

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«_____» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
**«Удосконалення процесу виготовлення деталей із
пластика методом 3D друку»**
**«Improving the process of manufacturing plastic parts
using 3D printing»**

Виконав здобувач вищої освіти 2-го
року магістратури групи ПМ-23М-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності 131 «Прикладна
механіка»
_____ Євгеній НІЩЕМЕНКО

Керівник роботи к.т.н., ст. викладач
_____ Павло ЄРЬОМІН

Рецензент: к.т.н., ст. викладач
_____ Любов ОЛІЙНІЧЕНКО

Кропивницький – 2024

Центральноукраїнський національний технічний університет	
Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	131 Прикладна механіка
Освітньо-професійна програма	Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА
Євгенія НІЩЕМЕНКО**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема Удосконалення процесу виготовлення деталей із пластика роботи: _____

методом 3D друку

2. Керівник роботи: к.т.н., ст. викл. Павло ЄРЬОМІН

3. Строк подання роботи до захисту « ____ » грудень 2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: розробка та оптимізація технологічних параметрів процесу подрібнення пластикових відходів для забезпечення заданих розмірів отриманих часток для їх подальшої переробки в витратні матеріали для 3D друку, так як саме якість подрібнення пластикових відходів має вирішальний вплив на вихідні параметри роботи шредера.

Завдання:

- проаналізувати сучасний стан технології вторинної переробки відходів пластику шляхом його подрібнення та подальшої переплавлення в гранули або готові вироби;
- виконати аналіз існуючих методів подрібнення пластику, запропонувати заходи по підвищенню ефективності базового технологічного процесу;
- розглянути параметри пластику марки ABS, який найбільш придатний для вторинної переробки та виготовлення витратних матеріалів для 3D друку;
- виконати тривимірне проектування камери механічного подрібнювача для відходів із пластику марки ABS та проаналізувати різні варіанти компоновки його робочих елементів;
- провести економічні розрахунки запропонованих заходів по підвищенню ефективності базового технологічного процесу.

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Павло ЄРЬОМІН		
РОЗДІЛ 2	Павло ЄРЬОМІН		
РОЗДІЛ 3	Павло ЄРЬОМІН		
РОЗДІЛ 4	Ірина ЖУРИЛО		

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1	ВСТУП	Жовтень 2024	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Жовтень 2024	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Жовтень-листопад 2024	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Листопад 2024	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Листопад-грудень 2024	вик.
6	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Грудень 2024	вик.
7	Графічна частина та оформлення	Жовтень-грудень 2024	вик.
8			
9			
10			

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Ніщенко Є.О. Удосконалення процесу виготовлення деталей із пластика методом 3D друку. Вип. квал. роб. – ЦНТУ, 2024. – с., іл., бібліогр., ____ арк.

В випускній кваліфікаційній роботі доказана можливість удосконалення процесу виготовлення деталей із пластика методом 3D друку за рахунок використання витратних матеріалів з відновленого пластику ABS. Проаналізовано сучасний стан технології вторинної переробки відходів пластику шляхом його подрібнення та подальшої переплавлення в гранули або готові вироби. Проведений аналіз існуючих методів подрібнення пластику, запропоновані заходи по підвищенню ефективності базового технологічного процесу на прикладі пластику марки ABS, який найбільш придатний для вторинної переробки та виготовлення витратних матеріалів для 3D друку. Виконано тривимірне проектування камери механічного подрібнювача для відходів із пластику марки ABS та проаналізовані різні варіанти компоновки його робочих елементів. Розроблені практичні рекомендації щодо проектування робочої камери шредера для механічного подрібнення пластикових відходів, а також налаштування та експлуатації шредера для підприємств невеликої потужності. Проведено техніко-економічне обґрунтування процесу подрібнення пластику, який був вдосконалений на основі використання розроблених рекомендацій. Розроблена методика дозволить отримати у користувача річний економічний ефект у розмірі 2921 грн., у споживача 17233 грн.

In the graduation qualification project, the feasibility of improving the process of manufacturing plastic parts through 3D printing was demonstrated by utilizing consumable materials made from recycled ABS plastic. The current state of plastic waste recycling technology was analyzed, including shredding and subsequent remelting into granules or finished products. An analysis of existing plastic shredding methods was conducted, and measures were proposed to enhance the efficiency of the basic

technological process using ABS plastic as an example, which is most suitable for recycling and the production of consumable materials for 3D printing.

A 3D design of the mechanical shredder chamber for ABS plastic waste was completed, and different configurations of its working elements were analyzed. Practical recommendations were developed for designing the working chamber of a shredder for mechanical plastic waste shredding, as well as for configuring and operating shredders for small-scale enterprises. A techno-economic justification of the plastic shredding process was carried out, incorporating the developed recommendations. The proposed methodology is expected to provide an annual economic benefit of 2921 UAH for the operator and 17233 UAH for the consumer.

ЗМІСТ

Зміст.....	
Вступ	
1. Стан переробки пластикових відходів в Україні.....	
1.1 Розвиток вторинної переробки пластику та його можливості	
1.2 Існуючі методи подрібнення пластику.....	
1.3 Переваги та недоліки механічного способу подрібнення.....	
1.4 Типова схема шредера.....	
1.5 Технологія FDM для 3D друку.....	
1.6 Проблеми якості деталей із пластику ABS, виготовлених методом 3D друку	
1.7 Висновки, мета і задачі дослідження	
2. Методика проведення досліджень та обробки результатів експериментів	
2.1. Призначення та механічні властивості досліджуваних матеріалів.....	
2.2. Особливості подрібнення пластику ABS при вторинній переробці	
2.3. Матеріали, з яких виготовляють ножі для шредера	
3. Аналіз результатів дослідження та розробка вдосконалених рекомендацій для проектування, налагоджування та експлуатації механічного шредера.....	
3.1. Результати дослідження компоновок робочої зони подрібнювача шредера	
3.2 Компоновки ножів на валах.....	
3.3 Моделювання взаємодії леза ножа з матеріалом пластику.....	
3.4 Основні етапи проектування шредера.....	
3.5 Вибір геометрії різальних ножів та розрахунок основних параметрів шредера.....	
3.6. Швидкість обертання ротора.....	
3.7. Компоновка корпусу та роторів шредера.....	
3.8. Схема взаємодії рухомих та нерухомих ножів шредера для подрібнення пластику.....	
3.9. Рекомендації щодо обслуговування основних робочих органів шредерів.	

4. Економічне обґрунтування доцільності використання запропонованого шредера для подрібнення вторинного пластику з подальшим виготовленням з нього гранул для 3D друку	
4.1. Загальні вихідні дані	
4.1.1. Витрати на технологічну підготовку виробництва шредера.....	
4.1.2. Витрати на технологічну підготовку виробництва шредера	
4.2. Визначення витрат на виготовлення шредера	
4.3. Річний економічний ефект від застосування шредера.....	
4.3.1. У виробника.....	
4.3.2. У споживача.....	
Загальні висновки	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	

ВСТУП

Актуальність теми

Створення нових та корінна технічна реконструкція вже існуючих промислових підприємств вимагає розвитку машинобудівного комплексу та сучасних технологій. Дуже важливу роль у вирішенні цього завдання приділяють технологіям, що можуть забезпечити суттєве підвищення продуктивності праці, якість й експлуатаційні властивості виробленої продукції, економію палива та витратних матеріалів, а також зменшення екологічного навантаження на природу. Сучасні адитивні технології (походить від слова з англійської мови additive – додавання) значно відрізняються від традиційних методів обробки тим, що виріб створюється методом додавання матеріалу на основу, а не видаленням його із заготовки різними інструментами. За рахунок цього можна досягти великої економії витратних матеріалів, тому що вони друкуються саме там, де це необхідно для створення об'єму потрібної деталі. Серед витратних матеріалів для 3D-друку найбільш розповсюдженими є технічні пластики різних марок, наприклад пластик марки ABS. Слід відмітити, що в сучасних конструкціях різних машин та механізмів деталі з цього пластику складають значну долю, що дозволяє економити дефіцитні та коштовні метали, знизити вагу деталей, підвищити їх стійкість до корозії та дозволяє вторинну переробку виробів після закінчення строку їх експлуатації.

Правильна утилізація техніки, що відпрацювала свій ресурс, забезпечує контрольований процес переробки деталей, суттєво економить природні ресурси та запобігає засміченню навколишнього середовища. Також слід відмітити, що в багатьох розвинених країнах існують суворі законодавчі вимоги щодо утилізації техніки, які включають заборону її викидання на смітники. Це потрібно для зниження забруднення природи, так як неправильна утилізація призводить до викидів різних шкідливих речовин в повітря, водойми, ґрунти та негативного впливу на здоров'я людей.

Виробництво сучасної техніки потребує значних витрат дефіцитних та коштовних електроенергії, води та продуктів нафтопереробки. Вторинна переробка пластиків із старої або зіпсованої техніки дозволяє суттєво знизити ці потреби та

ціну нових деталей, а також забезпечити ефективне та заощадливе використання ресурсів.

Дана кваліфікаційна магістерська робота присвячена підвищенню якості механічного подрібнення відходів (відпрацьованих або вибракуваних деталей) із технічних пластиків типу ABS в процесі його вторинної переробки на базі малих підприємств, є актуальною та має практичне значення.

1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧИ ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1.1 Стан переробки пластикових відходів в Україні

В даний час в Україні збільшився інтерес до проблем екології, що викликало значний розвиток галузі з переробки відходів пластику. Спеціалізовані підприємства впроваджують сучасні процеси вторинній переробці пластику з дотриманням високих стандартів екологічної безпеки та використанням нових технологій з метою оптимізації процесу переробки і зменшення шкоди довкіллю.

Переробка вторинного пластику в Україні [8] включає в себе декілька етапів від збору бувшого у вжитку пластику до виготовлення виробів із відновленої сировини. Вторинна переробка пластику економічно вигідна, що стимулює сучасні компанії розвивати свою екологічну відповідальність, використовувати екологічно чисті технології та організовувати утилізацію пластикових відходів виробництв та відпрацьованих деталей.

Метод поховання або закопування пластикових відходів, а також їх просте спалювання найчастіше застосовується у малорозвинених країнах. У країнах з високим економічним розвитком утилізацію пластикових відходів виконують спеціалізовані заводи чи підприємства переробки. Вони застосовують різні технології, які дозволяють зробити переробку пластику максимально ефективно та безпечно для навколишнього середовища. В процесі переробки пластику відбувається його збір та сортування, подрібнення, мийка, сушка та переплавлення в гранули або готові вироби.

На даний час в Україні є необхідність в великих кількостях витратних матеріалах для 3D друку за технологією FDM, як для військових потреб так і для цивільних цілей. Враховуючи можливість виготовлення витратних матеріалів з вторинної сировини з пластику марки ABS та велику кількість побутового пластику, що загрожує екології через довгий період його розкладання, виникає необхідність в спеціальній утилізації та переробці таких відходів.

1.2 Існуючі методи подрібнення пластику.

В процесі вторинної переробки застосовуються декілька способів подрібнення пластику (рис. 1.1), а саме:

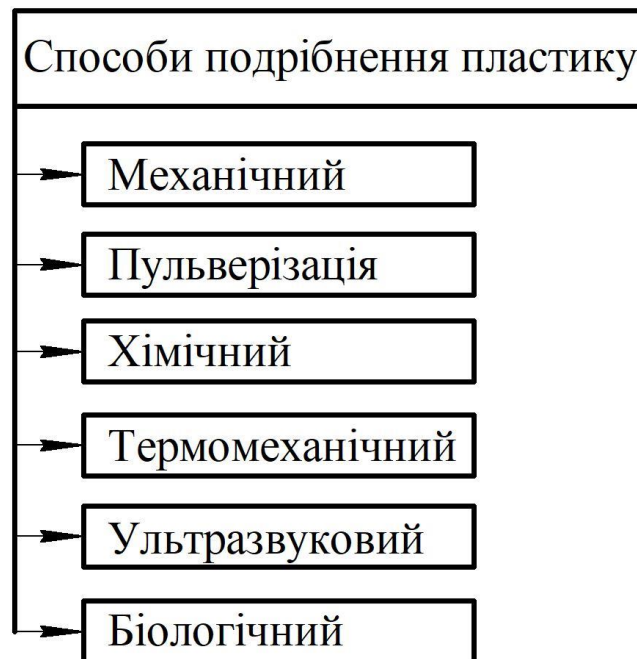


Рисунок 1.1 – Способи подрібнення пластику

Механічне подрібнення за допомогою дробарок та шредерів. Для цього використовують механічні пристрої, які подрібнюють пластик на дрібні шматки. Цей метод ефективний для великої кількості сировини. Пристрої типу шредери розрізають пластик на тонкі смужки або шматки. Вони зазвичай використовуються для подрібнення пластикових виробів великих розмірів, таких як каністри, корпуси приладів та побутової техніки або автозапчастин.

Пульверизація. Процес, при якому пластикові частини подрібнюються до стану дрібного порошку. Цей метод найчастіше застосовується для переробки старих пластикових виробів, що дозволяє отримати матеріал, готовий для подальшої обробки.

Хімічне подрібнення. В цьому випадку використовують хімічні реагенти для розчинення пластику та його подальшого відновлення у вигляді нових полімерів. Цей метод є ефективним для специфічних типів пластику, які складно переробити іншими способами, але вимагає значних витрат на обладнання та реагенти.

Термомеханічне подрібнення одночасно поєднує в собі термічну обробку та механічне подрібнення. Пластик спочатку нагрівається до певної температури, що робить його більш м'яким, а потім подрібнюється в шредері або дробарці. Це дозволяє зменшити знос обладнання та покращити якість отриманого матеріалу.

