як наповнювача поліуретан повинен мати розмір частинок менше 200 мікрон, переважно менше 100 мікрон.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Подрібнені відходи пінополіуретану можуть бути спінені вдруге з використанням тепла, тиску і сполучного. Термопластифікація подрібнених пінополіуретанів і ПА дає змогу одержувати продукти з вищою щільністю та міцністю Bayer AG і Mobay Corporation розробили й використали метод змішування термопластичної поліуретанової крихти з макро-діізоціанатами.

Термопластифікація здійснюється методом екструзії, таблетування і лиття під тиском. У результаті виходять як готові вироби, так і гранульовані полімери, які використовуються як сировина для подальшої переробки. Також було розроблено обладнання для виробництва невеликих виробів із чистої поліуретанової крихти методом пресування стрижнів (без клейових з'єднувачів) [11]. Вторинні пінопласти широко використовуються у виробництві вібро- і звукоізоляції, підлогових покриттів, спортивних матів, набивних матеріалів і автомобільних килимків.

В аналогічному процесі, відомому як адгезійне пресування, гранули поліуретану покриваються сполучною речовиною і нагріваються під тиском для затвердіння. Методом адгезивного пресування виробляють контурні вироби, наприклад, автомобільні килимки та шини. Деполімеризація поліуретану на його хімічні компоненти, відома як хімічна деструкція, найбільш ефективна, коли поліуретанова сировина має відомий однорідний хімічний склад. Хемотип поліуретанових виробів, виготовлених із регенованих мономерів, зазвичай аналогічний до вихідного продукту і має ті самі експлуатаційні характеристики.

За даними PURRC, поліоли, отримані в результаті хімічного розкладання, можуть замінити до 90% поліолів у напівжорстких пінополіуретанах, а вміст вторинної сировини в отриманому пінополіуретані може досягати 30%. Організація наводить аналогічні результати для жорстких пінополіуретанів. Хімічні методи переробки засновані на здатності поліамідів і поліуретанів розщеплюватися (деполімеризуватися) на низькомолекулярні сполуки під впливом спиртів, гліколів і поліолів у присутності металевих спиртів як каталізаторів. Роз-

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щеплення поліуретанового полімеру відбувається за ефірними та уретановими зв'язками з подальшим руйнуванням лінійного полімеру з утворенням суміші поліолів з кінцевими гідроксильними групами [6].

Процес деполімеризації може бути використаний для отримання вихідних компонентів для синтезу клейових композицій, армуючих добавок - компонентів дорожніх покриттів, універсальних мастик і герметиків для будівництва, лаків і багатьох інших продуктів. Придатність продуктів деструкції для повторного використання в тій чи іншій галузі визначається їхньою в'язкістю, вмістом амінів і гідроксильним індексом.

Методи переробки, запропоновані дослідниками багатьох країн, відрізняються складом реагентів для розкладання, температурно-часовими умовами і технологічним обладнанням. Для переробки відходів штучної шкіри та пінополіуретану регулярно проводять сольволіз із додаванням каталізатора у вигляді гліколю або спирту в перемішувальному обладнанні за температури 180-220°C.

Отримані в результаті такої обробки продукти використовуються німецькою компанією Regula Recycling для виробництва взуттєвих підошов. Клейові склади, розроблені вітчизняними інженерами на основі знищених відходів ливарного ПУ, за міцністю можна порівняти з відомими поліуретановими клеями, і їх можна використовувати як клеї в будівельній галузі та в рецептурах товарів народного споживання.

Незважаючи на те що технології переробки поліуретанових відходів розробляються вже понад десять років, останнім часом проблема утилізації та переробки стала особливо актуальною. Причинами актуальності проблеми є закриття полігонів, зростання вартості вивезення відходів і урядові постанови, що встановлюють квоти на переробку пластику.

Основними технологіями переробки поліуретану є рекуперация енергії, механічна переробка і хімічна переробка. Доцільність застосування кожного методу залежить від продукту, що переробляється, місця розташування, вартості енергії та ринків кінцевого використання. Більша частина поліуретану, що

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переробляється в даний час, - це промислові відходи. Переробці продуктів і виробів після споживача певною мірою перешкоджає відсутність інфраструктури для збору, сортування та переробки, хоча різні галузеві асоціації намагаються вирішувати ці питання самостійно.

В Україні середній коефіцієнт вилучення та переробки полімерних відходів не перевищує 15 %. Найвищі показники вилучення та переробки спостерігаються для відходів поліетилену (20%), поліпропілену (18%), поліетилен-рефталату (12%), полістиролу (12%) і полівінілхлориду (10%). При цьому відходи виробництва полімерів практично не переробляються [11]. Аналіз цієї інформації дає змогу зробити такі висновки.

Низький рівень рециклінгу полімерних відходів у розвинених країнах, як і раніше, свідчить про серйозність і актуальність проблеми. Незважаючи на безсумнівний прогрес у сфері якості та кількості перероблюваних відходів, існує величезний потенціал і перспективи для альтернативних методів утилізації відходів. Один із таких ефективних методів описано нижче.

### 1.3 Утилізація взуття

Взуття може довгий час залишатися в хорошому стані, але з часом навіть найякісніші вироби зношуються і відправляються в загальний сміттєвий бак або на звалище, чинячи руйнівний вплив на екосистему. Не кажучи вже про взуття лаборантів і пожежників. На підошвах цього взуття скупчуються різні токсичні та шкідливі речовини. Правильна утилізація взуття допоможе захистити навколишнє середовище від забруднення.

Перероблені матеріали повторно використовуються при виготовленні нових виробів і позитивно впливають на виробничий процес. Переробці підлягає будь-який вид взуття, включно з кросівками, черевиками, туфлями, чобітьми і босоніжками. Незважаючи на те що ці предмети вважаються безпечними відходами, їх все одно необхідно правильно утилізувати. Взуття належить до категорії матеріалів, придатних для вторинної переробки.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переробка дає змогу найбільш раціонально використовувати природні ресурси, вже використані в процесі виробництва. Відмова від вторинної переробки взуттєвої продукції призводить до забруднення довкілля токсичними хімічними речовинами під час розкладання (під час спалювання) та неорганічного розкладання, нераціонального використання та виснаження природних ресурсів і повені планети взуттєвими відходами. Взуття виготовляється з різних матеріалів, які міцно склеюються або зшиваються між собою.

Для якісної переробки необхідний майже повністю автоматизований процес утилізації взуття. Просте спалювання взуття призводить до забруднення ґрунту та повітря і, як наслідок, завдає шкоди навколишньому середовищу. Технічні етапи переробки взуття Сортування за категоріями (наприклад, черевики, шльопанці, кросівки).

На цьому етапі видаляються всі металеві частини взуття. Відсортоване взуття подрібнюється і пресується в гранули. Сортування за матеріалами. Матеріали сортуються за допомогою циклонного сортування, зигзагоподібного сортування і, нарешті, сортування на вібростолі. Після завершення процесу переробки старе взуття перетворюється на різні види матеріалів. Вони можуть бути використані як сировина для виробництва нових виробів.

#### 1.4 Вторинна переробка пластику в гранули

Проблема переробки пластмас актуальна для всіх країн сучасного світу. Вона об'єднує як економічно розвинені західні країни, так і держави, що розвиваються. У кожній країні люди борються з проблемою, як впоратися з горами пластикових відходів.

Щорічно у світі виробляється величезна кількість пластикових виробів. Звалища переповнені викинутими пластиковими виробами. Ситуація ускладнюється тим, що пластик може повністю розкластися тільки через 500 років.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Екологи та природоохоронні організації стверджують, що ці відходи все більше забруднюють навколишнє середовище і світовий океан.

Наслідки такого стану справ відчують на собі наші онуки та їхні нащадки. На думку експертів, найкращою відповіддю на цю загрозу є розвиток вторинної переробки пластикових виробів. На Заході подібні технології були розроблені в 60-70-х роках минулого століття.

В Україні ж питанню переробки пластику довгий час не приділяли належної уваги, кажуть експерти. Це пов'язано з тим, що в СРСР пластикова упаковка для продуктів і товарів не була широко поширена. Люди не викидали пакети від футболок після одного використання, а зберігали їх роками. І до кінця 1980-х років у нашій країні не існувало такої проблеми, як переважання пластикових відходів. Але пізніше, коли пакети-футболки та інші вироби міцно увійшли в наше повсякденне життя, стало звичним заплющувати очі на гори пластикових відходів, які дедалі збільшувалися.

По-перше, не було опрацьованої законодавчої бази щодо захисту навколишнього середовища.

По-друге, була відсутня обізнаність про небезпеку пластикових відходів. У результаті проблема утилізації пластику в Україні з часом ставала дедалі серйознішою. Водночас лише нещодавно ми змогли всерйоз взятися за розв'язання цієї проблеми. Сьогодні ми маємо можливість спиратися на передовий західний досвід, який передбачає кілька способів переробки пластикових відходів для вторинного використання.

Механічні методи. Цей метод передбачає механічне подрібнення різних пластикових волокон, неякісних стрічок і формувальних відходів на крихту або порошок. При цьому не змінюються фізичні та хімічні властивості пластику і його структура.

Фізико-хімічні методи. Можна розділити на кілька типів. Руйнування пластикових відходів. Отримання олігомерів і мономерів, які потім використовуються для виробництва пластикових волокон і плівок.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Повторне плавлення. Технологія лиття під тиском. У цьому випадку з пластикових відходів отримують гранули.

Переосадження з розчину. При цьому методі з відходів можна отримати композитні матеріали та порошок, який використовується для подальших полімерних покриттів.

Хімічна модифікація. За такого способу переробки з пластикових відходів отримують матеріали з новими фізичними і хімічними властивостями. Найпоширенішим з перерахованих методів є технологія повторного плавлення, також відома як грануляція або гранулювання.

Гранулювання пластикових відходів. Існує два типи методів гранулювання

Термічна грануляція. При цьому методі пластик спочатку розплавляється, а потім впорскується через круглі отвори в робочій поверхні. У результаті виходить гаряча пластикова стрічка, яку спеціальним ножом розрізають на дрібні гранули або таблетки. На останньому етапі гранули/таблетки охолоджуються потоком повітря.

Холодна грануляція. За цієї технології матеріал продавлюється через пластину зі спеціальними отворами. У результаті утворюється смуга пластику, яка швидко охолоджується і потім розрізається на дрібні гранули за допомогою обертового ножа. Щоб уникнути нагрівання полімеру в процесі роботи, можна також використовувати рідкий азот.

На думку економістів, найвірніший спосіб отримати прибуток - вкласти гроші в будівництво заводів з переробки пластикових відходів. У сучасних реаліях такі бізнес-проекти приречені на успіх. Згідно з одним зі звітів, до 2020 року обсяг ринку вторинних пластмас перевищить 6 мільярдів доларів США.

Світовий попит на перероблені пластмаси зростає на 6,5 % на рік. Водночас насиченість ринку переробниками низька. Зокрема, в Україні, як уже зазначалося, інфраструктура переробки пластмас розвинена недостатньо добре. Довгострокові перспективи рециклінгу досить сприятливі.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перш за все, частка перероблених пластмас у загальному обсязі світового виробництва пластмас не перевищує 7 %. Природно, екологи та природоохоронні відомства продовжуватимуть зусилля зі збільшення цього показника. По-друге, виробники пластикових виробів зацікавлені в тому, щоб їхня продукція була більш екологічною, і роблять усе можливе для розвитку переробки пластикових відходів. По-третє, останніми роками динамічно розвиваються технології сортування та переробки побутових відходів, що дає змогу оптимізувати процес перероблення пластикових відходів і максимально підвищити якість вторинної продукції. По-четверте, експерти очікують, що в майбутньому інфраструктура для переробки полімерних відходів значно покращиться. Це дасть змогу спростити і здешевити експлуатацію переробних заводів.