Ультразвукове подрібнення використовує енергію ультразвукових хвиль для створення мікроударів, які подрібнюють пластик. Цей метод є досить прогресивним і має потенціал для підвищення ефективності переробки.

Біологічне подрібнення використовує спеціальні мікроорганізми для руйнування пластику. Хоча цей метод ще має статус експериментального, він вже на стадії досліджень обіцяє бути екологічно чистим способом переробки.

Кожен із зазначених методів має свої переваги та недоліки, тому кінцевий вибір залежить від типу пластику, обсягів сировини та економічних факторів. З розвитком технологій та зростанням попиту на перероблені матеріали, методи подрібнення продовжують вдосконалюватися. Враховуючи мету дослідження та сферу застосування, ми зупинимось на методі механічного подрібнення технічного пластику типу ABS з метою його подальшої переплавки на витратні матеріали (філамент або пластикову нитку) для 3D принтерів.

1.3 Переваги та недоліки механічного способу подрібнення

Механічне подрібнення є методом зменшення розмірів кускових матеріалів (в нашому випадку - пластику) для отримання заданого розміру частинок, який застосовують в різних галузях промисловості. Подрібнення може бути виконано шляхом роздавлювання, розколювання, розламування, різання, розпилювання, розбивання та розривання. Подрібнення – це лише зменшення більш крупних шматків. Умовну класифікацію можна проводити на кілька класів за розмірами вихідних кусків сировини і продукту в кінці подрібнення (табл. 1.1.)

Таблиця 1.1. Класи подрібнення

Клас подрібнення	Розмір частин, мм	
	До подрібнення D	після подрібнення d
Крупне	1000	250
Середнє	250	20
Дрібне	20	1...5
Грубий помел	1...5	0,04...0,1
Середній помел	0,04...0,1	0,005... 0,015
Тонкий помел	0,1... 0,04	0,001... 0,005
Колоїдний помел	$\geq 0,1$	$\leq 0,001$

Твердий матеріал може бути подрібнений або зруйнований до часток необхідних габаритів різними способами. Схематично ці способи зображені на рис. 1.2.

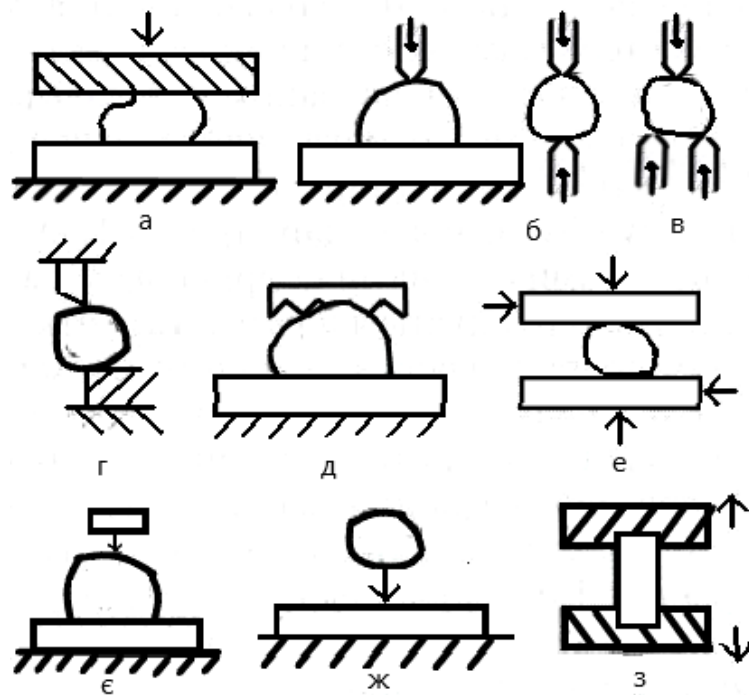


Рисунок 1.2 Способи механічного подрібнення матеріалів:

а – роздавлення; б – розколювання; в – розламування; г – різання;
 д – розпилювання; е – розтирання; ж – розбивання; з – розривання.

Механічне подрібнення пластику дробарками – це один з найбільш розповсюджених і ефективних існуючих методів вторинної переробки. Дробарки або шредери відіграють головну роль у цьому процесі, дозволяючи перетворювати різноманітні пластикові відходи в дрібні частини певного розміру, які можна використовувати в якості сировини для виготовлення нових виробів.

Ножові дробарки оснащені рухомими ножами, які обертаються та розрізають пластик на дрібні шматки. Ножі можуть мати різну форму та розміри, що впливає на результат подрібнення. До переваг ножових дробарок відносяться висока ефективність, можливість обробки різних типів пластику та простота обслуговування. Недоліками є необхідність регулярного заточування ножів та можливі проблеми з обробкою жорстких матеріалів.

Пристрої типу шредерів є подальшим розвитком ножових дробарок та мають два, три або більше ріжучих валів, які разом обробляють пластик, розрізаючи його на смужки або шматки. При цьому один вал обертається постійно, а другий може обертатись або в іншій бік або бути нерухомим. У шредерів кожний вал оснащений сукупністю або набором дискретних ножів, одні з яких зрізують вузькі смужки пластику, а інші після цього їх розрізають. При цьому внаслідок одночасної дії на подрібнюваний пластик значної кількості ножів забезпечується зниження вібрації, ударів та поштовхів під час роботи шредера. Подрібнення матеріалу здійснюється як би безперервним відокремленням від нього дрібних кусочків.

До переваг шредерів можна віднести:

1. Здатність подрібнювати великі обсяги пластику, включаючи цілі контейнери, автомобільні бампери, елементи салонів, кожухи, щитки та інші великі предмети;
2. Економічність. Вона досягається за рахунок менших витрат на обладнання та експлуатацію в порівнянні з хімічними або термічними методами;
3. Екологічність. Механічне подрібнення не вимагає використання хімікатів або високих температур, що зменшує навантаження на екологію;
4. Універсальність. Можливість обробки різних типів пластику дозволяє значно розширити сферу застосування шредерів та дробарок.

Також слід відмітити існуючі недоліки пристроїв для механічного подрібнення:

1. Внаслідок зносу ріжучі елементи рухомих та стаціонарних ножів потребують регулярного обслуговування та переточування;
2. Деякі механічні методи можуть не забезпечувати достатню однорідність та якість кінцевого продукту, що призводить до зменшення якості переробки;
3. Висока енергоємність, особливо при обробці великих обсягів матеріалу, вимагає підключення до потужних джерел живлення.

1.4 Типова схема шредера

Перед подрібненням пластик підготовлюється до переробки, а саме – очищається від забруднень (наприклад паперу, наліпок або тканини) та, за необхідності, попередньо розділяється за типами або по кольору. Далі пластик вручну або механізованим способом завантажується в приймальний бункер шредера, а з нього рівномірно подається в робочу зону, де відбувається механічне подрібнення. Розмір отриманих частинок варіюється залежно від налаштувань машини.

На рисунку 1.3 представлена типова схема шредера для подрібнення пластику [6]:

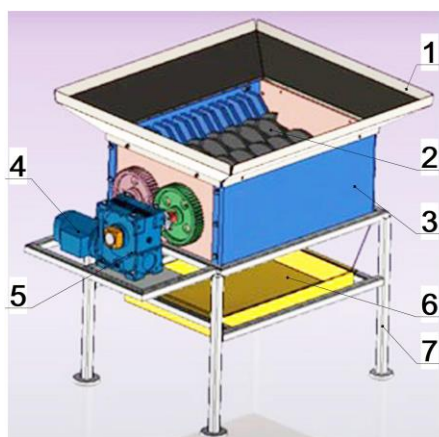


Рисунок 1.3 – Типова схема шредера:

- 1 – Завантажувальний бункер; 2 – Вал з ріжучими лезами; 3 – Корпус шредера; 4 – Двигун; 5 – Понижаючий редуктор; 6 – Бункер для подрібненого пластику; 7 – Рама шредера

Його основні компонентами є:

1. Завантажувальний бункер 1 для пластикових відходів;
2. Обертальні вали 2 у кількості двох або більше, на яких розташовані пакети ріжучих елементів (ножів). Вали обертаються в протилежних напрямках, що дозволяє ефективно розрізати матеріал. Ножі можуть мати два та більше різальних елемента зі спеціальною геометрією для оптимізації подрібнення;
3. Корпус шредера 3 призначений для розміщення опор для ріжучих валів, а також містить кріплення для блоку нерухомих ножів. Знизу він має отвори для виведення подрібненого матеріалу.
4. Система приводу складається з двигуна 4, який через понижуючий редуктор 5 та запобіжну муфту забезпечує обертання ріжучих валів з заданою частотою. Найчастіше для шредерів використовують електричні трьохфазні двигуни змінного струму з системою регулювання обертів.
5. Вихідний бункер 6 збирає подрібнений матеріал після обробки, сепарує його через сита та може бути оснащений механізмом для транспортування матеріалу на наступний етап переробки.
6. Системи безпеки включають в себе захисні кожухи, системи аварійної зупинки та датчики для контролю роботи обладнання. Всі складові частини шредера монтуються на жорсткій рамі 7.

На рисунку 1.4 показано загальний вигляд робочих камер двохвальних шредерів



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд робочої камери шредера [5]

1.5 Технологія FDM для 3D друку

Так званий Fused Deposition Modeling (FDM) є найпростішим з процесів «струменевого» об'ємного друку. Головною ідеєю FDM є те, що рухома у тривимірному просторі друкуюча голівка принтера видавлює на спеціальну плоску платформу-основу розігрітий до напіврідкого стану пластик (в якості матеріалу може використовуватися практично будь-який промисловий термопластик). Шари пластику швидко застигають і злипаються один з одним, формуючи майбутній об'єкт. Технологічний процес FDM дозволяє з досить високою точністю (наприклад, мінімальна товщина шару складає від 0,12 мм) виготовляти цілком придатні до використання деталі досить великих розмірів (у сучасних спеціалізованих промислових принтерах корисний об'єм складає до 700x600x500 мм).

Пластикові нитки випускаються у двох стандартних розмірах, діаметром відповідно 1,75 та 3,0 мм. Філамент Ø3,0 мм – це більше застарілий стандарт, зараз він поступово замінюється ниткою діаметром 1,75 мм. Менша нитка набагато легше видавлюється із сопла, керування друкуючою голівкою набагато простіше та залишає менше відходів пластику з боків вашого виробу. Але розмір Ø3,0 мм ще остається досить актуальним для великих 3D-принтерів в тих випадках, коли треба створити габаритні деталі зі значним об'ємом пластику. Слід відмітити, що доволі часто філамент Ø3,0 мм коштує дещо дешевше ніж 1,75 мм.

Ця найпоширеніша нитка, виготовляється з акрилонитрилбутадиєнстирола (Acrylonitrile Butadiene Styrene) – скорочено ABS. Цей пластик має в своїй основі продукти переробки нафти, і використовується для різних цілей, наприклад для виготовлення деталей кузова, двигуна або інтер'єру для автомобілів. Пари ABS мають специфічний хімічний запах і вони вважаються небезпечними для здоров'я. Тому під час 3D друку рекомендується використовувати примусову вентиляцію для відводу продуктів плавлення пластику назовні, коли друк ABS триває довгий час та добре провітрювати приміщення. Температура плавлення ABS складає біля 210...260°C.

На даний час гранули ABS коштують приблизно 46 грн. за 1 кг і є досить розповсюдженим матеріалом для друку, незважаючи на його більше високі вимоги до налаштування принтера. Деталі з ABS звичайно друкуються на основі з електричним підігрівом (температура якої повинна бути у межах 180°C), вона покрита спеціальною каптоною плівкою для кращого зчеплення пластику з основою. Принтери для друку ABS коштують дещо більше, тому що вони технічно складніші. Є проміжне рішення - це друк пластиком ABS на холодній основі, яка заздалегідь покрита декількома шарами лаку для волосся або спеціального клею, наприклад цианоакрилату, клею типу ПВА на водній основі. Але найчастіше використовують саме основу з електропідігрівом, тому що це значно допомагає зменшити деформацію доволі великих об'єктів, що друкуються.

Перевага матеріалу ABS у порівнянні з іншими пластиками полягає в тому, що об'єкти, що друкуються з цього матеріалу, більше міцні та менш крихкі, вони можуть витримувати більш високі експлуатаційні температури. Вироби з ABS, надруковані із заповненням в діапазоні від 75 до 100%, вже цілком успішно можуть використовуватися як деталі для різних пристроїв, конструкторів для підлітків та як замінників деталей із пластика, виготовлених методом лиття у термопластичних пресових автоматах. Нитка ABS зараз доступна в багатьох кольорах, включаючи золотий, блискучий, срібний, той, що світиться у темряві та навіть колір-хамелеон, що змінюється під впливом температури (наприклад, синій/зелений нижче за 30°C и жовтий/зелений вище цієї температури). Все це робить вироби, надруковані такою ABS, чутливими до температури тіла. Температура експлуатації виробів з ABS пластику лежить у діапазоні від -10 до +90°C. На рис. 1.6 представлено фабричну котушку ABS пластику з філаментом Ø2,9 мм та приклади виробів, надруковані з на основі готових 3D моделей.



Рисунок 1.6 – Котушка з філаментом Ø2,9 мм та вироби із ABS пластика

1.6 Проблеми якості деталей із пластику ABS, виготовлених методом 3D друку

Незважаючи на великі переваги, що надають сучасні технології FDM, все ж таки існують проблеми, які дотепер стримують широке застосування 3D друку у виробництві об'єктів для промислового використання.

По-перше, навіть при наявності справного та налагодженого 3D принтера велике значення має марка та якість пластику, якій застосовується при створенні виробів. Різні партії пластику ABS, придбані через певний проміжок часу навіть у одного й того самого продавця будуть незначно, але відрізнятись по своїм характеристикам, що може потребувати виготовлення додаткових контрольних еталонних деталей для коригування налаштувань 3D принтера.

По-друге, точність геометричних розмірів під час 3D друку є досить актуальною проблемою. Якщо при виготовленні звичайного сувеніру або іграшки отримані кінцеві розміри можуть дещо відрізнятись від закладених у 3D модель, то геть зовсім інша справа, коли надрукована деталь повинна «встати» на призначене їй місце в вузлу з мінімальним доопрацюванням або взагалі без нього. В такому випадку геометричні розміри деталі повинні максимально співпадати із розмірами, закладеними на кресленні або 3D моделі.

Витрати часу на виготовлення однієї одиниці деталі під час 3D друку набагато більші, ніж при застосуванні технології лиття у термопластичних пресових автоматах традиційної конструкції, а собівартість серійних деталей може значно відрізнятись в більшу сторону.

Бувають випадки, коли під час друку деталей внаслідок нестабільного електропостачання або помилок керуючої програми в комп'ютері може відбутись збій у роботі 3D принтера і деталь скоріш за все піде у брак, а весь процес друку прийдеться починати з початку.

1.7 Висновки, мета і задачі дослідження

Метою роботи є розробка та оптимізація технологічних параметрів процесу подрібнення пластикових відходів для забезпечення заданих розмірів отриманих часток для їх подальшої переробки в витратні матеріали для 3D друку, так як саме якість подрібнення пластикових відходів має вирішальний вплив на вихідні параметри роботи шредера.

Об'єкт досліджень: процеси взаємодії різальних елементів ножів механічного шредера та пластикових відходів при їх вторинній переробці.

Предмет досліджень: зміни показників розмірів часток подрібненого пластику в залежності від компоновки робочих органів шредера.

Для досягнення мети, що була поставлена, слід вирішити наступні задачі:

- проаналізувати сучасний стан технології вторинної переробки відходів пластику шляхом його подрібнення та подальшої переплавлення в гранули або готові вироби;
- виконати аналіз існуючих методів подрібнення пластику, запропонувати заходи по підвищенню ефективності базового технологічного процесу;
- розглянути параметри пластику марки ABS, який найбільш придатний для вторинної переробки та виготовлення витратних матеріалів для 3D друку;

- виконати тривимірне проектування камери механічного подрібнювача для відходів із пластика марки ABS та проаналізувати різні варіанти компоновки його робочих елементів;

- провести економічні розрахунки запропонованих заходів по підвищенню ефективності базового технологічного процесу.

Тому ми вважаємо, що удосконалення процесу виготовлення деталей із пластика методом 3D друку за рахунок використання витратних матеріалів із вторинного пластику ABS є актуальною тематикою та потребує подальшого розвитку.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

2.1. Призначення та механічні властивості досліджуваних матеріалів

Розглянемо випадки, коли технологія FDM для 3D друку буде економічно більш вигідніша, ніж класичні способи виробництва, а іноді тільки вона може стати можливим рішенням:

- немає необхідності в повному заповненні виробу;
- необхідність створення деталей із внутрішньою сітчастою структурою, наявність прямих або гострих внутрішніх кутів;
- складна геометрія деталі з внутрішніми каналами;
- виготовлення малої серії (≤ 500 одиниць) або дослідних зразків НДКР;
- виробництво ливарних оригінальних моделей, випалюваних і виплавлених моделей у ювелірній промисловості;
- створення протезів, шаблонів для стоматології, зубних коронок з біобезпечних матеріалів;
- функціональність виробу важливіша його вигляду та кольору (наприклад пластикові кронштейни або корпуси для FPV-дронів та інші вироби для військових).

Виходячи з того що стандартний філамент або нитка з пластику ABS має діаметр 1,75 або 2,85...3,0 мм, ми припускаємо, що для його виробництва зі вторинної сировини розмір часток для ефективного розплавлення повинен складати від 0,04...0,1 до 5 мм, що відповідає дрібному класу подрібнення або грубому помелу. Також спосіб подрібнення часток матеріалу для пластмас є розріз і розривання, що й будемо застосовувати для шредера.

Витратним матеріалом для більшості сучасних 3D принтерів служить пластик ABS. Це полімер, отриманий з нафти під назвою акрілонітріл-бутадієн-стирол (від англійського acrylonitrile butadiene styrene). Такий пластик через його міцність і жорсткість зазвичай використовують для виробництва різних пластикових деталей для техніки, наприклад автомобільних бамперів, деталей

інтер'єру, корпусних деталей двигуна тощо. Пластикову нитку з ABS плавиться при температурі від 170...250°C, укладається друкуючою голівкою принтера за певною траєкторією для створення необхідної кількості шарів матеріалу та отримання наприкінці цілісного надрукованого 3D об'єкта.

Таблиця 2.1 – Механічні властивості досліджуваного матеріалу

№ п/п	Параметр	Назва матеріалу
		ABS
1	Щільність, г/см ³	1,06
2	Міцність при розтязі, МПа	≥38
3	Міцність на згин, МПа	70...80
4	Стійкість до згину, разів	10
5	Відносне подовження, %	≥20
6	Модуль пружності при розтязі, МПа	≥2800
7	Крапка плавлення, °C	130...140
8	Рекомендована температура друку, °C	215...230
9	Рекомендована температура платформи,	80...95
10	Температурний діапазон експлуатації виробів, °C	-40...+70
11	Усадка, %	0,4...0,7
12	Показник еластичності	ABS має добру гнучкість
13	Ударна в'язкість	15...30 кДж/м ²
14	Температура вигину	95...105 °C
15	Твердість за шкалою Shore D	~ 70...100

Пластик ABS стійкий до багатьох кислот, основ, і миючих засобів, але не витримує органічні розчинники. Він легко піддається обробці, формуванню, зварюванню та покриттю. Твердість матеріалу: ABS має середню твердість, тому для ефективного подрібнення потрібні гострі ножі з високою зносостійкістю. Якщо ножі затуплені, різання буде менш ефективним і пластик буде не різатися, а зминатись або заклинювати шредер.

Пластик ABS відноситься до жорстких матеріалів, тому під час механічного подрібнення може тріскатися і ламатися при взаємодії з різальними ножами. Під час роботи шредера за рахунок тертя між ножами та пластиком, він може нагріватися, що призводить до зміни його властивостей. У випадку ABS, нагрів

може зробити пластик більш м'яким, що допомагає його легшому подрібненню. ABS чутливий до вологи, тому перед подрібненням необхідно просушити вторинну сировину, щоб уникнути проблем з якістю.

Завдяки своїм характеристикам, ABS широко використовується у виробництві автомобільних компонентів, побутовій електроніці (корпуси приладів, елементи інтерфейсу), іграшках (зокрема LEGO) та філаменту (пластикової нитки) для 3D-друку.

2.2 Особливості подрібнення пластику ABS при вторинній переробці

Подрібнення пластику ABS при вторинній переробці має свої особливості, які впливають на вибір обладнання, параметри процесу та підготовку матеріалу. Правильний підбір режимів подрібнення та обробки є важливим для досягнення високої якості кінцевого продукту.

При вторинній переробці пластику ABS важливо отримати частинки оптимального розміру, щоб забезпечити ефективність подальшої обробки, такої як екструзія чи лиття під тиском. На рисунку 2.1 показані пластик після його подрібнення у шредері та перероблені з нього гранули як сировина для виробництва нових виробів.



а)



б)

Рисунок 2.1 – а) Подрібнений пластик після шредера; б) Перероблені гранули для виробництва нових виробів

Згідно рекомендацій [1, 2] оптимальні розміри частинок ABS зазвичай коливаються від 2 до 10 мм в діаметрі. Під час виробництва витратних матеріалів для 3D-друку використовуються частинки (гранули) пластику розміром до 1 мм. Для лиття під тиском оптимальними є частинки від 2 до 5 мм, оскільки це сприяє кращій текучості матеріалу. Для екструзійних процесів рекомендується розмір частинок в межах 4-8 мм, щоб забезпечити рівномірне плавлення і зменшити ризик засмічення обладнання. При виробництві пластикових виробів великих розмірів можна використовувати частинки до 15-20 мм, але це може знизити ефективність подальшої переробки.

Важливо, щоб частинки пластику були однорідними за розміром, оскільки це дозволяє уникнути проблем з плавленням та формуванням виробів. Нерівномірні частинки можуть призвести до дефектів у готовій продукції, тому після подрібнення доцільно проводити сортування частинок за розміром, щоб забезпечити їх однорідність та покращити якість переробки.

2.3 Матеріали, з яких виготовляють ножі для шредера

У шредерах леза ножів є важливими компонентами. Вибір правильного матеріалу лез та їх геометрія безпосередньо впливає на продуктивність машини, ефективність виробництва та контроль витрат [3]. Тому під час виробництва є актуальним питання як збалансувати довговічність, вартість і придатність матеріалів при виборі лез.

Різні матеріали мають свої сильні і слабкі сторони. Деякі з них краще підходять для подрібнення твердих пластиків, тоді як інші підходять для більш м'яких або еластичних матеріалів. Розуміння характеристик різних матеріалів леза подрібнювача та вибір відповідно до конкретних операційних потреб може значно підвищити ефективність виробництва та продовжити термін служби лез.

Під час вибору матеріалу для ножа, необхідно враховувати такі ключові фактори, як зносостійкість, стійкість до корозії, твердість і міцність. Ціни на ножі суттєво відрізняються залежно від матеріалу, тому пошук правильного балансу

між продуктивністю та вартістю має вирішальне значення як для виробників, так й для користувачів шредерів.

Необхідно забезпечити тривалий термін служби ножа без втрати ефективності подрібнення та підібрати сталь для конкретних робочих середовищ, щоб уникнути частих замін ножів та високих витрат часу на простої. Розглянемо переваги та недоліки кількох поширених матеріалів для лез.

Вуглецева сталь. Ножі з неї є основним вибором для багатьох малих і середніх підприємств з обмеженим бюджетом і невеликими потребами в подрібненні. Цей матеріал зазвичай поділяють на низько-, середньо- та високовуглецеву сталь. Зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі зростає її твердість і зносостійкість, але великий вміст вуглецю також робить леза більш крихкими.

До переваг ножів з вуглецевої сталі можна віднести те, що вони недорогі та прості у виробництві. Висока міцність вуглецевої сталі забезпечує достатню потужність різання матеріалів, які не вимагають високої міцності, таких як тонкий або м'який пластик.

Недоліком вуглецевої сталі є її низька стійкість до корозії. Леза з вуглецевої сталі легко іржавіють, особливо у вологому або корозійному середовищі. Це значно скорочує термін їх служби, збільшуючи частоту заміни та витрати на обслуговування. Хоча леза з вуглецевої сталі мають певну твердість, вони швидко зношуються під час операцій високої інтенсивності. Вони швидко втрачають гостроту, особливо при обробці твердих матеріалів.

Леза з легированої сталі виготовляються шляхом додавання в сплав до основного заліза таких елементів, як вольфрам, хром, нікель і ванадій, що значно підвищує твердість, зносостійкість і стійкість до корозії отриманого сплаву.

Переваги:

– у порівнянні з вуглецевими леза ножів з легированої сталі залишаються гострими довше при меншому зношуванні. Леза ножів з легированої сталі не тільки тверді, але й міцні, що дозволяє їм витримувати сильні удари, не ламаючись під час подрібнення міцних пластиків. Ножі з легированої сталі мають високу стійкість до корозії, що робить їх придатними для подрібнення матеріалів, які містять

корозійні речовини. Також ножі з легованої сталі мають високу термостійкість, зберігаючи стабільність у середовищі з високою температурою.

Недоліком легованих сталей є їх більш висока вартість у порівнянні з вуглецевою сталлю, леза з легованої сталі дорожчі у виробництві, що робить їх менш привабливими для бюджетних проектів шредерів.

Також ножі з легованої сталі вимагають складної термічної обробки та частішого обслуговування. При неправильному обслуговуванні їх продуктивність може швидко знизитися.

Застосування: Леза з легованої сталі підходять для інтенсивного, важкого подрібнення твердих пластиків. Висока зносостійкість робить їх ідеальними для подрібнення великих партій пластикових відходів, що потребують тривалої роботи.

Інструментальна сталь. Леза з інструментальної сталі відомі своєю надзвичайною твердістю і зносостійкістю. Їх широко застосовують у прецизійній обробці та середовищах з високим навантаженням. Інструментальна сталь зазвичай містить високий рівень вуглецю і хрому, а термічна обробка може значно покращити характеристики таких лез.

Переваги:

Відмінна зносостійкість: Леза з інструментальної сталі зберігають гостроту протягом тривалих, інтенсивних подрібнювальних операцій, що важливо при обробці матеріалів високої твердості.

Висока точність роботи: Твердість і гострота цих лез забезпечують надійність у прецизійних операціях, дозволяючи виконувати точне різання.

Універсальність: Інструментальну сталь можна адаптувати під різні типи лез, наприклад, виготовляючи ножі з високовуглецевої сталі або швидкорізальної сталі.

Недоліками є:

Крихкість: Попри високу твердість, леза з інструментальної сталі можуть бути крихкими і схильні до утворення тріщин при сильних ударах.

Висока вартість: Виготовлення інструментальної сталі обходиться дорожче, особливо для лез з високою точністю виготовлення.

Залежність від термообробки: Ефективність лез сильно залежить від правильної термообробки.

Застосування: Леза з інструментальної сталі ідеальні для операцій, які потребують високої точності та зносостійкості, наприклад обробка металу, точне різання деталей та утилізація електронних відходів.