Таким чином, незважаючи на поточну рентабельність бізнесу з переробки полімерних відходів, у майбутньому цей сектор стане ще більш прибутковим. Слід також зазначити, що багато великих виробників пластмас приділяють дедалі більше уваги питанням екологічної безпеки. Питання економії ресурсів, переробки та утилізації відходів актуальні для всіх галузей промисловості.

Однак для виробників взуття вирішення цієї проблеми має особливе практичне значення. Це пов'язано з тим, що сировина становить 75-90 % собівартості продукції. Рациональне використання вторинної сировини можна зробити економічно привабливим за рахунок збільшення масштабів виробництва при збереженні масштабів використання сировини.

Очевидно, що проблема ефективного використання вторинних ресурсів може і має бути вирішена для низки промислових підприємств, розташованих у певних регіонах республіки, з урахуванням їхніх потреб.

Усі відходи, що утворюються на взуттєвих підприємствах, можна розділити на: - утилізовані: ті, що використовуються у виробництві та споживаються самим підприємством для виготовлення продукції в основному й допоміжному виробництві (наприклад, відходи теплоелектростанцій); - не утилізовані: ті, що не використовуються у виробництві та застосовуються для господарсь-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ких потреб або можуть бути продані (наприклад, текстильні відходи); - невідновлювані: не використовуються при сучасному стані технології, що призводить до технічних втрат.

Основними відходами взуттєвих підприємств, що становлять інтерес для переробки, є шкіра, взуттєвий картон, штучна шкіра, текстиль із просоченням або полімерним покриттям, термопласти для сумок і лотків, поліуретан тощо. Переробка термопластів забезпечує найбільшу економічну та екологічну окупність.

Водночас проблеми переробки та утилізації термопластів стають дедалі складнішими як з технічної, так і з економічної точки зору. Коротше кажучи, існують багатокomпонентні системи, поведінку яких під час переробки неможливо передбачити, оскільки вони містять безліч компонентів, як-от стабілізатори, наповнювачі, пігменти і барвники, активні речовини тощо.

Крім того, докладна література з методів переробки зустрічається рідко, і доводиться працювати в умовах «інформаційного голоду». Широке розмаїття полімерних матеріалів, що використовуються у взуттєвій промисловості, збільшує обсяг відходів.

Основними методами утилізації відходів полімерних матеріалів є рекультивация для повторного перероблення у виробі або перетворення на інші корисні продукти шляхом високотемпературного розкладання у відповідних умовах. Факторами, що визначають напрямок утилізації відходів, є капітальні вкладення, експлуатаційні витрати, оптимальне споживання сировини та енергії, можливості збуту переробленої продукції та екологічні міркування.

Найбільш економічно ефективним і коротким шляхом є повернення відходів безпосередньо у виробничий цикл. Існує два технічні методи переробки: - перший - виробництво деталей взуття винятково з перероблених матеріалів (наприклад, вкладок у підошву каблука підошви); другий - модифікація початкового (первинного) полімерного складу шляхом зміни кількості відходів залежно від властивостей і

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призначення деталі або виробу. Пряма передача відходів назад у виробництво можлива тільки на виробничих підприємствах.

Кількість відходів, що утворюються, настільки велика, що навряд чи виробнича компанія зможе переробити понад 10 % своїх відходів. Тоді постає питання, що робити з відходами, що залишилися. Єдиний висновок - необхідно створити централізований структурний підрозділ, який займатиметься їх переробкою та утилізацією. З огляду на різноманітність методів переробки та обладнання, що використовується для полімерних матеріалів, загальну технологічну схему можна уявити так: сортування та очищення, подрібнення, приготування полімерних композицій і переробка у вироби.

Перший етап охоплює збір відходів, сортування та очищення за типами і може бути легко здійснений виробниками продукції. Другий етап - один з найважливіших у технологічному процесі: в результаті однієї-двох-трьох стадій дроблення матеріал досягає розміру, достатнього для подальшої переробки. Саме тут потрібна дробарка. На третій стадії подрібнені відходи змішуються з іншими компонентами полімерної композиції (стабілізаторами, наповнювачами, піноутворювачами тощо). Приготована суміш гранулюється, для чого необхідний гранулятор. На четвертому етапі гранули переробляються в продукт. Цей етап зазвичай мало чим відрізняється від процесу перероблення полімерів у вироби, але вибір методу перероблення часто вимагає особливого підходу.

Відходи штучної шкіри, такі як шкіра з поліуретановим покриттям, можуть бути перероблені аналогічним чином. Можливо, найменш вивченою галуззю переробки взуттєвих відходів є термопластичні матеріали для таць і сумок. Причина цього не в складності процесу, а в тому, що обсяги, вироблені компаніями, невеликі - від кількох до 10 тонн на рік.

Низка досліджень показала, що ці відходи можуть бути ефективно використані як вторинна сировина для виробництва взуття. Мабуть, найскладнішою проблемою є переробка відходів стелечного картону. Обсяг цих відходів дуже великий і становить десятки тонн на рік для підприємств. У виробництві взуттєвих устілок

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовується найрізноманітніша сировина: целюлоза, шкіра, інші волокна, пов'язані латексом, полімери.

Таким чином, не існує абсолютно однорідної групи відходів, і це необхідно враховувати під час розроблення технологій переробки. Резюме - переробка відходів легкої промисловості складна і дорога через необхідність створення спеціального обладнання - обсяг відходів, що утворюються на кожному підприємстві, навряд чи принесе значну економічну вигоду тільки за рахунок утилізації - перш ніж вжити якихось заходів щодо переробки відходів, необхідно провести експертну оцінку та економічні необхідно провести експертну оцінку та економічні розрахунки.

### Висновки до першого розділу

У цьому розділі було розглянуто види відходів, що утворюються на підприємствах легкої промисловості. Також було визначено перспективи будівництва підприємств з переробки відходів. Зокрема, запропоновано розробку преса для гранулювання відходів термопластичних полімерних матеріалів.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ ВЗУТТЄВОГО ВИРОБНИЦТВА

Останніми роками перед шкіряно-взуттєвою промисловістю стоїть проблема забезпечення високоякісною сировиною та зниження імпортозалежності в цьому секторі. Одним із найважливіших завдань взуттєвої промисловості в цьому відношенні є конкурентоспроможність по відношенню до імпорту.

Це пов'язано з тим, що імпортне взуття здебільшого дешевше і має більш різноманітний асортимент. Нині дефіцит і висока вартість натуральної сировини для виробництва компонентів взуття та необхідність постійного оновлення асортименту продукції створюють проблему пошуку альтернативної сировини для шкіряно-взуттєвої промисловості.

Перспективним є виробництво матеріалів для підошов взуття з необхідним рівнем споживчих властивостей і низькою вартістю. Метою даної роботи є розробка технології отримання матеріалів для підошов взуття з відходів виробництва та встановлення перспективності їх подальшого використання.

Аналіз літератури показує, що низка властивостей поліуретану становить особливий інтерес для взуттєвої промисловості, тому у виробництві взуття використовується значна кількість поліуретану. Нині весь поліуретан, який використовують у взуттєвому виробництві, закупають за кордоном. Під час виробництва поліуретанових підошов взуття утворюються різні види відходів, зокрема формовані, литі та браковані підошви, які можуть бути використані для отримання нових полімерних матеріалів для підошов взуття [8].

### 2.1 Розробка рецептури й технології виробництва

Відходи взуттєвого виробництва являють собою багатокомпонентну систему, що складається з полімерної основи та різних компонентів [11], вибір яких дає змогу досягти бажаних властивостей і вплинути на розробку рецеп-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тур. Як основний компонент використовувалася вторинна полімерна сировина у вигляді поліуретанових відходів взуттєвих виробництв.

Технічним завданням, що вирішується при використанні цього компонента, є забезпечення формування еластичної полімерної матриці, що зберігає основні властивості вихідного поліуретану для взуття в умовах лиття під тиском. Для підвищення ефективності переробки матеріалу і модифікації властивостей полімерної композиції як додатковий компонент використано індустріальну оливу (ТУ 0253-003-71148628-2005), відфільтровану від різних включень розміром понад 0,5 мм.

Технічне завдання, що розв'язується за допомогою оливи, полягає в забезпеченні пластифікуючої функції полімерної матриці для регулювання течії розплаву і в забезпеченні змащення для взаємного зчеплення компонентів композиту. Технологія виробництва матеріалів і виробів для підшов взуття складається з таких стадій: попереднє сортування та очищення, подрібнення, змішування, гранулювання та лиття.

Технологічну схему представлено на малюнку 2.1. На першому етапі відбувається сортування відходів за групами та видами: ливарний брухт, скрап, обрізки преса, несортовані вироби, міжформені та міжплиткові перемички листових матеріалів, зливи, скрап і пил, що утворюються після шліфування зрізів підшви та дублювальних матеріалів. Другий етап здійснюється за допомогою універсального роторного шредера PUR 200V. Цей шредер призначений для подрібнення відходів полімерів та інших матеріалів, що підлягають вторинній переробці.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.1 – Схема технології одержання матеріалів і виробів

Відходи пінополіуретану подрібнюють на шматочки розміром 1-5 мм (подрібнені відходи пінополіуретану показано на рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Здрібнені відходи ППУ

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Етап змішування необхідний для попереднього однорідного розподілу компонентів. Приготування суміші компонентів полягає в механічному змішуванні - з'єднанні компонентів композиції.

Перероблена полімерна сировина змішується з індустріальними оливами. Висушена і подрібнена полімерна сировина може бути піддана гранулюванню. Переробці можуть піддаватися поліуретан, ПВХ і термопластичні еластомери. Грануляція проводиться за температури від 140 до 160 °С.

Заключним етапом процесу переробки відходів є переробка гранул у виробу або відливки. Вироби можуть бути відлиті за допомогою ливарного обладнання [11]. Основні режими лиття композиції: температура за зонами: 1 - 140-155 °С, 2 - 145-160 °С; час подачі матеріалу - 15-20 с; час витримки - 240 с.

Висновки до другого розділу.

У цьому розділі пропонується технічний процес переробки полімерних відходів взуттєвого виробництва. Одним з етапів цього процесу є гранулювання.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ ВІДХОДІВ ВЗУТТЄВОГО ВИРОБНИЦТВА

На сьогодні існують різні типи і конструкції грануляторів. Їх можна класифікувати наступним чином [МРМА 24.00.00.000 ДО]:

за призначенням:

- для виробництва комбікормів;
- для виготовлення паливних гранул;
- для гранулювання полімерів;
- для пресування сміття/

за типом приводу:

- редукторного типу;
- з пасовою передачею.

В грануляторах редукторного типу роботу виконує редуктор і в свою чергу, в залежності від типу редуктора такі гранулятори можуть поділятися на:

- одноступінчасті;
- двохступінчасті.

за видом матриці:

- з кільцевою;
- з плоскою.

за розташуванням матриці:

- вертикального типу;
- горизонтального типу.