Нержавіюча сталь. Леза з нержавіючої сталі забезпечують високу корозійну стійкість, що робить їх ідеальними для вологих середовищ або середовищ із корозійними речовинами. Хром, який присутній у складі нержавіючої сталі утворює захисний оксидний шар, який запобігає іржавінню та корозії.

Переваги:

Висока стійкість до корозії: Леза з нержавіючої сталі можна використовувати тривалий час у вологих середовищах, що робить їх підходящими для харчової промисловості, утилізації фармацевтичних відходів тощо.

Легке обслуговування: Леза з нержавіючої сталі стійкі до іржі і мають гладку поверхню, що спрощує їх очищення та технічне обслуговування.

Добра термостійкість: Леза з нержавіючої сталі добре працюють при високих температурах.

Недоліки:

Менша зносостійкість: У порівнянні з інструментальною та легованою сталлю, нержавіюча сталь має меншу твердість, тому леза зношуються швидше.

Висока вартість: Нержавіюча сталь дорожча, особливо її високоякісні види.

Застосування: Ножі з нержавіючої сталі гарно підходять для харчової промисловості, утилізації фармацевтичних пластикових відходів, обробки хімічних матеріалів та інших середовищ, що потребують високої корозійної стійкості.

Карбід вольфраму. Леза ножів з карбіду вольфраму є одними з найтвердіших і найбільш зносостійких, вони призначені для подрібнення надзвичайно твердих матеріалів. Їхня твердість наближається до твердості алмазу, що робить їх здатними працювати в найскладніших умовах.

Переваги різальних ножів є їх виняткова твердість і зносостійкість. Такі леза здатні обробляти тверді матеріали, такі як метал, скло і бетон. Леза

витримують сильні удари без значного зносу. Карбід вольфраму зберігає твердість за високих температур.

Недоліком твердого сплаву є їх висока вартість та складність у ремонті. Леза з твердого сплаву можуть тріснути від надмірного ударного навантаження.

Застосування: Ідеальні для подрібнення будівельних відходів, обробки металу, скловолокна та інших операцій, де потрібна екстремальна зносостійкість і ударостійкість.

На основі аналізу існуючих матеріалів для лез можемо зробити висновок, що для наших цілей – а саме якісного подрібнення невеликих партій пластику ABS при його вторинній переробці, найбільш придатним буде застосування високовуглецевої сталі типу 65Г або її імпорتنих аналогів;

Характеристики сталей наведено у таблиці 2.2 [7].

№ п/п	Марка	Імпортні аналоги					
		США	Німеччина	Англія	Китай	Болгарія	Польща
1.	Сталь 65Г ГОСТ 14959, ГОСТ 1577, ДСТУ 8429	1066, 1566, G15660	66Mn4, Ck67	080A67	65Mn	65G	65G

Хімічний склад

C	Si	Mn	P	S	Cr	C и
0,62... 0,7	0,17...0, 37	≤0,9 ...1,2	≤0,035	≤0,035	≤0,25	≤0,2

Механічні властивості сталі 65Г

Термічна обробка	Мінімальна межа плинності, (МПа)	Мінімальний тимчасовий опір, (МПа)	Мінімальне відносне подовження, %	Мінімальне відносне звуження, %
Загартування від 830°C в маслі, відпуск при 470°C	785	980	8	30

Ця сталь випускається у вигляді листового прокату, що дозволяє виготовляти різальні дискові ножі з неї з мінімальними відходами металу у стружку. Технологія виготовлення включає в себе операції вирізання заготовок ножів з листової заготовки на верстаті плазмової різки, шліфування, термічну обробку та заточування лез.

3. Аналіз результатів дослідження та розробка вдосконалених рекомендацій для проектування, налагоджування та експлуатації механічного шредера.

3.1 Результати дослідження компоновок робочої зони подрібнювача шредера

Кріплення ножів.

Спосіб кріплення ножів на обертовому валу вибирається в залежності від форми самого валу. Так при виборі валу круглого перерізу кріплення повинно бути організовано з використанням шпонкових пазів або лисок, що накладає додаткові затрати на виготовлення креслень декількох конфігурацій ножів з вирізом під шпонку під різними кутами для більш однорідного навантаження на вал.

При використанні валу квадратного перерізу кріплення може бути організовано з використанням центрального квадратного отвору (рис. 3.1) як способу фіксації від прокручування на валу.

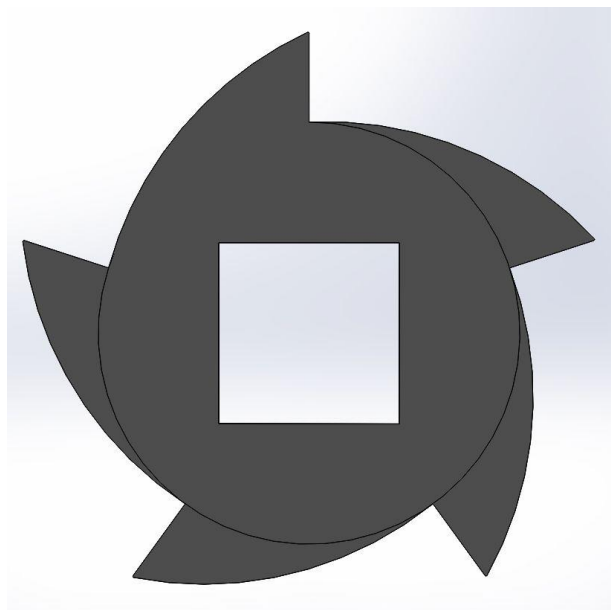


Рисунок 3.1 – Різальний ніж з квадратним центральним отвором

Це знижує затрати на виготовлення креслень декількох конфігурацій ножів внаслідок того, що всі ножі будуть мати однакові розміри центрального отвору для монтування на вал. Однак слід відмітити, що використання валу з квадратним перетином його робочої частини обмежує конфігурацію розташування різальних ножів на ньому. Для більш однорідного навантаження на вал при невеликій кількості можливих положень лез ножів відносно валу (зі зміщенням кожного наступного ножа на величину 90 градусів) і рівномірний розподіл навантаження по крутному моменту на вал можливе лише при кількості робочих лез на ножах більше п'яти.

При використанні валу шестигранного перерізу кріплення робочих дискових ножів може бути організовано з використанням центрального шестигранного отвору (рис. 3.2) в них, як способу фіксації від прокручуванню на валу.

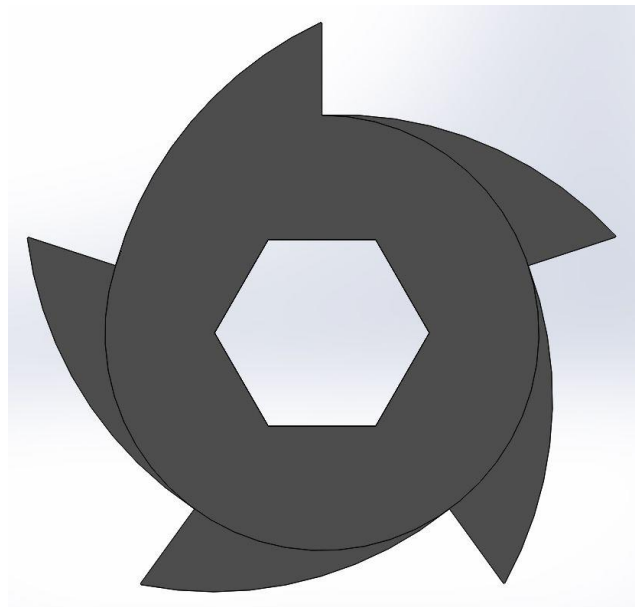


Рисунок 3.2 – Різальний ніж з шестигранним центральним отвором

Це знижує затрати на виготовлення креслень та самих ножів декількох конфігурацій ножів через те, що всі ножі будуть мати однакове креслення центрального отвору для монтування на вал. Сам шестигранний вал дає можливість для більшої кількості конфігурацій розташування різальних ножів на валу з метою досягнення більш однорідного навантаження на вал. Через більшу кількість можливих варіантів положень лез ножів відносно валу з кроком

повороту в 60 градусів досягається рівномірний розподіл навантаження на при кількості лез на ножів більше двох.

Також можливе використання шестигранного валу з ножами з внутрішнім центральним отвором типу подвійного шестигранника (рис. 3.3) зміщеними один відносно одного на кут 30 градусів. Такий варіант виконання дає можливість встановити крок лез ножів в 30 градусів і потребує тільки перевірки на міцність самих ножів при проектуванні.

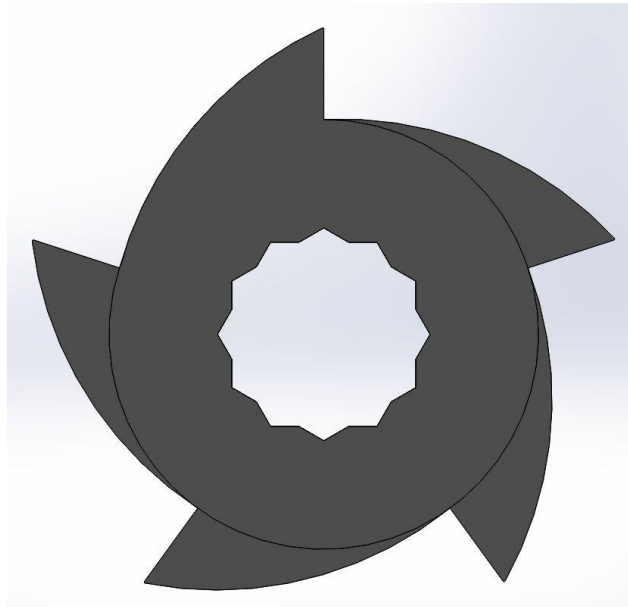


Рисунок 3.3 – Різальний ніж з центральним отвором у вигляді подвоєного шестигранника

Дискові ножі призначені для розрізання та подрібнення пластику. Їх конструкція і матеріал залежать від типу і твердості матеріалів, що підлягають обробці. Леза дискових ножів зазвичай розташовані на периферії зовнішнього кола з рівним кроком і в залежності від конструктивного виконання можуть бути різної форми та розміру, щоб відповідати заданим параметрам подрібнення. На рис. 3.4 зображено ніж з 6 лезами на ножі і двома квадратними отворами зміщеними на кут 45° зі спільним центром для квадратного валу.

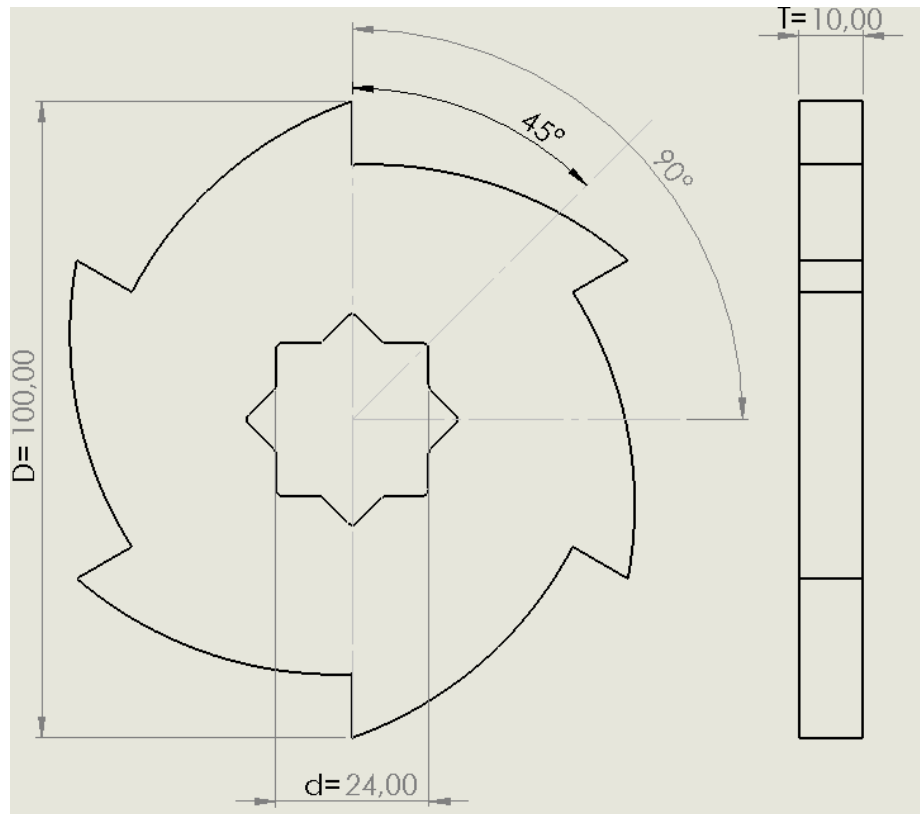


Рисунок 3.4 – Різальний ніж з центральним отвором у вигляді подвоєного квадрата

На основі цього ножа розглянемо кути, які утворюють між собою робочі поверхні ножів при послідовному встановленні на вал з поворотом на кут 45° кожного наступного ножа. Так на рис 3.5 зображено три ножі, розміщені як описано вище. Можна побачити, що якщо подивитись у торець робочого валу, на якому розташовані ножі, між лезами першого і другого ножа утворюється кут в $75^\circ - 60^\circ = 15^\circ$ і між другим і третім ножом кут теж в $90^\circ - 75^\circ = 15^\circ$.