Однак грануляційні млини зазвичай діляться на кільцеві та млини з плоскою матрицею. У пелетних млинах з плоскою матрицею в разі поломки підшипника не можна замінити один ролик, необхідно замінити всі ролики, але, як правило, тільки ролики зношуються і не виходять з ладу повністю, а заміна підшипників може бути проведена за дуже короткий термін - протягом 30 хвилин.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Плоскі фільтери на пелетних заводах можна замінити за 15-20 хвилин. Це можливо завдяки швидкому доступу до робочого органу. Такі млини гарантують безперервне виробництво окатишів без зупинок протягом 24 годин, на відміну від млинів з кільцевими фільтрами, які доводиться часто зупиняти для очищення фільтера. Як відомо, кількість підшипників у механізмі суттєво впливає на рівномірність роботи та зниження навантаження.

У грануляторах із плоскою матрицею всі компоненти з'єднані одним валом. Цей вал з'єднаний із приводом пелетного млина і постійно змащується малярною ванною. Так, порівняння кількості підшипників, встановлених на головному валу матриці плоских і кільцевих грануляторів, показує, що в першому випадку їх чотири, а в другому - два.

Крім того, забезпечується охолодження, оскільки механізм постійно змащується. Завданням магістерської дисертації є розробка експериментальної моделі прес-гранулятора для гранулювання відходів взуттєвого виробництва.

Технічна характеристика прес-гранулятора

- продуктивність, кг/год, 75...100
- дисперсність сировини, мм 1...5
- температура сировини до гранулювання, 20...50 °С
- температура гранул на виході, 90...150°С
- потужність електродвигуна, 4 кВт
- частота обертання матриці, 10-12 об/с

### 3.1 Компоновка конструкції гранулятора

Загальна компоновка прес-гранулятора показана на рисунку 3.1 та [МРМА 24.00.00.000 ГК].

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

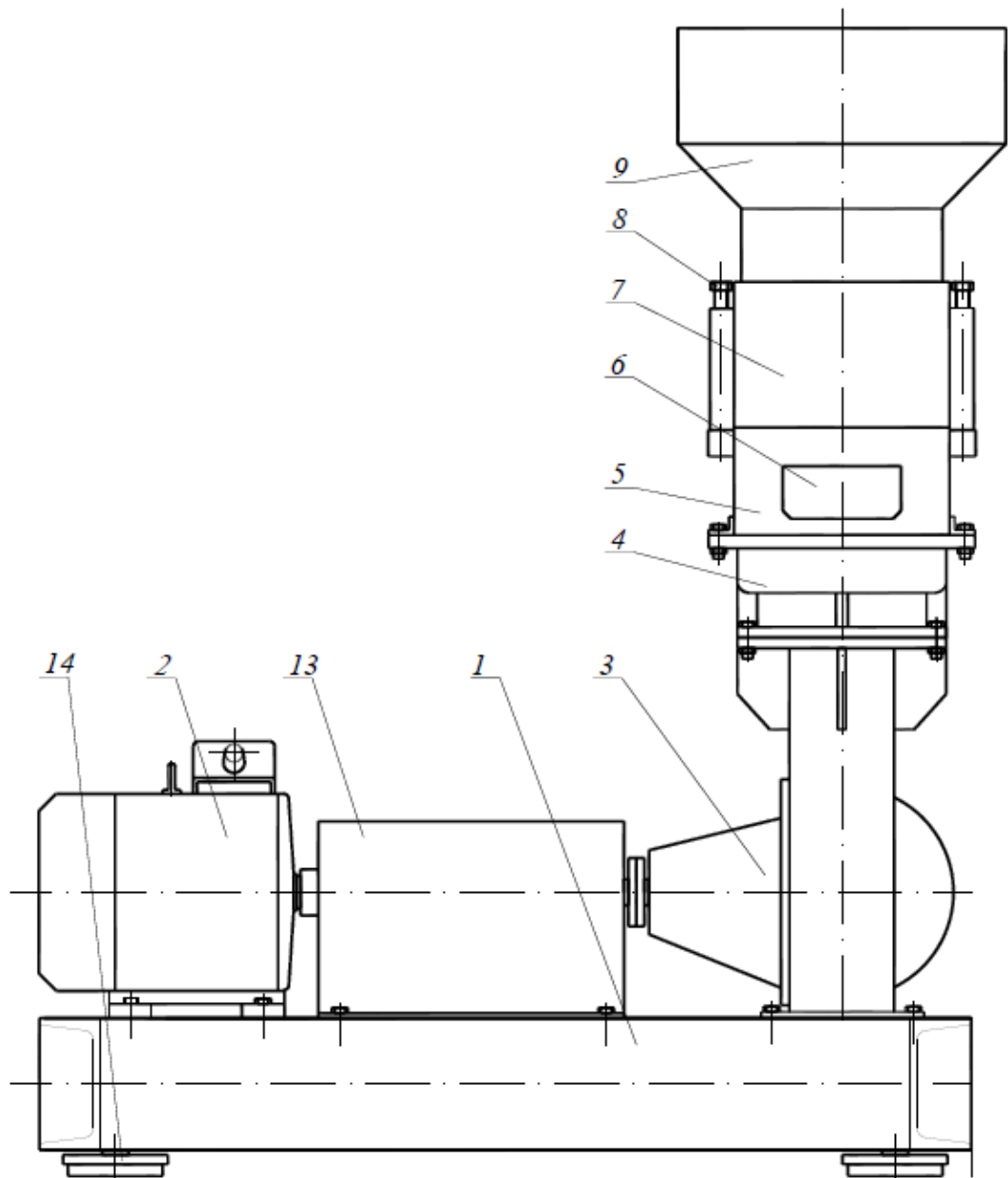


Рисунок 3.1 - Компонівка прес-гранулятора

Усі компоненти преса змонтовані на рамі 1, яка являє собою зварену конструкцію зі швелера № 10. Рама встановлена на чотирьох віброопорах 14. Віброопори служать для фіксації преса на місці та вирівнювання його на нерівних поверхнях. Регулювання висоти віброопор дає змогу встановлювати обладнання в горизонтальному положенні. Віброопори складаються з гумових і металевих елементів і забезпечують віброізоляцію (активну і пасивну) преса за наявності вібрації. Опори кріпляться до рами за допомогою кріпильних гайок. Перед початком роботи преса необхідно перевірити рівномірність навантажен-

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

ня на всі опори. Основним силовим агрегатом пелетного млина є конічний редуктор 3. Вона взята від заднього моста автомобіля «Москвич 412». Головна передача - гіпоїдна з передавальним числом 4,22.

На пелетних млинах використовується тільки одновісна півось. Тому диференціал (його сателіти) блокується. У картер редуктора заливається трансмісійне масло ТАД-17 за ГОСТ 23652-79. Хвостовик редуктора з'єднується з валом електродвигуна за допомогою карданного вала з двома хрестовинами. Така конструкція дає змогу знизити точність встановлення електродвигуна і редуктора на станині.

Крутний момент передається від редуктора на вал гранулятора через шліцьовий вал, що складається з півосей. Вали з'єднані між собою муфтами. Коробка передач встановлена в панчосі заднього моста. Бічні сторони панчохи вкорочуються. До довгої (верхньої) сторони панчохи приварена пластина, до якої кріпиться корпус гранулятора 4. У середині головки 5 гранулятора розташоване вікно 6 для відбору гранул. Воно забезпечене розвантажувальним жолобом (на рис. 3.1 не показано).

У верхній частині головки грануляційного млина розташований корпус пресувального ролика 7. У верхній частині знаходиться бункер 9, який заповнюється подрібненим матеріалом. На малюнку 3.2 показано вигляд зверху пелетного млина. Два притискні ролики 11 встановлені на підшипниках кочення на нерухомому валу 12. На обох кінцях вала є виступи, які входять у пази в напрямних. Зусилля, що притискає ролики до матриці 10, регулюється болтами 8. Зазор між роликом і матрицею має бути в межах 0,05-0,2 мм.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

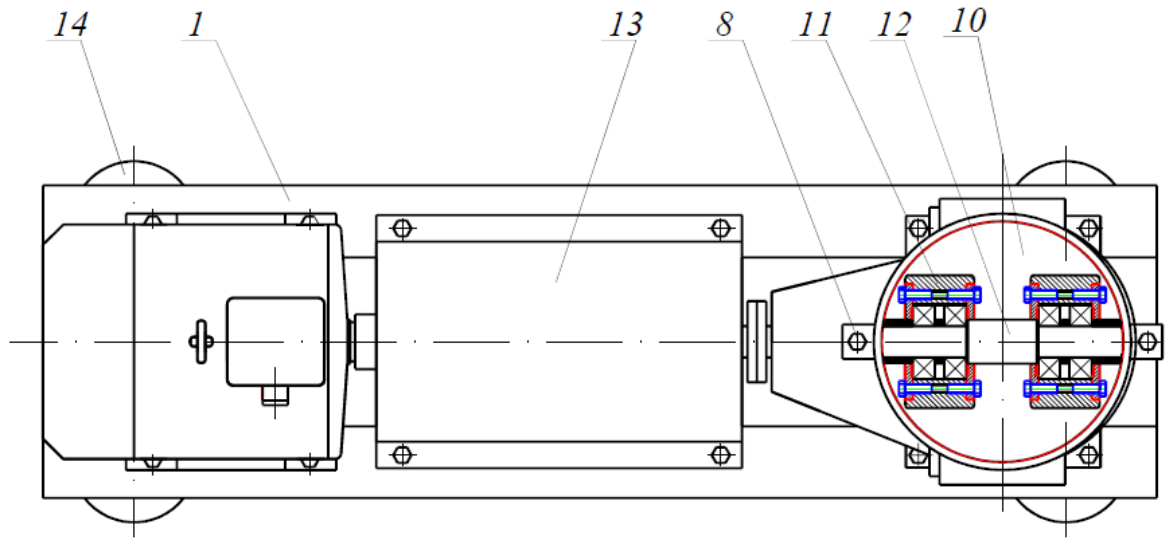


Рисунок 3.2 – Вид зверху прес-гранулятора

### 3.2 Електрична схема приводу гранулятора

Гранулятор приводиться в дію асинхронним трьохфазним двигуном з коротко замкнутим ротором. Електрична схема приводу гранулятора показана на рисунку 3.3 та [МРМА 24.00.00.000 ЕЗ].

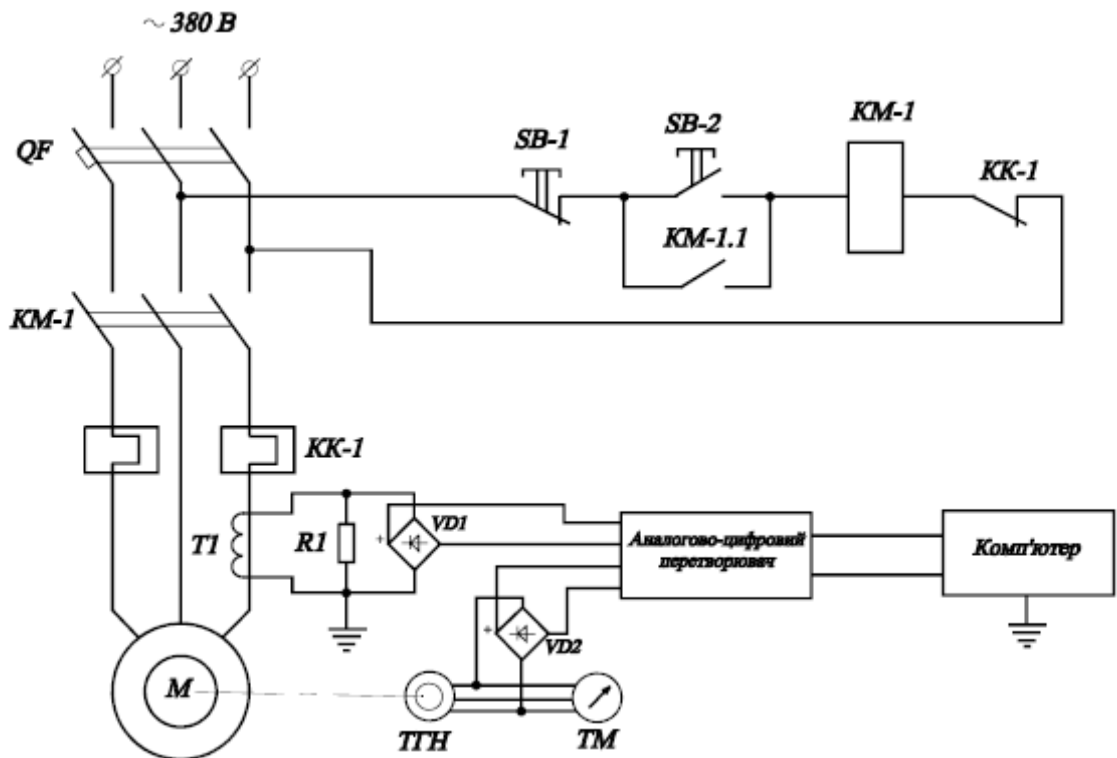


Рисунок 3.3 – Електрична схема гранулятора

Гранулятор підключається до промислової електромережі напругою 380 В. Підключення здійснюється через автоматичний вимикач QF. Запуск гранулятора виконується кнопкою SB-2 «Пуск». При цьому спрацьовує котушка КМ-1 і контакти КМ-1, КМ-1.1 замикаються. Струм подається на обмотки електродвигуна і він запускається.

Для контролю роботи двигуна (навантаження) використовуються системи вимірювання струму і швидкості обертання двигуна. Ці параметри обробляються аналого-цифровими перетворювачами і записуються в комп'ютер. Для збору інформації про роботу преса використовується датчик сили (SMM2-T1 від Decell), який компактний, легкий і має оптимальні параметри для вимірювання прикладеного тиску.

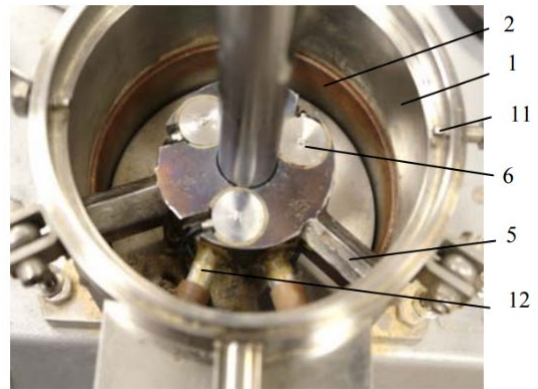
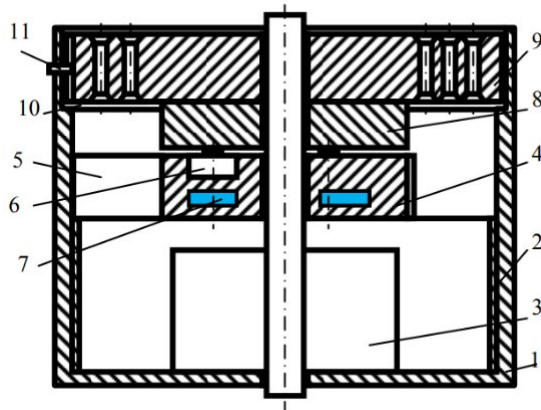
Тензодатчик встановлюється в камері преса під прес-формою і реєструє зусилля, створюване роликами. Сигнал обробляється на тензометричній станції, записується і відображається в цифровому і графічному вигляді на ПК у режимі реального часу.

Дані, отримані від датчиків, можуть бути оброблені на ПК за допомогою відповідного програмного забезпечення. Кільцева опора і вимірювальний стіл встановлюються в пресовій камері грануляційного заводу під матрицею таким чином, щоб усі зусилля, які передають пресованому матеріалу роликами матриці, повністю передавалися на датчик сили (рис. 3.4).

У нижній частині пресувальної камери 1 розташована кільцева опора 2 з вирізом 3, через який виходять спресовані полімерні гранули. Круглий вимірювальний стіл 4 спирається на три опорні ребра 5, розташовані під кутом  $120^\circ$ . Три датчики сили 6, також розташовані під кутом  $120^\circ$ , встановлені на вимірювальному столі по концентричному колу.

Плоский штамп 9 проходить через пластину 8 і впирається в датчики сили, утворюючи зазор 10 з їхніми опорними поверхнями. Стандартний фіксатор 11 запобігає обертанню матриці.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1 - нижня частина камери пресування; 2 - кільцева опора; 3 - прямокутний виріз в опорному циліндрі; 4 - вимірювальний стіл; 5 - опорні ребра вимірювального столу; 6 - датчик сили; 7 - канал для охолоджуючої рідини; 8 - опорна плита; 9 - матриця; 10 - зазор; 11 - стопор; 12 – штуцер

Рисунок 3.4 - Установка датчиків сили

Графік зміни в часі навантаження з моменту запуску до виходу гранулятора на робочий режим представлений на малюнку 3.5. Цей експеримент дав змогу визначити зусилля, з яким ролик впливає на шар сировини, і за цього зусилля спостерігався стабільний вихід полімерних гранул із високими показниками якості.

У міру збільшення товщини шару на матриці і щільності сировини, запресованої в канавки вальців, зусилля, що докладається вальцями, зросло і досягло 4,85 кН після виходу на робочий режим гранулятора. Спостереження під час роботи показали, що наявність у технічній схемі парогенератора дає змогу використовувати свіжу пару для термічної обробки сировини перед пресуванням.

Це дає змогу розширити технічний режим роботи гранулятора, скоротити час перебування сировини в матричному потоці та підвищити продуктивність. Пар може подаватися під час запуску установки, що дає змогу уникнути серйозних перевантажень і аварійних зупинок преса.

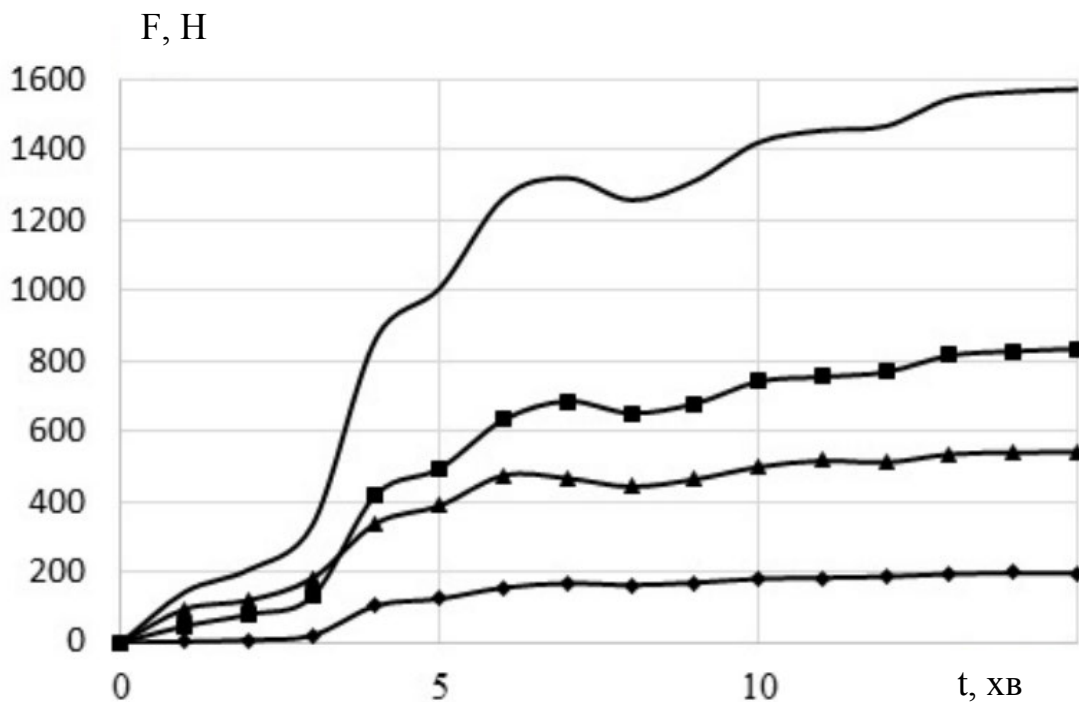


Рисунок 3.5 - Зміна пресуючого зусилля

Випробування режиму пресування для різних фракцій сировини дали змогу визначити оптимальні параметри роботи пелетного заводу з паровою термообробкою сировини та без неї.

Температура насиченої пари становила 125-135 °С. Дослідження показало, що різні фракції сировини потребують окремого пошуку оптимального режиму пресування з моменту запуску до виходу на робочий режим. У процесі пресування на поверхні матриці утворюється шар сировини, товщина якого регулюється установчим зазором. Ролик впливає на шар тільки в двох областях, які являють собою увігнуті поверхні, оточені двома сегментами циліндра. Інтенсивність навантаження в кожній із цих областей нелінійна.

Площа контакту роликів із шаром визначалася за допомогою ручного вимірювального інструменту і становила 0,000704 м<sup>2</sup>. Під час експерименту сила впливу пресувального ролика на шар, що ущільнюється, визначалася за допомогою тензOMETричної системи. Для розрахунку тиску пресування врахо-

вувалися геометричні параметри прес-форми. Площа поверхні, яку займає канал матриці, становить 35,5 % від загальної площі поверхні. Тиск у верхній частині плоскої канавки прес-форми становить у середньому 12,35 МПа.

Висновки до третього розділу.

У цьому розділі описано схему преса для виробництва гранул з відходів взуттєвої промисловості. Для виробництва полімерних гранул обрано плоску матрицю, а в робочу зону подається пара для зменшення тертя між матеріалом і канавками матриці. Основними елементами пропонованого обладнання є плоска матриця, у якій відбувається гранулювання, і пресувальні ролики, які стискають матеріал.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

#### 4 ВЗАЄМОДІЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПРИСТРОЮ З МАТЕРІАЛОМ В ПРОЦЕСІ ГРАНУЛЮВАННЯ

Досягнення високої якості гранул значною мірою залежить від величини тиску пресування. З іншого боку, зі збільшенням тиску пресування зростає питома витрата енергії на гранулювання. Водночас конструктивні характеристики та геометрія фільтри, фільтра і валків мають значний вплив на тиск пресування і споживання енергії.

У цих умовах оптимізація конструктивних і технічних параметрів виробництва полімерних гранул неможлива без повномасштабної математичної моделі, що враховує основні процеси, які відбуваються під час пресування гранул [11]. Полімерні матеріали мають виражену анізотропність залежно від їхньої структури. Унаслідок цього фізичні властивості сировини істотно різняться в поздовжньому (напрямок росту стовбура) і поперечному напрямках.