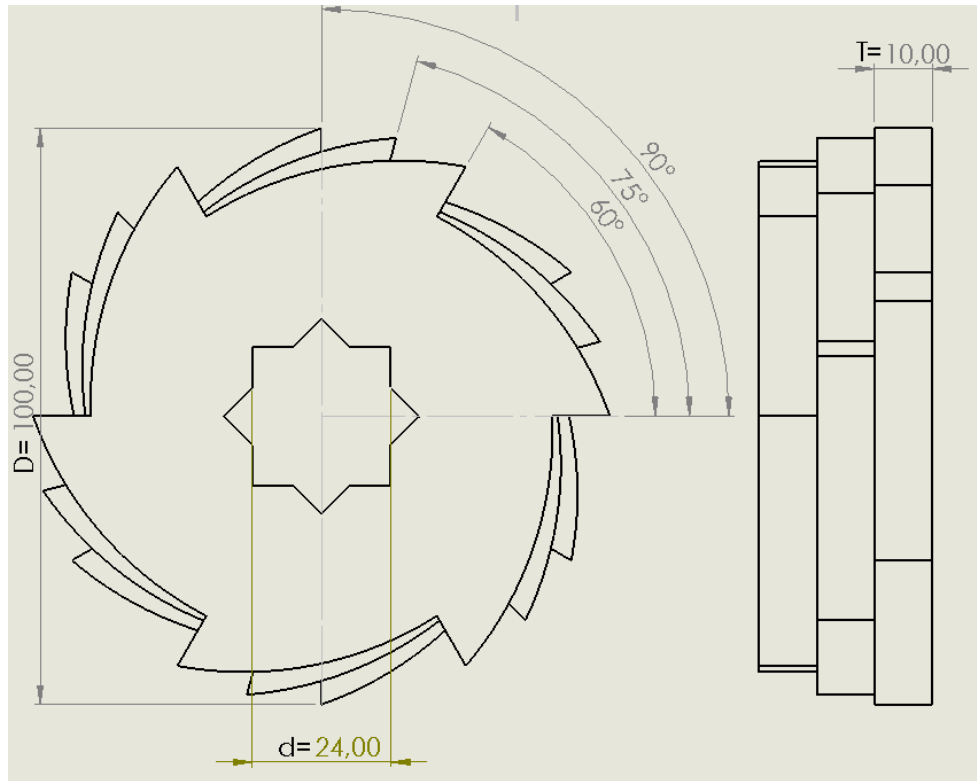


Рисунок 3.5 Зображення взаємного розташування ножів при 6 лезах на ножах і кутом повороту на 45 градусів кожного наступного ножа

З рис. 3.5 [12] видно, що відстань між ножами залежить не лише від розподілу навантаження на вал, а й від того, чи гранула буде формуватися при одночасному врізанні в матеріал ножів чи в почерговому. При почерговому врізанні в матеріал навантаження на вал буде меншим ніж при одночасному, що зменшить навантаження на приводний вал двигуна.

Для порівняння розглянемо ще схему з ножами з подвоєними шестигранними отворами повернутими на кут в 30° (рис. 3.6). На цьому рисунку зображено три ножі товщиною $T=5$ мм, зовнішнім діаметром $D=26$ мм, і діаметр вписаного кола шестигранника $d=8,6$ мм. Кут між робочою поверхнею першого і другого ножів рівній $90^\circ - 60^\circ = 30^\circ$, а між робочими поверхнями другого і третього ножів рівній $60^\circ - 30^\circ = 30^\circ$. Отже конфігурація ножів з двома квадратними отворами зі спільним центром є більш вигідною для рознесення навантаження від контакту леза ножа з пластиком.

Проте ми розглянули лише два варіанти з квадратним валом і 6 лезами і шестигранним валом і 5 лезами.

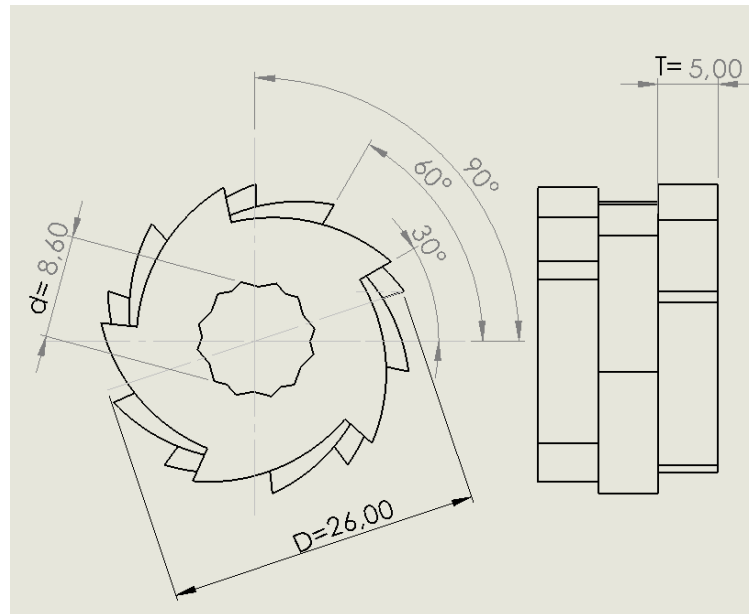


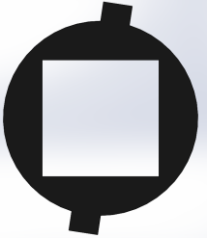
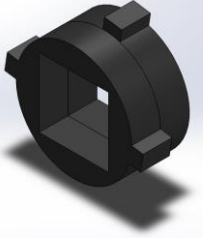
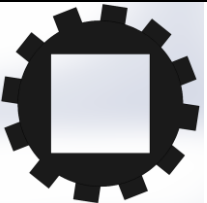
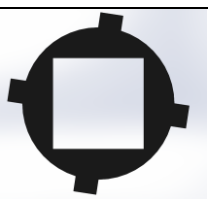
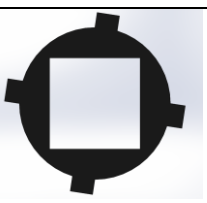
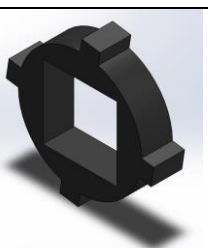
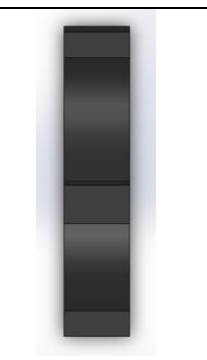
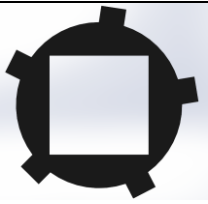
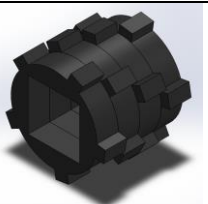
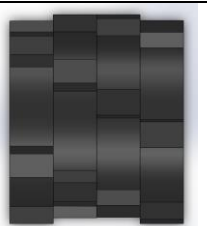
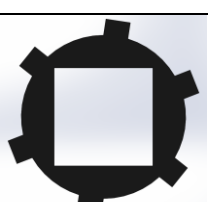
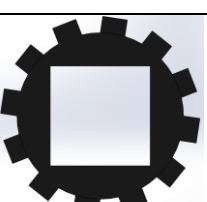
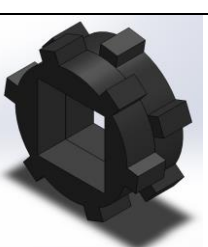
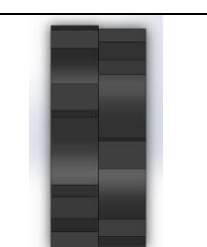
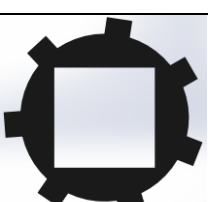
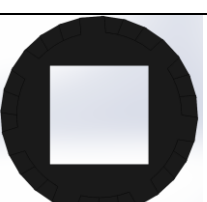
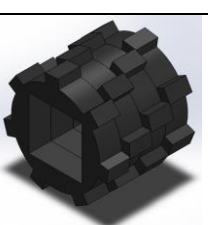
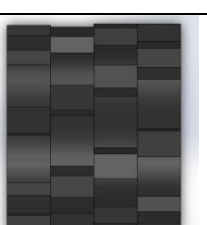
Рисунок 3.6 – Зображення взаємного розташування ножів при 5 лезах на ножах і кутом повороту на 30 градусів кожного наступного ножа

Розглянемо, якою буде найбільш оптимальна конфігурація валу шредера по кількості лез (таблиця 3.1. колонка 1) і геометрії валу за допомогою тривимірного моделювання програмного середовища SolidWorks 2020. Зробимо це на прикладі дискового робочого елемента шредера з умовно показаними ножами у вигляді прямокутників на круглій основі і порівняємо різну кількість ножів на кожному з валів і кількість ножів яка описує повне коло, тобто лише одне лезо на валу вступає у взаємодію з пластиком в один момент часу (таблиця 3.1. колонка 4,5,6). Також нас цікавить, який вигляд буде мати заповнення кола валу лезами ножів, що можемо побачити в колонці 3 таблиці 3.1.

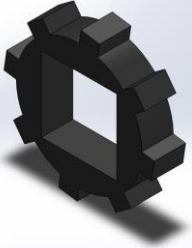
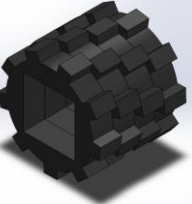
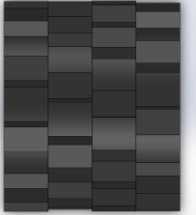
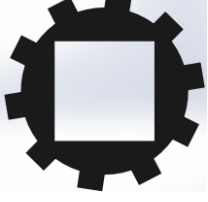
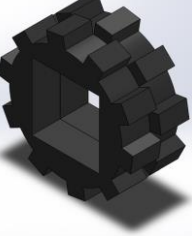
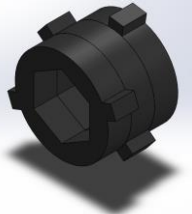
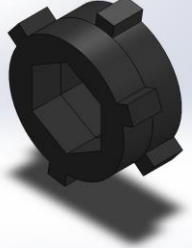
Таблиця 3.1 Вибір перерізу валу і кількості лез на ножі в залежності від рознесення навантаження на валу за рахунок неодночасного контакту лез ножів з ABS пластиком.

Квадратний вал					
1	2	3	4	5	6
Кількість лез в одного ножа	Вид одного ножа	Вид з переду набору ножів	Ізометричний вид набору ножів	Вид з верху набору ножів	Кількість ножів в повному колі

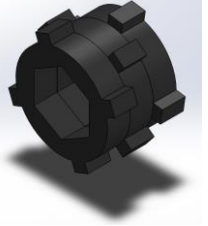
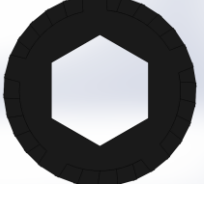
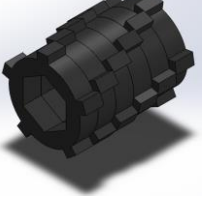
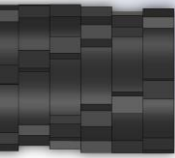
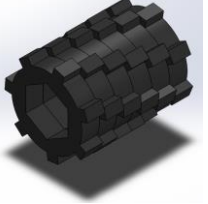
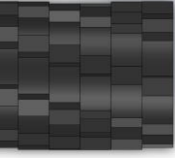
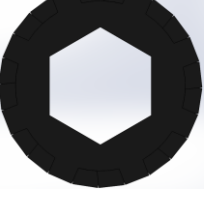
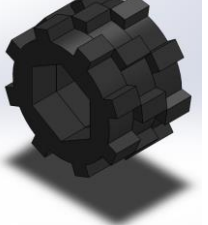
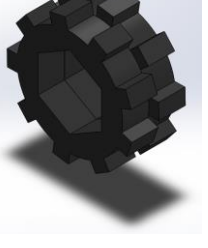
Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
2					2
3					4
4					1
5					4
6					2
7					4

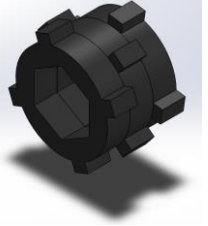
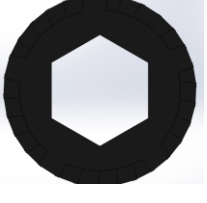
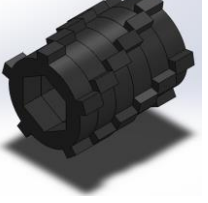
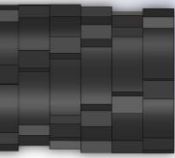
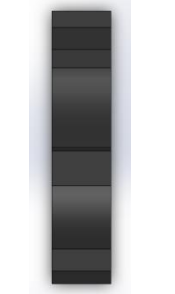
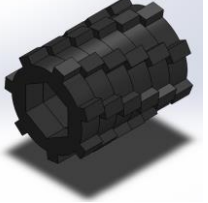
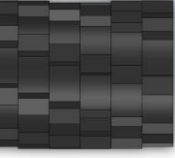
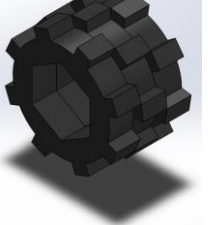
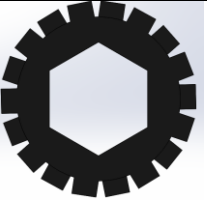
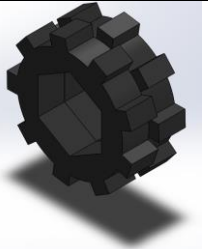
Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
8					1
9					4
10					2
Шестикутний вал					
2					3
3					2