Оскільки технічний цикл виробництва полімерних гранул містить у собі процес подрібнення сировини до необхідного ступеня дисперсності, на виході з молоткового млина після фільтрації частинки сировини не мають визначеної форми та можуть варіюватися за розміром у кілька разів, від пилу до частинок розміром 5 мм.

Крім того, просторова орієнтація частинок подрібненої сировини, що надходить до гранулятора для ущільнення, хаотична, а отже, вихідну масу полімерної сировини, підготовленої до ущільнення, можна розглядати як порошок із частинок довільної форми з однаковими фізичними властивостями в усіх напрямках, з достатньою для інженерних розрахунків точністю.

Виходячи з цього, всі основні технічні параметри, що використовуються під час розрахунку ущільнення порошку, справедливі і для сировини, що надходить на пресування. Для математичного опису процесу пресування було обрано теорію пружності та пластичності.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки використовувана сировина за своєю природою аналогічна порошковим матеріалам, її фізичні властивості виражаються в термінах межі плинності, модуля пружності, коефіцієнта Пуассона і коефіцієнта тертя ущільненої сировини об стінки каналу.

Подальший процес формування гранул можна розділити на чотири послідовні стадії: 1. вирізання полімерного матеріалу зі спресованого шару; 2. продавлювання вирізаного полімерного матеріалу через конічний отвір у циліндричний канал фільтри; 3. продавлювання сформованих полімерних гранул у циліндричний канал фільтри; 4. вивантаження полімерних гранул із каналу фільтри.

#### 4.1 Визначення тиску вирізання полімерної сировини із спресованого шару

Під час руху пресувального механізму каналом фільтри полімерний матеріал діаметром  $D$  і товщиною  $\delta_{pr}$  розрізають на початковий спресований шар товщиною  $h_2$  (рис. 4.1).

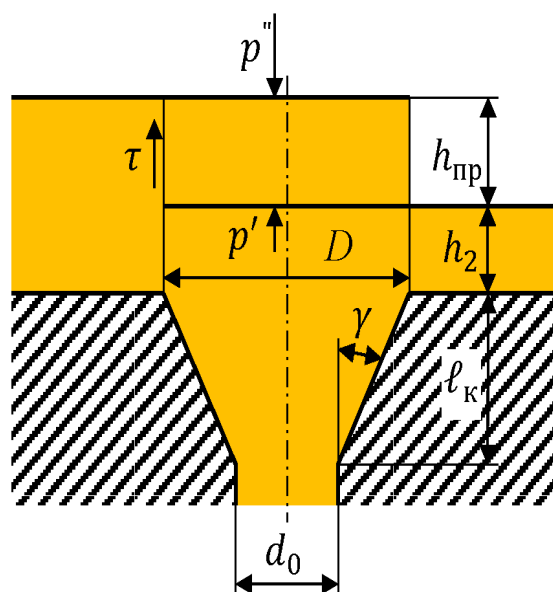


Рисунок 4.1 – Схема вирізки гранули

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Припустимо, що до верхньої поверхні диска прикладено тиск  $L_{1D45D}$ , до нижньої поверхні - тиск  $L_{1D45D}'$ , а до бічних боків - дотичну напругу  $\tau$ . Запишіть умови рівноваги для обраного диска:

$$\left(p'' - p'\right) \frac{\pi D^2}{4} - \tau \pi D h_{np} = 0 \quad (4.1)$$

Звідси

$$\left(p'' - p'\right) = \Delta p_{вир} = \tau \frac{4h_{np}}{D} \quad (4.2)$$

Діаметр  $D$  вхідного отвору каналу може бути виражений через діаметр  $d_0$  циліндричного каналу матриці залежністю:

$$D = d_0 + 2l_{\kappa} \operatorname{tg}(\gamma) \quad (4.3)$$

Диск із спресованої полімерної сировини почне вирізатися, коли дотичні напруження  $\tau$  досягнуть границі текучості  $\sigma_{\tau}$  і вираз (4.2) перетворюється з урахуванням (4.3) на вигляд:

$$\Delta p_{вир} = \sigma_{\tau} \frac{4h_{np}}{d_0 + 2l_{\kappa} \operatorname{tg}(\gamma)} \quad (4.4)$$

#### 4.2 Визначення тиску в конічному каналі

На рисунку 4.2 представлено схему для визначення сил, що виникають під час прошовування тонкої полімерної сировини через конічний канал у циліндричний канал. Процес переміщення сировини в конічному каналі відбувається в області пластичної деформації.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки канал має форму гранчастого конуса, у розрахунках використовується сферична система координат  $\alpha$ , L1\_1D711.

Верхньою межею області об'ємної пластичної деформації є поверхня сфери з радіусом  $R_1$  і кутом  $2\gamma$  у вершині конуса (рис. 4.2), що торкається вхідної кромки гранчастого конуса діаметром  $D$ .

Нижня межа - поверхня сфери з радіусом  $R_2$  і кутом  $2\bar{\gamma}$  у вершині конуса, яка стикається з вихідною гранню усіченого конуса діаметром  $d$ . Сторони об'ємно-пластичної області є внутрішніми конічними поверхнями каналу потоку. Тиск  $p_1$  на верхній межі об'ємно-пластичної області визначається за допомогою балансу сил та енергії.

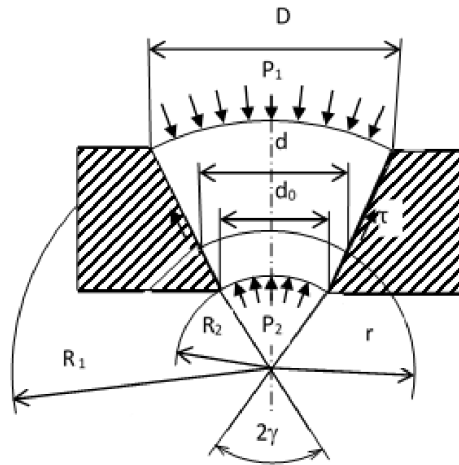


Рисунок 4.2 – Схема визначення сил на конічній ділянці каналу матриці

За проміжок часу  $\Delta t$  тиск  $p_1$  здійснює роботу по розвантаженню, що дорівнює  $A_{випт}$ , яка представляє собою роботу, що здійснюється на виході з конічного каналу  $A_{вих}$ , роботу сил тертя по усіченій конічній внутрішній поверхні  $A_{тр}$ , роботу пластичної деформації дрібнодисперсного полімерного матеріалу в конічному каналі, що витрачена на  $A_{пл}$ .

Рівняння енергетичного балансу записується таким чином:

$$A_{випт} + A_{пл} + A_{вих} + A_{тр} = 0 \quad (4.5)$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рівняння потужностей балансу щодо визначення тиску на вході в конічну ділянку:

$$N_{\text{виг}} + N_{\text{пл}} + N_{\text{вих}} + N_{\text{тр}} = 0 \quad (4.6)$$

#### 4.2.1 Визначення пластичної потужності деформації

Рівняння елементарного об'єму рівноваги [17]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r \sin(\varphi)} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \left[ 2\sigma_r - (\sigma_\theta + \sigma_\varphi) + \tau_{r\varphi} \operatorname{ctg}(\varphi) \right] = 0; \\ \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r \sin(\varphi)} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \left[ 3\tau_{\theta r} + 2\tau_{\theta\varphi} \operatorname{ctg}(\varphi) \right] = 0; \\ \frac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial r} + \frac{1}{r \sin(\varphi)} \frac{\partial \tau_{\varphi\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \left[ 3\tau_{\varphi r} - (\sigma_\theta - \sigma_\varphi) \operatorname{ctg}(\varphi) \right] = 0. \end{cases} \quad (4.7)$$

Рівняння зв'язку між швидкостями течії та швидкостями лінійних відносних деформацій:

$$\begin{cases} \xi_r = \frac{\partial v_r}{\partial r}; \\ \xi_\theta = \frac{1}{r \sin(\varphi)} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_\varphi \operatorname{ctg}(\varphi)}{r} + \frac{v_r}{r}; \\ \xi_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{v_r}{r}. \end{cases} \quad (4.8)$$

Рівняння зв'язку між швидкостями течії і швидкостями кутових відносних деформацій:

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{cases} \eta_{r\theta} = \frac{1}{r \sin(\varphi)} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r}; \\ \eta_{\theta\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\theta r}}{\partial \varphi} - \frac{v_\theta \operatorname{ctg}(\varphi)}{r} + \frac{1}{r \sin(\varphi)} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \theta}; \\ \eta_{\varphi r} = \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi}. \end{cases} \quad (4.9)$$

Оскільки щільність полімерної спресованої сировини не змінюється, то має виконуватися умова об'єму сталості (умова стискання), яка має вигляд:

$$\xi_r + \xi_\theta + \xi_\varphi = 0. \quad (4.10)$$

Передбачається, що рух полімерного матеріалу конічним каналом відбувається в напрямку радіального вектора конічного каналу і відсутній рух у перпендикулярному йому напрямку. У цьому разі швидкість переміщення вздовж осей L1\_1D3 і L1\_1D711 та їхні часткові похідні дорівнюють нулю, тобто.

$$v_\theta = 0; v_\varphi = 0; \frac{\partial}{\partial \theta} = 0; \frac{\partial}{\partial \varphi} = 0. \quad (4.11)$$

З урахуванням цього припущення рівняння системи (4.7), (4.8) та (4.9) набувають вигляду:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} [2\sigma_r - (\sigma_\theta + \sigma_\varphi) + \tau_{r\varphi} \operatorname{ctg}(\varphi)] = 0; \\ \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r} [3\tau_{\theta r} + 2\tau_{\theta\varphi} \operatorname{ctg}(\varphi)] = 0; \\ \frac{\partial \tau_{\varphi r}}{\partial r} + \frac{1}{r} [3\tau_{\varphi r} - (\sigma_\theta - \sigma_\varphi) \operatorname{ctg}(\varphi)] = 0. \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\begin{cases} \xi_r = \frac{\partial v_r}{\partial r}; \\ \xi_\theta = \frac{v_r}{r}; \\ \xi_\varphi = \frac{v_r}{r}. \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\begin{cases} \eta_{r\theta} = 0; \\ \eta_{\theta\varphi} = 0; \\ \eta_{\varphi r} = 0. \end{cases} \quad (4.14)$$

Прийmemo, що швидкість руху спресованої полімерної дрібнодисперсної сировини в кoнiчному каналі через будь-яку точку поверхні кульового сегмента з кутом при вершині  $2\gamma$  і радіусом  $r$  однакова, тобто  $v_r(r_i) = idem vr(ri) = ide$ . Рівняння швидкості руху полімерної сировини в радіальному напрямку каналу кoнiчного  $v_r$  визначимо з умови сталості об'ємної витрати через будь-яку поверхню кульового сегмента з кутом при вершині  $2\gamma$  в межах зміни радіусу від  $R_1$  до  $R_2$ .

Нехай радіальна швидкість руху сировини на вході каналу кoнiчного при  $r=R_1$  дорівнює  $v_1$ , а на радіусі  $r$  дорівнює  $v_r$ . Площа поверхні кульового сегмента з кутом при вершині  $2\gamma$  і радіусом  $r$  дорівнює:

$$S(r) = \pi r^2 (2 + \sin^2 \gamma - 2 \cos \gamma) \quad (4.15)$$

Рівняння нерозривності

$$q = v_1 S_1 = v_1 \pi r^2 (2 + \sin^2 \gamma - 2 \cos \gamma) = const. \quad (4.16)$$

Виберемо час  $dt$ . Витрата полімерної сировини через поверхню кульового сегмента радіуса  $r$  складе:

$$Q = v_r \pi r^2 (2 + \sin^2 \gamma - 2 \cos \gamma) dt, \quad (4.17)$$

а через вихідний переріз конічного каналу:

$$Q = v_1 \pi R_1^2 (2 + \sin^2 \gamma - 2 \cos \gamma) dt \quad (4.18)$$

і рівняння сталості витрати набирає вигляду:

$$v_r \pi r^2 (2 + \sin^2 \gamma - 2 \cos \gamma) dt = v_1 \pi R_1^2 (2 + \sin^2 \gamma - 2 \cos \gamma) dt. \quad (4.19)$$

Розв'язуючи це рівняння щодо  $v_r$ , отримаємо:

$$v_r = -v_1 \frac{R_1^2}{r^3}. \quad (4.20)$$

Після підстановки рівняння (4.20) у систему рівнянь (4.13) та перетворень отримаємо вирази для швидкостей лінійних відносних деформацій:

$$\begin{cases} \xi_r = 2v_1 \frac{R_1^2}{r^3}; \\ \xi_\theta = -v_1 \frac{R_1^2}{r^3}; \\ \xi_\varphi = -v_1 \frac{R_1^2}{r^3}. \end{cases} \quad (4.21)$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Підстановка знайдених значень швидкостей лінійних відносних деформацій  $d$  рівняння (4.10) дає:

$$\xi_r + \xi_\theta + \xi_\varphi = 2v_1 \frac{R_1^2}{r^3} - v_1 \frac{R_1^2}{r^3} - v_1 \frac{R_1^2}{r^3} = 0.$$

Умова нерозривності виконується.

Зовнішні сили, прикладені до стиснутого об'єму полімерної сировини в кінцічному проточному каналі, з одного боку, здійснюють роботу  $\dot{W}$  з її виштовхування. З іншого боку, зовнішня сила пластично деформує полімерну сировину в циліндричну форму. Виберіть сферичний елемент із кутом нахилу вершини  $2\theta$  і товщиною  $\dot{W}$ . Об'єм обраного елемента становить:

$$dV = \pi r^2 (2 + \sin^2 \gamma - 2 \cos \gamma) dr. \quad (4.22)$$

Потужність деформації визначається за залежністю [56]:

$$dN_{nl} = \sigma_\tau \xi_i dV, \quad (4.23)$$

де  $\sigma_\tau$  – середнє за об'ємом значення напруги течії полімерної спресованої сировини;  $\xi_i$  - інтенсивність деформації відносних швидкостей.

Інтенсивність деформації відносних швидкостей нескінечно малого об'єму може бути визначена за залежністю [8]:

$$\xi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\xi_r - \xi_\theta)^2 + (\xi_\theta - \xi_\varphi)^2 + (\xi_\varphi - \xi_r)^2 + \frac{3}{2}(\eta_{r\theta}^2 + \eta_{\theta\varphi}^2 + \eta_{\varphi r}^2)}. \quad (4.24)$$

З огляду на те, що швидкості кутових відносних деформацій згідно з (4.14) дорівнюють нулю, тобто  $\eta_{r\theta} = 0$ ,  $\eta_{\theta\varphi} = 0$  і  $\eta_{\varphi r} = 0$ , то після підстановки в

рівняння (4.24) вирази для швидкостей лінійних відносних деформацій з (4.21) після перетворень отримаємо:

$$\xi_i = 2\nu_1 \frac{R_1^2}{r^3}. \quad (4.25)$$

Для визначення роботи повної пластичної деформації у конічному каналі необхідно взяти інтеграл:

$$N_{nl} = \int_V dN_{nl}, \quad (4.26)$$

або після підстановки в дане рівняння для елементарної роботи виразу з рівняння (4.23):

$$N_{nl} = \int_V 2\sigma_\tau \nu_1 \frac{R_1^2}{r^3} dV = \int_{R_2}^{R_1} 2\sigma_\tau \nu_1 \frac{R_1^2}{r} [2(1-\cos\gamma) + \sin^2\gamma] dr.$$

Після підстановки меж інтегрування отримаємо рівняння для визначення потужності, що витрачається на пластичну деформацію в конічному каналі фільтри матриці:

$$N_{nl} = -2\pi\sigma_\tau \nu_1 R_1^2 [2(1-\cos\gamma) + \sin^2\gamma] \ln \frac{R_1}{R_2}. \quad (4.27)$$

#### 4.2.2 Визначення потужності сил виштовхування у перерізі конічного каналу

Потужність сили є скалярним добутком вектора сили та вектора діючої швидкості, тобто  $N = \overline{F} \cdot \overline{v}$ . Припустимо, що тиск  $p_1$  у полімерній спресованій сировині на поверхню  $S_1$  сферичного сектора радіусу  $R_1$  на вході в конічний канал однаковий у всіх її точках, тобто  $p_1(R_1) = \text{idem}$ . Тиск  $p_2$  у полімерної

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

спресованій сировині на поверхню  $S_2$  сферичного сектора радіусу  $R_2$  на виході з конічного каналу та вході в циліндричний канал однакою у всіх точках, тобто  $p_2(R_2)=idem$ . Швидкість руху сировини у цих точках також однакою по всій поверхні  $S_1$ , збігається у напрямку тиску  $p_1$  і дорівнює  $v_1$ . Швидкість руху полімерної спресованої сировини в цих точках також однакою по всій поверхні  $S_2$ , збігається у напрямку з тиском  $p_2$  і дорівнює  $v_2$ . Тоді потужність сил тиску у перерізі вхідному конічного каналу дорівнюватиме:

$$N_{вит} = F_1 v_1 = (-p_1) S_1 (-v_1),$$

або

$$N_{вит} = \pi p_1 v_1 R_1^2 \left[ 2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma \right]. \quad (4.28)$$

Потужність сил тиску, спрямованих на проштовхування маси спресованої через конічний канал буде дорівнювати:

$$N_{вих} = F_2 v_2 = p_2 S_2 (-v_2) = -\pi p_2 v_2 R_2^2 \left[ 2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma \right]. \quad (4.29)$$

4.2.3 Визначення потужності сил тертя по внутрішній поверхні конічного каналу

Виділимо на поточному радіусі  $r$  на бічній поверхні каналу циліндричного елементарну ділянку  $dS$ , що дорівнює:

$$dS = 2\pi r dr \quad (4.30)$$

Елементарна сила тертя на цій ділянці елементарній дорівнюватиме:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$dF_{mp} = -\tau dS = -\tau 2\pi r dr, \quad (4.31)$$

де  $\tau$  – дотичні напруження, що діють на елементарній ділянці  $dS$ .

$$\tau = \sigma_{\tau} \mu_{mp} \nu,$$

де  $\mu_{тр}$  - коефіцієнт тертя між полімерною спресованою сировиною та матеріалом матриці;  $\nu$ -коефіцієнт Пуассона.

Визначимо потужність сил тертя, проінтегрувавши сили тертя  $dN_{тр}$  по всій внутрішній поверхні конічного каналу від  $R_2$  до  $R_1$ :

$$N_{mp} = \int_V \nu_r dF_{mp} = \int_{R_2}^{R_1} 2\pi \mu_{mp} \nu \sigma_{\tau} \nu_r r dr, \quad (4.32)$$

або з урахуванням (4.20):

$$N_{mp} = \int_{R_2}^{R_1} -2\pi \mu_{mp} \nu \sigma_{\tau} \nu_r r dr = -2\pi \mu_{mp} \nu \sigma_{\tau} \nu_1 R_1^2 \ln \frac{R_1}{R_2}. \quad (4.33)$$

#### 4.2.4 Визначення тиску в конічному каналі

Для визначення тиску в полімерній спресованій сировині на вході в конічний канал скористаємось рівнянням потужностей балансу. Для цього підставимо в рівняння (4.6) знайдені значення потужності сили  $N_{вит}$  (4.28) та  $N_{вих}$  (4.29), потужність деформування пластичного  $N_{пл}$  (4.27) та потужність сил тертя об внутрішню поверхню конічного каналу  $N_{тр}$ :

$$\begin{aligned} & \pi p_1 \nu_1 R_1^2 \left[ 2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma \right] - 2\pi \sigma_\tau \nu_1 R_1^2 \left[ 2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma \right] \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} - \\ & - \pi p_2 \nu_2 R_2^2 \left[ 2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma \right] - 2\pi \mu_{mp} \nu \sigma_\tau \nu_1 R_1^2 \ln \frac{R_1}{R_2} = 0. \end{aligned} \quad (4.34)$$

Звідси

$$p_1 = p_2 \frac{\nu_2 R_2^2}{\nu_1 R_1^2} + 2 \left( 1 + \frac{\mu_{mp} \nu}{2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma} \right) \sigma_\tau \ln \frac{R_1}{R_2}. \quad (4.35)$$

За рівнянням сталості витрат (4.16) маємо  $\nu_1 R_1^2 = \nu_2 R_2^2$ , тоді

$$p_1 = p_2 + 2 \left( 1 + \frac{\mu_{mp} \nu}{2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma} \right) \sigma_\tau \ln \frac{R_1}{R_2}. \quad (4.36)$$

При цьому

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{D}{d_0}. \quad (4.37)$$

Підставимо (4.37) у (4.36). Отримаємо рівняння для розрахунку тиску перепаду в кінчному каналі матриці:

$$\Delta p_\kappa = p_1 - p_2 = 2 \left( 1 + \frac{\mu_{mp} \nu}{2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma} \right) \sigma_\tau \ln \frac{D}{d_0}. \quad (4.38)$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 4.3 Визначення тиску в циліндричному каналі матриці

Після виходу з конічної частини каналу полімерна спресована маса надходить в циліндричну частину матриці каналу, який часто називають калібрувальним. При русі спресованої гранули циліндричним каналом вона має форму циліндра, тому в циліндричному каналі при пресуванні полімерної гранули відсутні пластичні деформації. Після входу в циліндричний канал полімерна гранула знаходиться в формованому стані. Діаметр деформованої гранули дорівнює діаметру циліндричного каналу  $d_0$  (рисунок 4.3). На виході з каналу матриці діаметр гранули збільшується до  $D_{гр}$  за рахунок пружного зміщення по радіусу  $u_r$ .

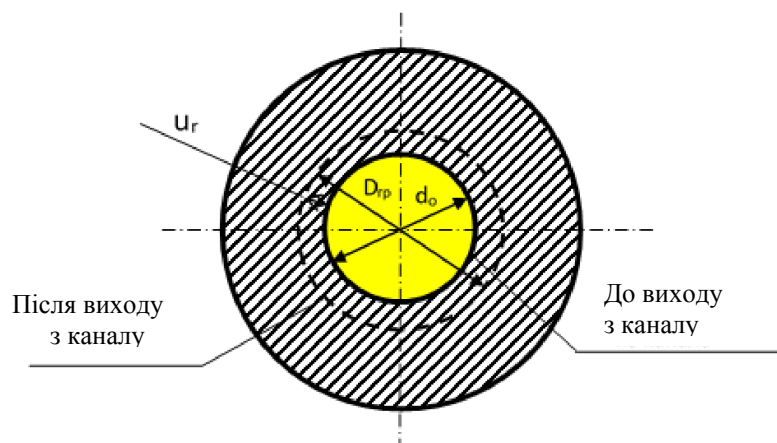


Рисунок 4.3 – Схема пружно-деформованого стану полімерної гранули у циліндричному каналі матриці

Оскільки спресовані полімерні гранули мають циліндричну форму в циліндричному каналі, як розрахункову систему обрано полярні системи координат  $r$ ,  $\theta$  і  $L1\_1D467$ . Вісь  $L1\_1D467$  збігається з центральною віссю циліндричного каналу прес-форми і спрямована до виходу прес-форми. Слід зазначити, що після того, як спресований полімер виходить з конічного каналу і потрапляє в циліндричний канал, його пластична деформація припиняється, і спресовані гранули під дією зовнішніх сил піддаються тільки пружній деформації. На під-

ставі цього опису основні положення теорії пружності використовуються для подальших математичних досліджень.