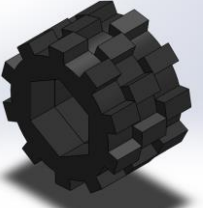
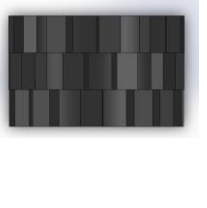
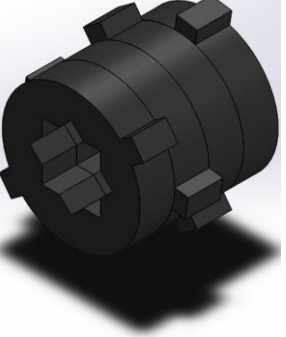
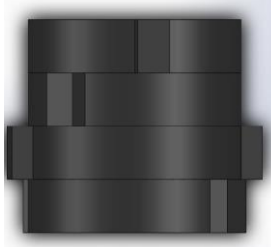
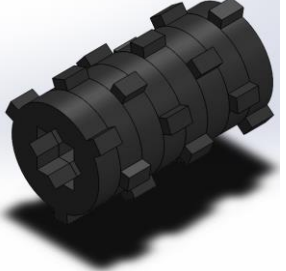
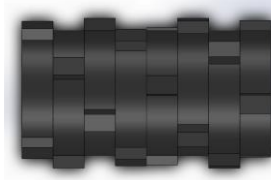
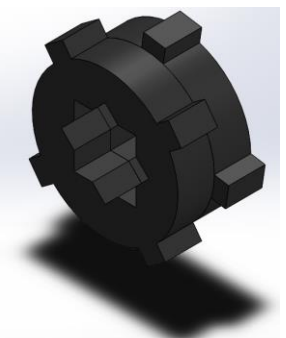
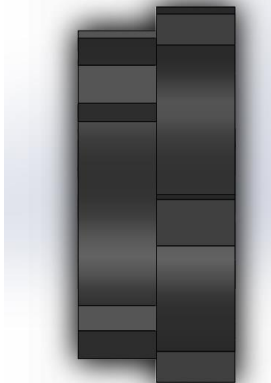
Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
4					3
5					6
6					1
7					6
8					3
9					2

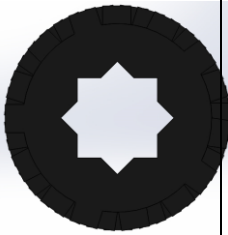
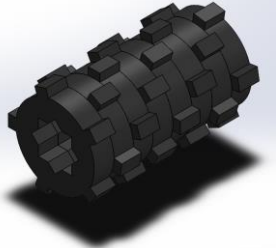
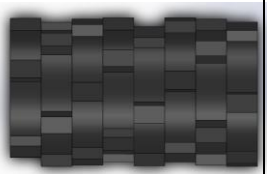
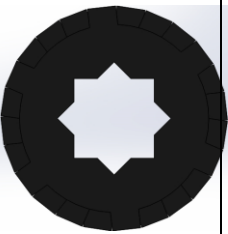
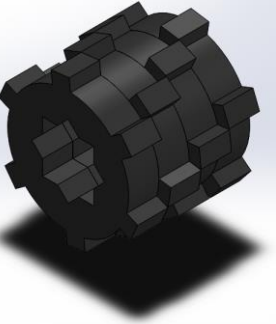
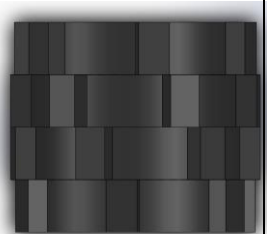
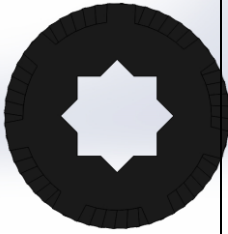
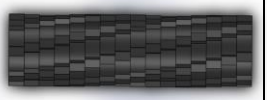
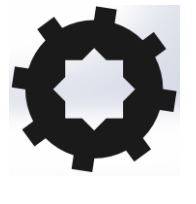
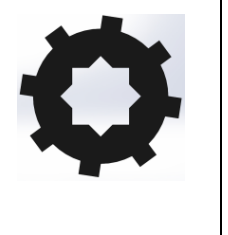
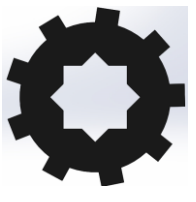
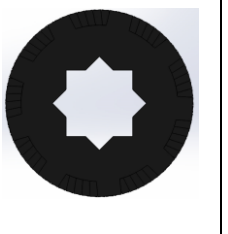
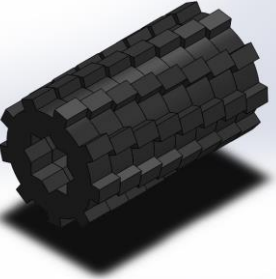
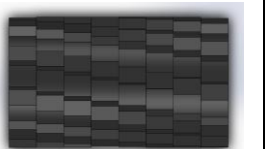
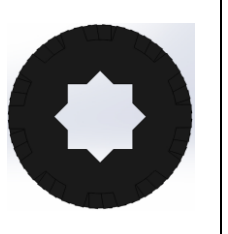
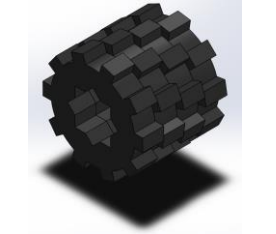
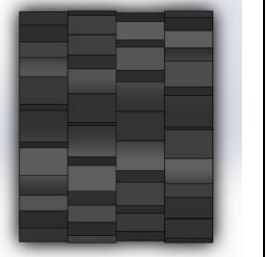
Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
4					3
5					6
6					1
7					6
8					3
9					2

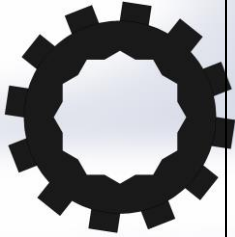
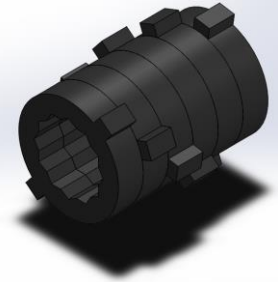
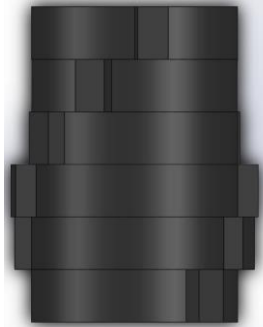
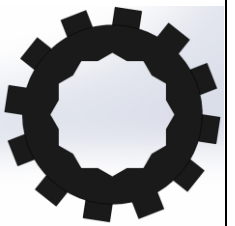
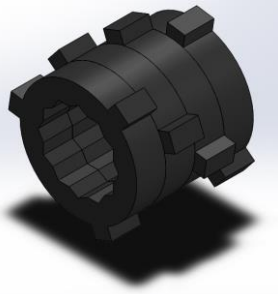
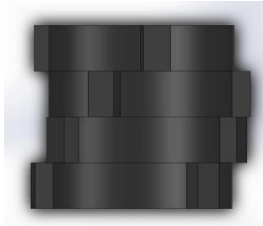
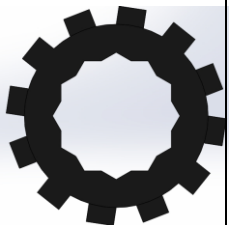
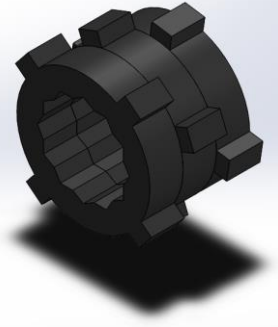
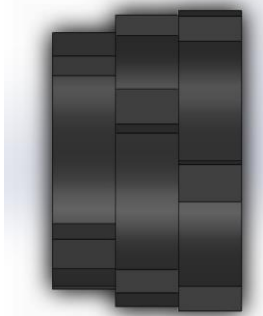
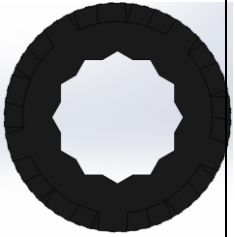
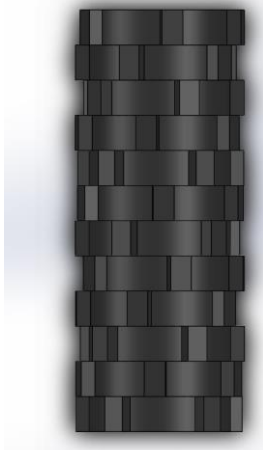
Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
10					3
Квадратний вал (подвійний квадрат), зміщення ножів 45 градусів					
1	2	3	4	5	6
Кількість лез в одного ножа	Вид одного ножа	Вид з переду набору ножів	Ізометричний вид набору ножів	Вид з верху набору ножів	Кількість ножів в повному колі
2					5
3					8
4					2

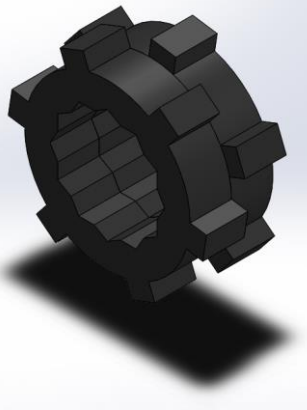
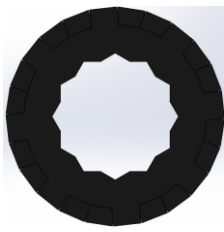
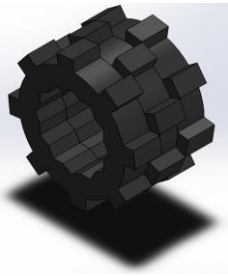
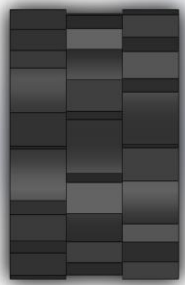
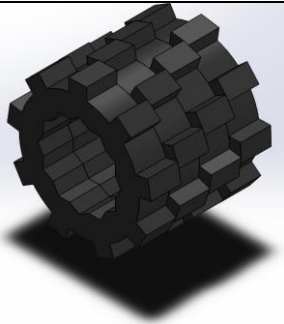
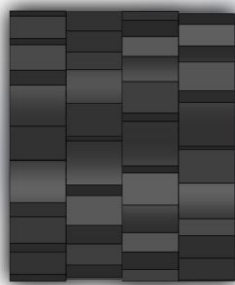
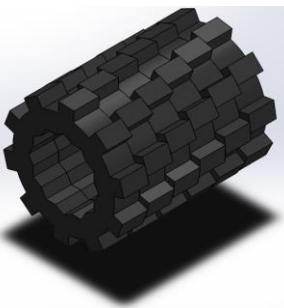
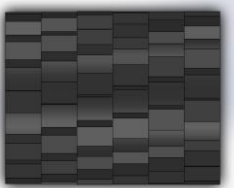
Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
5					8
6					4
7					16
8					1
9					8
10					4

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
Шестикутний вал, зміщення ножів на 30 градусів					
2					6
3					4
4					3
5					12

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6
6					2
7					12
8					3
9					4
10					6

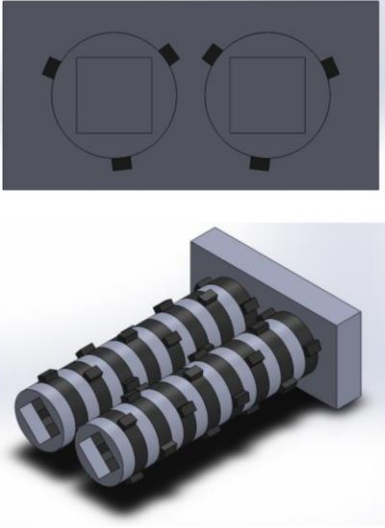
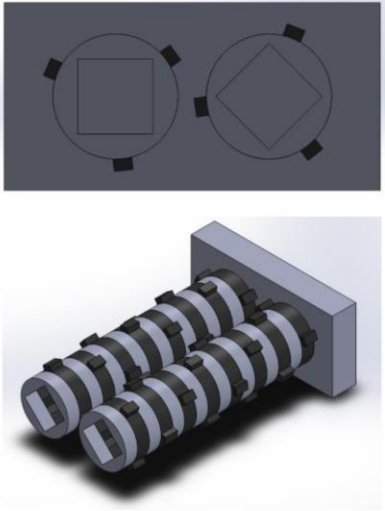
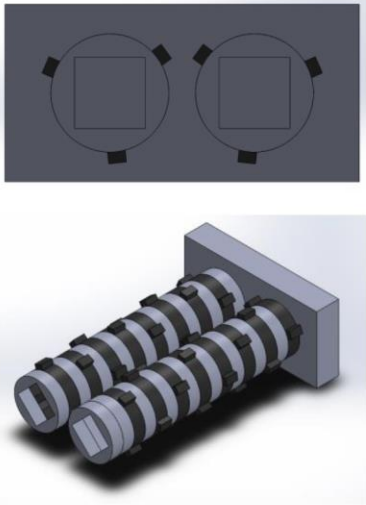
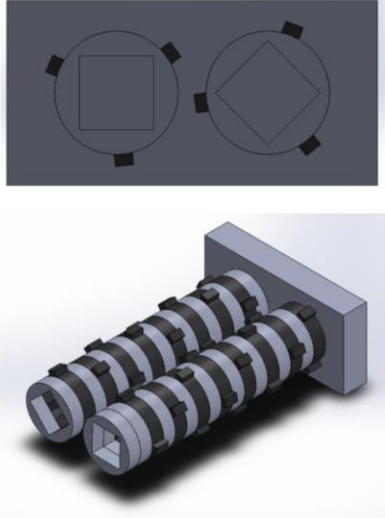
З таблиці 3.1 видно, що найбільше рознесення одночасного врізання в матеріал можна досягти при квадратному валу і 3 лезам на ножі з подвоєним квадратним отвором. Тоді за один оберт валу одночасно з пластиком, що подрібнюється, буде взаємодіяти кожен 9-тий ніж, а при 7 лезах кожен 17-цятий. При шестигранному валу найбільше рознесення лез буде при 5 і 7 лезам на ножі з подвоєним шестигранником. Тоді кожен 13-тий ніж одночасно взаємодіє з пластиком. Проте, так як шредер планується для виробництва на невеликому виробництві або власними силами, то самі ножі повинні бути максимально ефективні і мати найменший діаметр для зменшення плеча сили ножа, а отже і потужності двигуна. Тому ножі з подвоєнням отвору для валу не підходять через необхідність додаткового збільшення розміру діаметру ножа, для запасу міцності матеріалу ножа з додатковим закалюванням. Отже для подальшого вибору ножів необхідно визначити розміри ножів, щоб відстань між ножем і протиріжучою пластиною відповідала заданим розмірам гранул подрібненого пластику.