Рівняння теорії пружності в полярній системі координат:

вектор переміщень:

$$\bar{u} = (u_r, u_\theta, u_z), \quad (4.39)$$

де  $u_r, u_\theta$  та  $u_z$  – проекції вектора переміщення точок на осі  $r, \theta$  та  $z$ .

рівняння рівноваги;

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \Phi_r = 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial z} + \Phi_\theta = 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \Phi_z = 0 \end{cases} \quad (4.40)$$

закон Гука:

- для напружень нормальних:

$$\begin{cases} \sigma_r = \lambda \varepsilon + 2\mu \varepsilon_r \\ \sigma_\theta = \lambda \varepsilon + 2\mu \varepsilon_\theta \\ \sigma_z = \lambda \varepsilon + 2\mu \varepsilon_z \end{cases} \quad (4.41)$$

- для напружень дотичних:

$$\begin{cases} \tau_{r\theta} = 2\mu \varepsilon_{r\theta} \\ \tau_{rz} = 2\mu \varepsilon_{rz} \\ \tau_{\theta z} = 2\mu \varepsilon_{\theta z} \end{cases}, \quad (4.42)$$

де  $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ ,  $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$  – параметри Ламе;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $E$  -

модуль пружності дисперсної полімерної сировини;

рівняння пружних відносних деформацій:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z \quad (4.43)$$

вираження деформацій шляхом зміщення:

- для лінійних відносних деформацій:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{r} \\ \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{r} + \frac{u_r}{r} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{cases} \quad (4.44)$$

- для кутових відносних деформацій:

$$\begin{cases} \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_r}{r} \right) \\ \varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \\ \varepsilon_{\theta z} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right) \end{cases} \quad (4.45)$$

Для побудови розрахункової схеми виділимо в полімерній частці нескінченно тонкий диск, перпендикулярний осі  $z$ , що має товщину  $dz$ . На цьому диску виділіть нескінченно малий сектор із центральним кутом  $d\theta$ . На цьому секторі, на відстані  $r$  від осі  $z$ , розташовано елемент шириною  $d^a$ . Напишіть рівняння рівноваги для обраного нескінченно малого елемента.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 4.4 показано схему пружного деформованого стану гранул у циліндричному каналі.

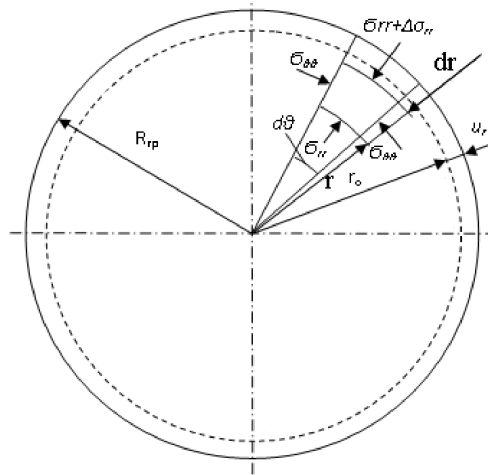


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема пружнодеформованого стану гранули

Спресований тонкодисперсний полімерний матеріал безперервно надходить через конічний канал на вхід циліндричного каналу і безперервно екструдеться з циліндричного каналу на виході з фільтри. У цьому випадку циліндричні гранули можна вважати нескінченно довгими, а  $u_\theta = 0$ , оскільки процеси, які відбуваються з гранулами в циліндричному каналі, є квазістатичними.

Гравітацією, що діє на полімерні гранули, можна знехтувати, оскільки вона на кілька порядків менша за силу тиску, що діє на ті самі гранули. Тому проекція вектора інтенсивності масової сили на осі  $r$ ,  $\theta$  і  $z$  дорівнює нулю, тобто  $I$ .

Поперечний переріз гранули має форму кола. У цьому випадку, через симетрію, зсув не залежить від полярного кута  $\theta$ . Крім того, оскільки пластична деформація відсутня, тангенціальне зміщення дорівнює нулю, тобто  $u_\theta = 0$ .

Виходячи з цих припущень, основні рівняння теорії пружності мають такий вигляд:

рівняння рівноваги:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0 \end{cases} \quad (4.46)$$

закон Гука:

- для нормальних напруг:

$$\begin{cases} \sigma_r = \lambda \varepsilon + 2\mu \varepsilon_r \\ \sigma_\theta = \lambda \varepsilon + 2\mu \varepsilon_\theta \\ \sigma_z = \lambda \varepsilon \end{cases} \quad (4.47)$$

- для дотичних напружень:

$$\begin{cases} \tau_{r\theta} = 0 \\ \tau_{rz} = 0 \\ \tau_{\theta z} = 0. \end{cases} \quad (4.48)$$

рівняння деформацій:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta. \quad (4.49)$$

вираження відносних деформацій через зміщення:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{r} \\ \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}. \end{cases} \quad (4.50)$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використовуюючи вираз для деформацій відносних (4.50) в рівнянні (4.49) і системі рівнянь (4.47), одержимо після перетворень:

$$\begin{cases} \sigma_r = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\lambda u_r}{r} \\ \sigma_\theta = \lambda \frac{\partial u_r}{\partial r} + (\lambda + 2\mu) \frac{u_r}{r} \end{cases} \quad (4.51)$$

$$\varepsilon = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \quad (4.52)$$

Після підстановки рівнянь для нормальних напруг (4.51) в систему рівноваги рівнянь (4.46) та виконання нескладних перетворень отримаємо диференціальне рівняння виділеного елемента рівноваги гранули:

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} = 0 \quad (4.53)$$

Для вирішення диференціального рівняння (4.53) необхідно встановити граничні умови.

Перша гранична умова – на поверхні гранули  $r=r_0$  всередині каналу циліндричного матриці нормальна напруга дорівнює місцевому тиску.

Для вибору другої граничної умови вважається, що гранула поза каналом циліндричним матриці при нульовому надлишковому тиску на її циліндричній поверхні має радіус  $r=R_{гр}$  і після застосування надлишкового зовнішнього тиску  $p$  пружно деформувалася до радіуса  $r_0$ .

$$\text{при } r=r_0 = \frac{d_0}{2} \text{ маємо } \sigma_r = -p, \quad (4.54)$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\text{при } r = R_{sp} = \frac{D_{sp}}{2} \text{ маємо } \sigma_r = 0. \quad (4.55)$$

Часткове рішення рівняння (4.53) має вигляд:

$$u_r = r^n. \quad (4.56)$$

Двічі диференціюючи, отримаємо:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} = nr^{(n-1)} \quad (4.57)$$

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} = (n^2 - n)r^{(n-2)} \quad (4.58)$$

Після підстановки (4.57) і (4.58) рівняння рівноваги (4.53) отримаємо характеристичне рівняння:

$$(n^2 - n)r^{(n-2)} + \frac{1}{r}nr^{(n-1)} - \frac{r^n}{r^2} = 0,$$

або після спрощень:

$$n^2 - 1 = 0. \quad (4.59)$$

Рішенням характеристичного рівняння є корені  $n_1 = +1$  і  $n_2 = -1$ , а розв'язання диференціального рівняння рівноваги (4.53) має вигляд:

$$u_r = C_1 r + C_2 r^{-1}, \quad (4.60)$$

де  $C_1$  та  $C_2$  – константи, що визначаються з граничних умов.

Продиференціюємо рівняння (4.60):

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} = C_1 - \frac{C_2}{r^2}. \quad (4.61)$$

Підставляючи (4.60) і (4.61) в систему рівнянь (4.51), після перетворень отримаємо:

$$\begin{cases} \sigma_r = (2\lambda + 2\mu)C_1 - 2\mu \frac{C_2}{r^2} \\ \sigma_\theta = (2\lambda + 2\mu)C_1 + 2\mu \frac{C_2}{r^2} \end{cases} \quad (4.62)$$

З умови (4.55) отримаємо:

$$(\lambda + \mu)C_1 - \mu \frac{C_2}{R_{zp}^2} = 0.$$

Звідси

$$C_1 = \frac{\mu}{(\lambda + \mu)} \frac{C_2}{R_{zp}^2}. \quad (4.63)$$

З урахуванням поставленої умови (4.54) отримаємо:

$$(2\lambda + 2\mu)C_1 - 2\mu \frac{C_2}{r_0^2} = -p \quad (4.64)$$

Після підстановки (4.63) та проведених перетворень отримаємо:

$$C_2 = \frac{r_0^2 R_{zp}^2}{(R_{zp}^2 - r_0^2)} \frac{p}{2\mu} \quad (4.65)$$

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після підстановки (4.65) у (4.63) знайдемо вираз для константи інтегрування  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{r_0^2}{(R_{zp}^2 - r_0^2)} \frac{p}{2(\lambda + \mu)}. \quad (4.66)$$

Підставимо отримані значення констант  $C_1$  і  $C_2$  в систему рівнянь (4.62) і отримаємо вирази для визначення тангенціальних і радіальних напруг:

$$\begin{cases} \sigma_r = -p \frac{r_0^2}{(R_{zp}^2 - r_0^2)} \left( \frac{R_{zp}^2}{r^2} - 1 \right) \\ \sigma_\theta = -p \frac{r_0^2}{(R_{zp}^2 - r_0^2)} \left( \frac{R_{zp}^2}{r^2} + 1 \right) \end{cases} \quad (4.67)$$

Величина поточного переміщення  $u_r$  після підстановки сталих інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  у рівняння (4.60) може бути визначена залежністю:

$$u_r = p \frac{r r_0^2}{(R_{zp}^2 - r_0^2)} \left( \frac{1}{\lambda + \mu} + \frac{1}{\mu} \frac{R_{zp}^2}{r^2} \right). \quad (4.68)$$

Виразивши коефіцієнти Ламе через значення модуля пружності  $E$  та коефіцієнта Пуассона  $\nu$ , отримаємо після підстановки в (4.68):

$$u_r = p \frac{(1 + \nu)}{E} \frac{r r_0^2}{(R_{zp}^2 - r_0^2)} \left( 1 - 2\nu + \frac{R_{zp}^2}{r^2} \right). \quad (4.69)$$

Припустивши, що  $r=r_0$  перетворимо рівняння (4.69):

$$u_r = p \frac{(1+\nu)}{E} \frac{r_0}{\left(\frac{R_{zp}^2}{r_0^2} - 1\right)} \left(1 - 2\nu + \frac{R_{zp}^2}{r_0^2}\right). \quad (4.70)$$

Радіальне зміщення  $u^a$  можна визначити як різницю між радіусом гранули після її виходу з матриці та радіусом циліндричного паза матриці.