В зв'язку з виявленими перевагами (простотою і найменшою кількістю лез) пропонується вибрати для подальшого порівняння шестигранний вал з п'ятьма різальними лезами на робочих ножах. При цьому варіанті компоновки ми будемо мати найбільше рознесення ножів по довжині валу, а саме 6 ножів при 60° повороту кожного наступного ножа. Це легко визначити, так як при подвоєному шестигранному отворі ми мали 12 ножів при 30° повороту кожного наступного ножа.

3.2 Варіанти компоновки ножів на валах

Отже існує декілька варіантів компоновки ножів на валах. Вони представлені у таблиці 3.2

Таблиця 3.2 Вибір компоновки ножів на валах

	
А	Б
	
В	Г

Варіант А: Два набори ножів на валах, розташовані один навпроти одного. Між ними встановлена проставка, яка служить для протидії заклинюванню часток пластика поміж ножами та стінками робочої камери. Леза ножів мають однакову кутову швидкість і є симетричними, вони вступають в контакт з матеріалом одночасно. Тоді форма гранули та її розмір формується двома лезами і тильною стороною ножів.

Варіант Б: Два набори ножів на валах, розташовані один навпроти одного. Між ними встановлена аналогічна проставка для протидії

заклинюванню. Леза ножів мають однакову кутову швидкість і зміщені одне відносно другого на такий кут, щоб леза вступали в контакт з матеріалом по черзі. Тоді форма гранули формується одним лезом і тильною стороною ножа на другому валу.

Варіант В: Два ножі, кожен з яких розташований навпроти своєї проставки для протидії заклинюванню. Леза ножів мають однакову кутову швидкість і є симетричними, вони вступають в контакт з матеріалом одночасно. Тоді форма гранули формується двома лезами і тильною стороною ножів.

Варіант Г: Два ножі, кожен з яких розташований навпроти своєї проставки для протидії заклинюванню. Леза ножів мають однакову кутову швидкість і зміщені один відносно другого на такий кут, щоб леза вступали в контакт з оброблюваним матеріалом по черзі. Тоді форма гранули формується одним лезом і тильною стороною дискового ножа на другому валу.

Так як дистанційна шайба застосовується не лише для запобігання заклинюванню в варіантах А і Б, тоді її нема сенсу робити такої ж ширини як і основне лезо. Проте в варіантах В і Г навпаки товщина дистанційних шайб, як і самих лез відповідає за зазор між лезами який повинен бути в межах 0,1-0,2 від товщини основного леза.

При використанні двох наборів ножів на одному валу навіть при використанні отвору під шестигранний переріз валу без подвоєння можна рознести врізання в матеріал пластику на 12 ножів. Це набагато простіше ніж вирізання додатково матеріалу з тіла ножа.

На рис. 3.7 показано зображення наборів ножів на одному валу при повороті кожного наступного ножа на 60° в такому ракурсі, якщо дивиться на них з торця приводного валу. Відповідно, на рис. 3.8 показано зображення наборів ножів на одному валу при повороті кожного наступного ножа на кут 300 градусів, а на рис. 3.9 – зображення наборів ножів на одному валу при прокручуванні кожного наступного 7-ми лезвійного ножа на кут 300 градусів і кожного наступного 5-ти лезвійного ножа на кут 60 градусів.

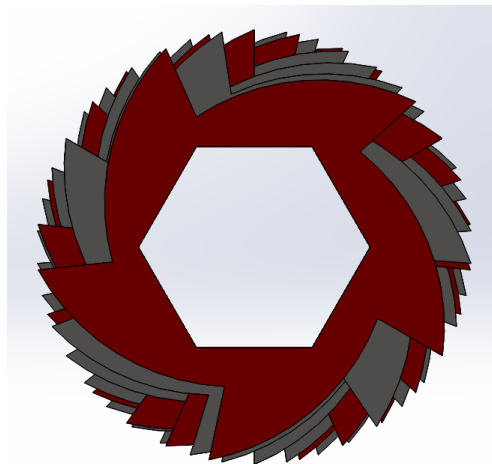


Рисунок 3.7 – Зображення наборів ножів на одному валу при повороті кожного наступного ножа на 60°

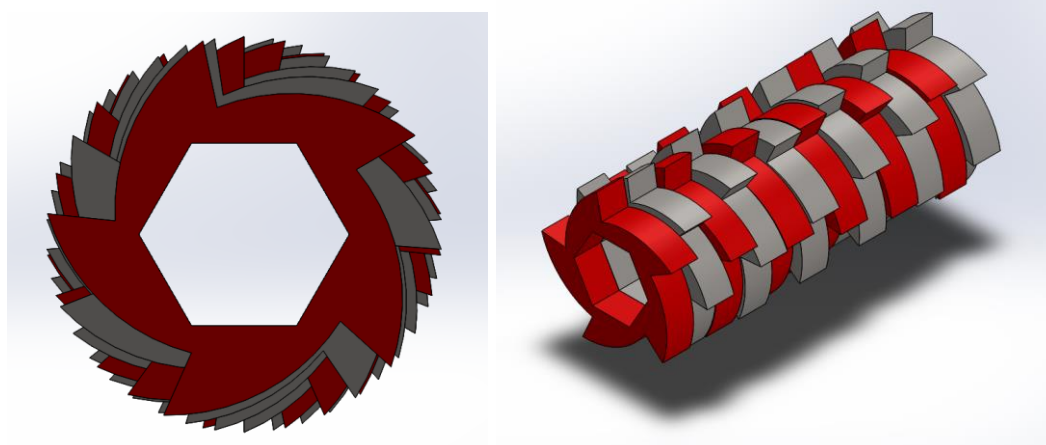


Рисунок 3.8 –Зображення наборів ножів на одному валу при повороті кожного наступного ножа на кут 300 градусів

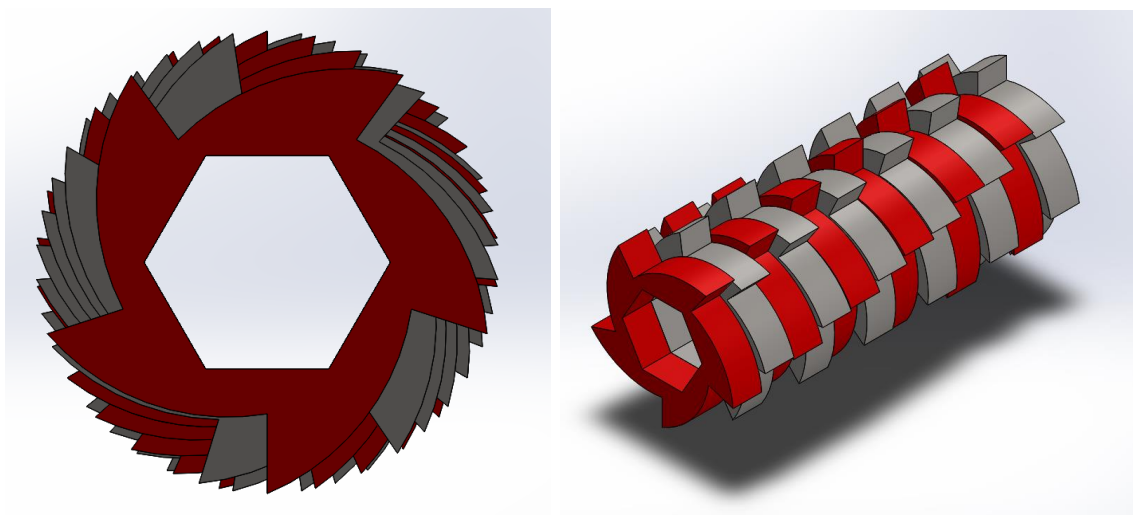


Рисунок 3.9 – Зображення наборів ножів на одному валу при прокручуванні кожного наступного 7 лезвійного ножа на кут 300 градусів і кожного наступного 5 лезвійного ножа на кут 60 градусів.

Розглянемо розташування наборів ножів на одному валу при

прокручуванні кожного наступного на різні кути для вибору найбільш оптимального розташування. При цьому для спрощення будемо розглядати самі ножі без дистанційних шайб і без зображення валу.

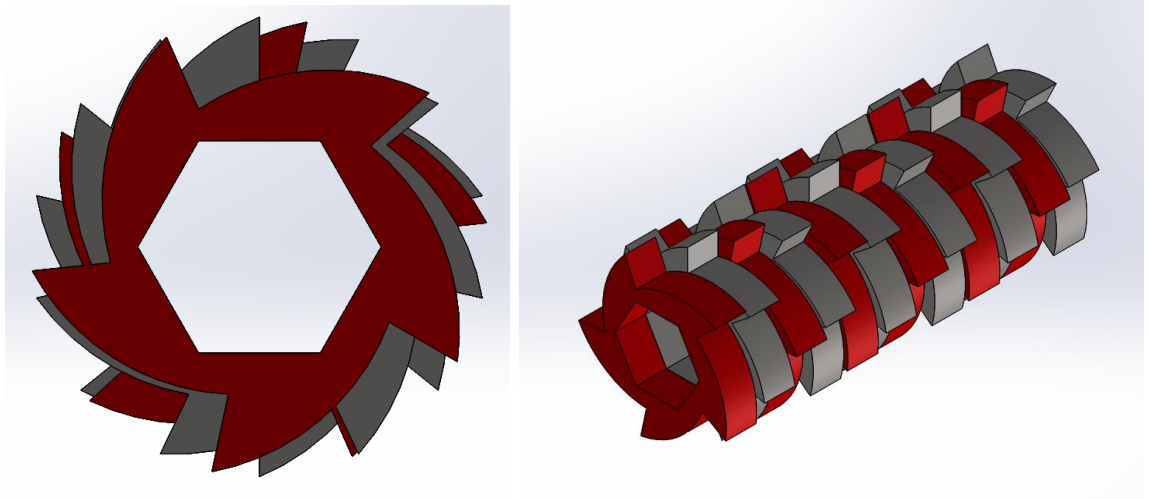


Рисунок 3.10 – Зображення наборів ножів на одному валу при прокручуванні кожного наступного ножа на кут 180 градусів

При повороті на 60 градусів (рис. 3.7) і 30 градусів (рис. 3.8) кожного наступного ножа двох наборів ножів на одному валу як і при повороті кожного наступного (рис. 3.9) 7-ми лезвійного ножа на кут 300 градусів і кожного наступного 5-ти лезвійного ножа на кут 60 градусів за один оберт валу одночасно з пластиком, що подрібнюється будуть взаємодіяти кожен 12-тий ніж, що на один ніж менше ніж при використанні подвоєного шестигранного отвору в ножі, проте дає змогу спростити процес виготовлення ножів.

При куті повороті при прокручуванні кожного наступного на кут 180 градусів (рис. 3.10) леза кожного набору ножів через один вриваються в пластик в один і той самий момент, що є небажаним через додаткове навантаження на привод.

3.3 Моделювання взаємодії леза ножа з матеріалом пластику

На рис 3.11 зображена зона захоплення ширина, якої рівна 100 мм при розмірі робочої камери 220 мм.