Радіальне зміщення в кожній точці на поверхні гранули під час вдавнення гранули в матрицю:

$$u_r = R_{zp} - r_0. \quad (4.71)$$

Після підстановки рівняння (4.71) в (4.70) отримаємо рівняння для визначення бічного тиску спресованої гранули на внутрішню поверхню циліндричного каналу:

$$p_6 = p \frac{E}{1+\nu} \frac{(R_{zp} - r_0) \left(\frac{R_{zp}^2}{r_0^2} - 1\right)}{r_0 \left(1 - 2\nu + \frac{R_{zp}^2}{r_0^2}\right)}. \quad (4.72)$$

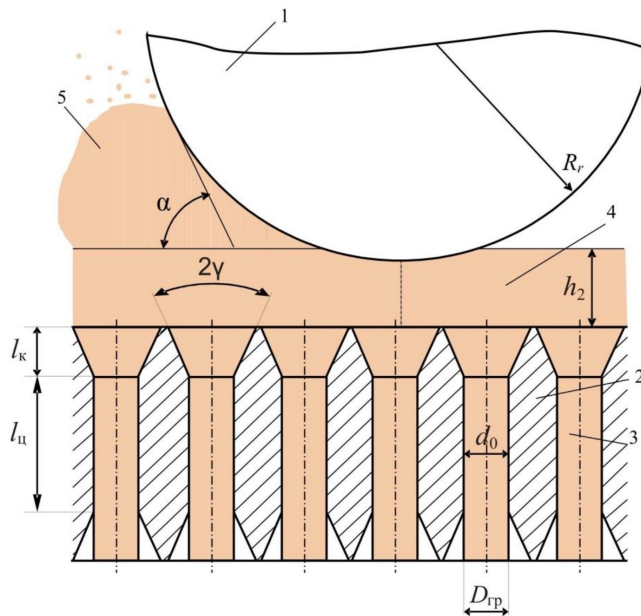
або переходячи до діаметрів:

$$p_6 = p \frac{E}{1+\nu} \frac{(D_{zp} - d_0) \left(\frac{D_{zp}^2}{d_0^2} - 1\right)}{d_0 \left(1 - 2\nu + \frac{D_{zp}^2}{d_0^2}\right)}. \quad (4.73)$$

Силу тертя гранули полімерної об внутрішню поверхню циліндричного каналу матриці знайдемо за рівнянням:

$$F_{тр} = \pi d_0 l_{ц} \mu_{тр} P_{\sigma}, \quad (4.74)$$

де  $l_{ц}$  - довжина каналу циліндричного матриці (рисунок 4.5).



1 - пресувальний ролик; 2 – матриця; 3 –гранула; 4 – спресований шар полімерної дрібнодисперсної сировини; 5 - насипний шар дрібнодисперсної полімерної сировини

Рисунок 4.5 – Розрахункова схема процесу пресування гранули полімерної:

Сили виштовхування гранули з каналу циліндричного матриці:

$$F_{вит} = \frac{\pi d_0^2}{4} \Delta p_{ц}. \quad (4.75)$$

де  $\Delta p_{ц}$  - зміна тиску між вхідним і вихідним отворами каналу циліндричного матриці.

Прирівнюючи сили тертя (4.74) та виштовхувальної сили (4.75), визначено зміну тиску в циліндричному каналі:

$$\Delta p_{\text{ц}} = 4 \frac{\mu_{\text{мп}} l_{\text{ц}}}{d_0} p_{\text{б}}. \quad (4.76)$$

Після підстановки в цей вираз значення тиску на поверхню циліндричну  $p_{\text{б}}$  з (4.73) отримаємо:

$$\Delta p_{\text{ц}} = 4 \frac{\mu_{\text{мп}} l_{\text{ц}}}{d_0} \frac{E}{1+\nu} \frac{(D_{\text{зр}} - d_0) \left( \frac{D_{\text{зр}}^2}{d_0^2} - 1 \right)}{d_0 \left( 1 - 2\nu + \frac{D_{\text{зр}}^2}{d_0^2} \right)}. \quad (4.77)$$

З отриманого рівняння видно, що перепад тиску довжиною каналу циліндричного фільтр'єри матриці прямо пропорційний її довжині.

#### 4.4 Визначення повного тиску пресування

Полімерні гранули, спресовані на виході з каналу фільтр'єри, перебувають під атмосферним тиском, тому під час визначення тиску пресування ними можна знехтувати.

У цьому разі тиск пресування  $p_{\text{пр}}$ , створюваний пресувальним роликком, можна визначити за таким рівнянням:

$$p_{\text{пр}} = \Delta p_{\text{вир}} + \Delta p_{\text{к}} + \Delta p_{\text{ц}}. \quad (4.78)$$

Після підстановки в (4.78) виразу для  $\Delta p_{\text{вир}}$  з (4.4),  $\Delta p_{\text{ц}}$  з (4.77) и  $\Delta p_{\text{к}}$  з (4.38) і зроблених перетворень одержимо:

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$p_{np} = \sigma_{\tau} \frac{4h_{np}}{d_0 + 2l_k \operatorname{tg}(\gamma)} + 2 \left( 1 + \frac{\mu_{mp} \nu}{2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma} \right) \sigma_{\tau} \ln \frac{D}{d_0} +$$

$$+ 4 \frac{\mu_{mp} l_y}{d_0} \frac{E}{1 + \nu} \frac{(D_{zp} - d_0) \left( \frac{D_{zp}^2}{d_0^2} - 1 \right)}{d_0 \left( 1 - 2\nu + \frac{D_{zp}^2}{d_0^2} \right)} \quad . \quad (4.79)$$

Ця залежність показує, що тиск пресування, який чиниться роликом на гранули в циліндричній канавці, є лінійним. Тиск пресування залежить від таких параметрів, як модуль Юнга спресованої полімерної сировини, коефіцієнт Пуассона і коефіцієнт тертя внутрішньої поверхні циліндричної канавки матриці. Отримані рівняння пов'язують тиск пресування полімерних гранул з основними конструктивними характеристиками пресового обладнання та фізичними властивостями тонкодисперсної полімерної сировини.

#### Висновки до четвертого розділу

Основна вимога до пелетних млинів - отримання гранул необхідної щільності, міцності та розміру за умови забезпечення паспортної продуктивності. На величину тиску пресування впливають такі конструктивні характеристики, як радіус ролика, що пресує, регульований зазор між циліндричною поверхнею ролика, що пресує, і матрицею, діаметр циліндричного паза матриці і його довжина, розмір конічного паза матриці і кут нахилу вершини конуса. Крім конструктивних характеристик, на тиск пресування також впливають фізичні властивості спресованої дрібнодисперсної полімерної сировини, як-от межа плинності, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт тертя спресованої полімерної сировини об стінки матриці та відносне розширення гранул після виходу з матриці.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Переробка полімерних відходів, що утворюються під час виробництва товарів народного споживання, має важливе економічне та екологічне значення. Крім того, залучення полімерних матеріалів, отриманих з відходів інших виробництв, до виробництва товарів народного споживання дає змогу знизити вартість сировини і навіть отримати полімерні композиції з кращими споживчими властивостями.

У цій роботі пропонується технологія переробки відходів полімерних матеріалів. Для її реалізації розроблено відповідний пристрій - гранулятор із плоскою матрицею.

Наведено аналітичний опис процесів взаємодії робочого органа пропонованого пристрою з матеріалом, що переробляється на ньому.

					MPMA 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Є.О. Михайлова. Пластикове забруднення – одна з головних екологічних проблем людства. Комунальне господарство міст, 2020, том 4, вип. 157 с. 109-121. DOI 10.33042/2522-1809-2020-4-157-109-121.

2. Промислова екологія – Ресурсоенергозбереження у галузі переробки полімерів. URL: <http://eco.com.ua/content/resursoenergozberezhennya-v-galuzi-pererobki-polimeriv> (дата звернення 20.11.2024).

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

4. Патент UA 46606 МПК: А61F 5/14Спосіб виготовлення устілок. Опубліковано: 15.05.2002. Автори: Чернов Є. І. та ін.

5. Hussain G., Hassan M., Wei H., Buhl J., Xiao M., Iqbal A., Qayyum H., Ahmed Riaz A., Muhammad R., Ostrikov K. Advances on Incremental forming of composite materials // Alexandria Engineering Journal, 2023, p. 308-336.

6. Слепцова І. Л. Термічна деполімеризація промислових відходів полімерів / І. Л. Слепцова, Н. В. Сова, Б. М. Савченко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія : Технічні науки. - 2016. - № 3. - С. 193-199.

7. Static machines for the production of one-colour soles in compact and expanded thermoplastic materials for any type of footwear, with or without inserts (leather insoles, welts and heel bands, etc.). URL: <http://www.maingroup.com/eng/index.php?p=sp-45-termo>. (дата звернення 20.10.2024).

8. Суберляк О.В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів / О.В. Суберляк, П. І. Баштанник. - Київ: НТУ «КПІ», 2006. - 270 с.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. В. С. Міщенко, і Г. П. Виговська, Організаційно-економічний механізм поводження з відходами в Україні та шляхи його вдосконалення. Київ, Україна: Наукова думка, 2009, 294 с.

10. Закон України “Про відходи” № 187/98-ВР від 5 березня 1998 року, зі змінами від 18.12.17 року. Електронний ресурс: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/187/98-%D0%B2%D1%80>.

11. Скиба М.Є. Обладнання для переробки відходів. Навчальний посібник. - Хмельницький.: ХДУ, 2004. - 90 с.

12. Ілляш О.Е., Бредун В.І., Чухліб Ю.О. Навчальний посібник «Управління відходами: Частина 1. Управління відходами на регіональному та місцевому рівнях». – Полтава: ПП «Астрыя», 2021. – 187 с.

13. Рубанка М. М. Перспективи розвитку технологій переробки відходів натуральної шкіри / М. М. Рубанка, О. З. Гладчук, В. П. Місяць // Наукові розробки молоді на сучасному етапі : тези доповідей XI Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів, 19-20 квітня 2012 р. – К. : КНУТД, 2012. – Т. 2. – С. 196.

14. Olena Stabnikova, Oleksandr Shevchenko, Viktor Stabnikov, Octavio Paredes-López (2024). Bioconversion of Wastes to Value-added Products. CRC Press, Routledge. с. 384.

15. Циркулярна політика управління відходами: підручник / А. І. Крисоватий, Р. Є. Зварич, І. Я. Зварич. Тернопіль : ЗУНУ, 2023. 458 с.

16. Кращі європейські практики управління відходами (посібник) / А. Войціховська, О. Кравченко, О. Мелень-Забрамна, М. Панькевич, [за заг. ред. О. Кравченко] - Видавництво «Компанія „Манускрипт“» - Львів, 2019. - 64 с.

17. Рубанка М. М. Відходи легкої промисловості, способи переробки та області подальшого використання / М. М. Рубанка, В. П. Місяць // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. - 2015. - № 4 (88) : Серія "Технічні науки". - С. 34-39.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Центр ресурсоефективного та чистого виробництва. URL: <http://www.recpsc.org/recycling-footwear-apparel-industry-ua/> (дата звернення: 19.10.2024).

19. Сайт компанії Вторма. URL: <https://vtorma.ua/> (дата звернення: 15.10.2024).

20. Сайт компанії Укрлегпром. URL: <https://ukrlegprom.org/ua/> / (дата звернення: 15.10.2024).

21. Katherine Schofield, Deborah Schwartz. Orthotic Design and Fabrication for the Upper Extremity: A Practical Guide. – Slack Incorporated, 2019. – 251 p.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ддатов А

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70