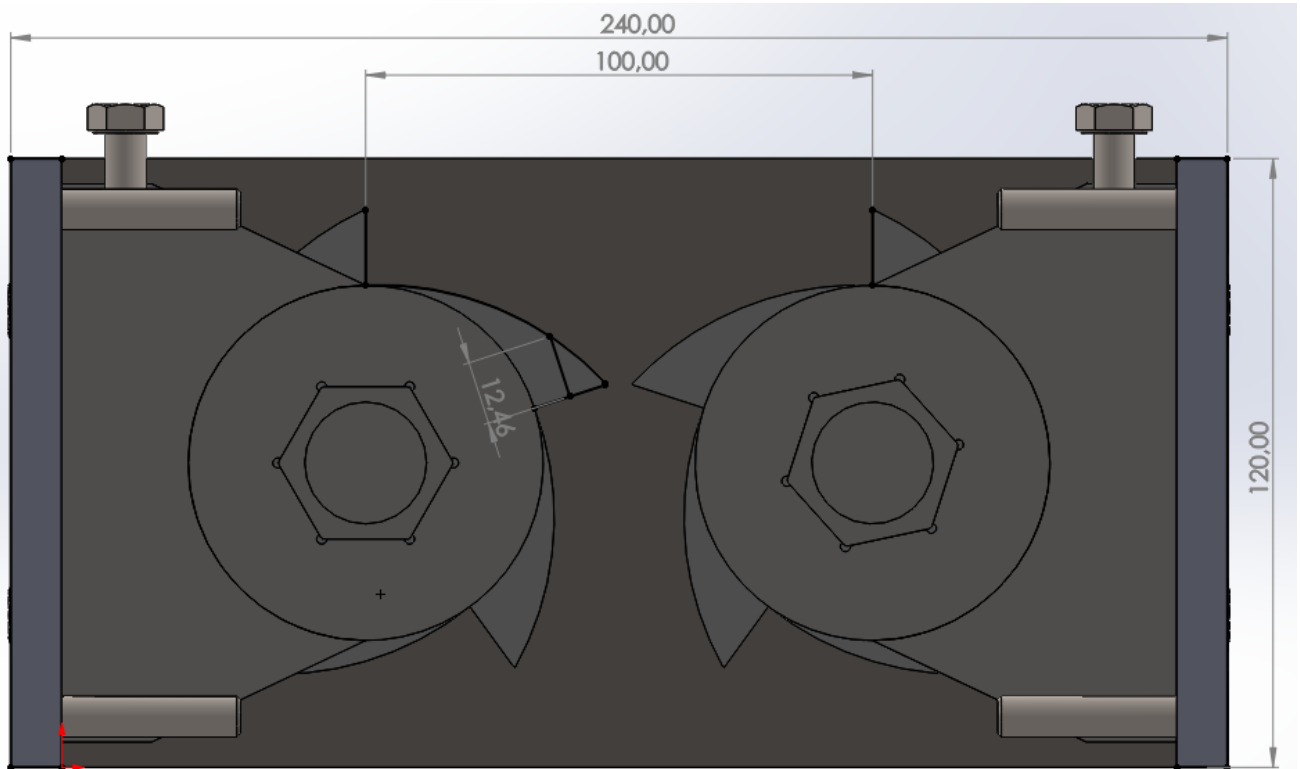


Рисунок 3.11 – Зображення довжини леза ножа

При таких розмірах на одне лезо буде припадати сила рівна межі міцності на розрив помноженій на товщину матеріалу, так як для сталі 65Г межі міцності на розрив $=850$ МПа, тоді $850 \text{ МПа} \cdot 100/2=2500 \text{ МПа}\cdot\text{мм}$, що більше за силу яку може витримати ніж при довжина леза в 12,46 мм, а отже сила буде рівна $850 \text{ МПа} \cdot 12,46=10591 \text{ МПа}\cdot\text{мм}$, що є в 4 раз більше. Для підтвердження цих розрахунків було проведено моделювання взаємодії ножа і матеріалу пластику ABS в програмному середовищі SolidWorks 2020. Результати дослідження представлено на рис. 3.12, де показано максимальне значення сили, яке припадає на 1 кв. мм не більше 800 Н.

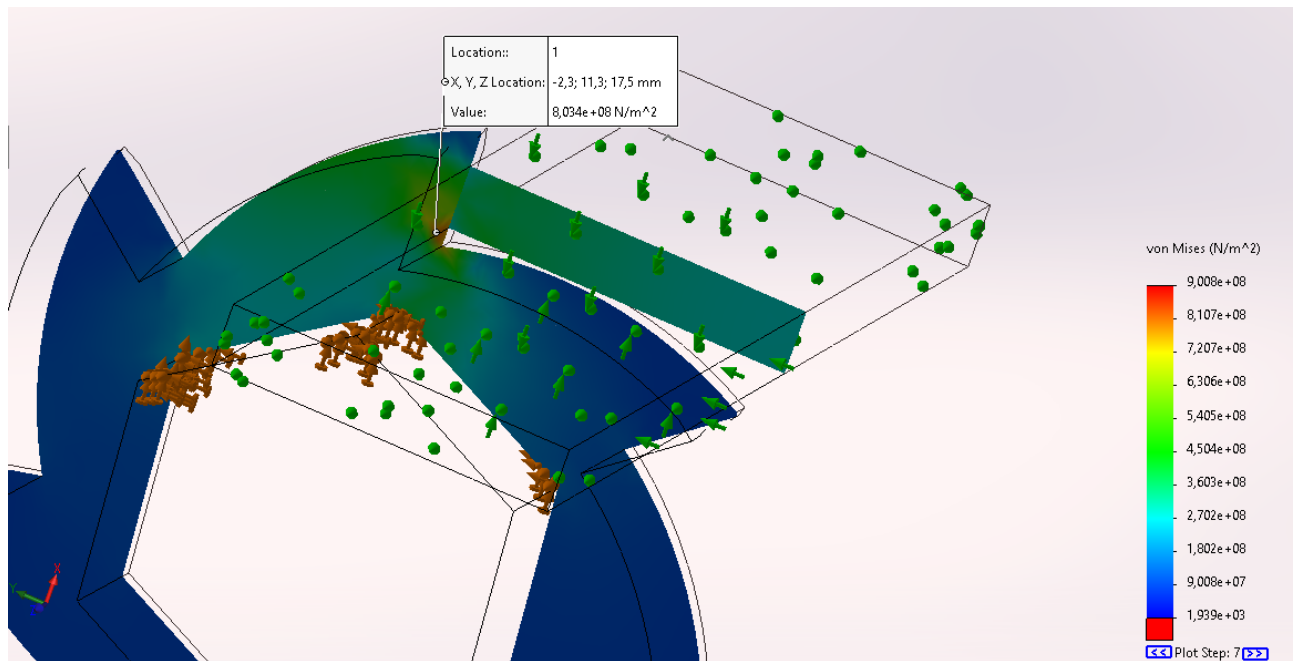


Рисунок 3.12 – Зображення результату симуляції von Mises в Solidworks

3.4 Основні етапи проектування шредера

Проектування шредера для подрібнення пластику включає кілька ключових етапів, кожен з яких спрямований на створення надійного, ефективного та безпечного пристрою. Наведемо та розглянемо основні з них: Аналіз вимог до шредера.

- 1) Він включає до себе визначення типу пластику для подрібнення;
- 2) Оцінка обсягу обробки (продуктивності), необхідної для шредера та визначення кінцевого об'єму подрібненого матеріалу та необхідної потужності;
- 3) Оцінка умов експлуатації (на відкритому повітрі або у приміщенні, наявність вологи, та пилу).

Розробка концепції шредера:

- 1) Вибір типу шредера (наприклад, з одним або двома валами, роторний та ін.);
- 2) Розробка схеми пристрою, яка містить зону завантаження матеріалу, його переробки та вивантаження;
- 3) Вибір конструкційних матеріалів для основних робочих органів, таких як ріжучі елементи та корпус;

Конструювання ріжучого механізму:

- 1) Вибір ріжучих елементів (ножів), їх геометрії, твердості та матеріалу;
- 2) Розрахунок необхідної сили для подрібнення пластику.
- 3) Конфігурація ножів та їх кількість для досягнення оптимального розміру фракцій;
- 4) Розробка системи охолодження та змащення (за необхідності).

Проектування приводу:

- 1) Розрахунок потужності приводу, необхідної для обертання ножів;
- 2) Вибір електродвигуна та редуктора відповідно до розрахункових характеристик;
- 3) Вибір системи керування (частотний перетворювач або система плавного запуску).

Безпека та захист:

- 1) Проектування захисних кожухів та системи безпеки для оператора;
- 2) Розробка датчиків для контролю температури, перевантажень, блокування при доступі;
- 3) Планування кнопки аварійної зупинки шредера та інших елементів захисту.

Розробка системи вивантаження подрібненого матеріалу:

- 1) Проектування вихідного тракту для подрібнених фракцій (наприклад, шнек, транспортер) та системи сит для розділення подрібненого пластику на фракції;
- 2) Передбачення можливості заміни контейнерів для подрібненого пластику або конвеєрної подачі.

Тестування та оптимізація:

- 1) Виготовлення прототипу та проведення тестування його роботи на різних типах пластику;
- 2) Оптимізація конструкції на основі тестів (корекція потужності, регулювання ножів, покращення конструкції приводу);
- 3) Повторні випробування та внесення фінальних змін у конструкцію для підвищення надійності та ефективності.

Підготовка технічної документації:

1) Створення креслень, специфікацій, технічних умов та інструкцій з експлуатації;

2) Розробка інструкцій щодо обслуговування та безпеки.

Ці етапи забезпечують функціональність, продуктивність, відповідність вимогам безпеки та надійності шредера для подрібнення пластику.

3.5 Вибір геометрії різальних ножів та розрахунок основних параметрів шредера

Розрахунок геометрії та кількості ножів шредера є важливим етапом у проектуванні, оскільки він впливає на ефективність подрібнення, якість кінцевого продукту та витрати на експлуатацію. Є кілька ключових аспектів, які слід врахувати при розрахунку. Розрахунок ножів для подрібнення пластику має враховувати кілька ключових параметрів: кількість ножів, їх геометрію, кут заточки та розташування.

1. Кількість ножів впливає на ефективність подрібнення. Чим більше ножів, тим дрібніший вихідний матеріал і тим менше енергії витрачається на одиницю подрібнення.

Формула для розрахунку кількості ножів:

$$N=D/d \quad (3.1)$$

де: N – кількість ножів, D – діаметр ротора (мм), d – діаметр ножа або міжосьова відстань між ножами (мм).

2. Кут заточки ножів

Оптимальний кут заточки залежить від типу пластику, для ABS рекомендується $30\text{--}35^\circ$

3. Розрахунок продуктивності подрібнювача

Продуктивність можна розрахувати як об'єм матеріалу, що подрібнюється за одиницю часу.

$$Q=(N \times S \times V)/t \quad (3.2)$$

де: Q – продуктивність (кг/год),

N — кількість ножів, S — товщина шару пластику (мм),

V — швидкість обертання ротора (об/хв),

t — час роботи (хв).

4. Енерговитрати на подрібнення залежать від потужності двигуна та продуктивності.

$$E=P/Q \quad (3.3)$$

де: E — енерговитрати на 1 кг матеріалу (Вт·год/кг),

P — потужність двигуна (Вт), Q — продуктивність (кг/год).

5. Вибір діаметра ротора та товщини ножів

Діаметр ротора та товщина ножів визначають розмір подрібнювача. Зазвичай діаметр ротора вибирається в залежності від обсягу оброблюваного матеріалу.

3.6 Швидкість обертання ротора

Швидкість обертання визначається в залежності від типу матеріалу. Для подрібнення пластику зазвичай використовують швидкість 300...600 об/хв.

Основними геометричними параметрами дискового ножа для подрібнення пластику є:

зовнішній діаметр ножа D — це основний параметр ножа, який визначає його загальний розмір і сумісність з ротором шредера. Типові значення діаметра для дискових ножів коливаються від 100 до 500 мм залежно від конструкції подрібнювача.

Внутрішній діаметр d та форма отвору: отвір у центрі ножа необхідний для його кріплення на вал. Внутрішній діаметр та форма отвору визначається діаметром та формою валу шредера та зазвичай складає 20–100 мм. Отвори можуть бути зі пазом для шпонки, шліців, чотирьох- або шестигранні для більш надійної передачі крутного моменту від валу.

Товщина ножа T визначає міцність ножа. Для подрібнення пластику товщина дискового ножа може складати 5–20 мм, залежно від типу матеріалу, що підлягає подрібненню, та потужності шредера.

Кут заточки α різального леза ножа важливий для ефективності різання. Залежно від типу пластику рекомендується кут заточки різальних крайок $20^\circ \dots 40^\circ$. Кут відображається у кресленні на зовнішній ріжучій частині (або частинах) ножа.

Пряма форма ріжучої кромки найчастіше використовується для звичайного подрібнення. Зубчаста різальна кромка допоможе утримувати пластик та забезпечити більш плавне різання, якщо оброблюваний матеріал твердий або в'язкий. В цьому випадку на кресленні ножа відображаються зубці з зазначенням їх кількості, висоти та кута нахилу зубців.

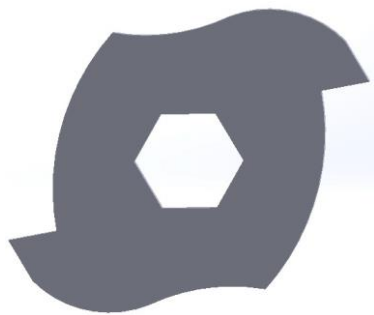
На кресленні зазначається радіус заокруглення ріжучої кромки r ($0,1-0,3$ мм), якій передбачено для забезпечення стійкості до зношування.

На рисунку 3.13 показані варіанти виконання різальних дискових ножів з шестигранним центральним отвором та різною кількістю різальних зубців.

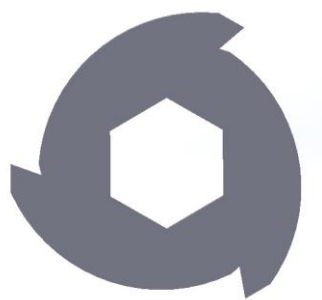
Дискові ножі служать для розрізання та подрібнення пластику. Їх конструкція і матеріал залежать від типу і твердості матеріалів, що підлягають обробці. Леза зазвичай розподіляються в певному порядку вздовж обертального валу і можуть бути різної форми та розміру, щоб відповідати заданим потребам подрібнення.

Зазвичай, кількість рухомих ножів на валу залежить від довжини робочої частини валу та ширини ріжучої частини ножа. Щоб забезпечити ефективне рівномірне подрібнення для нашої моделі обираємо ножі з центральним отвором шестигранної форми. Це дозволить встановлювати їх на приводний вал разом з дистанційними шайбами (рис. 3.14).

Дистанційні шайби забезпечують потрібну відстань між сусідніми різальними ножами, а також виконують роль опор для уникнення перекосу ножів під час роботи.



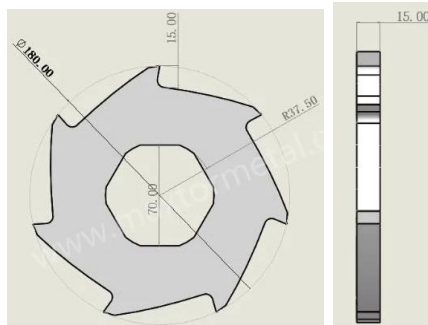
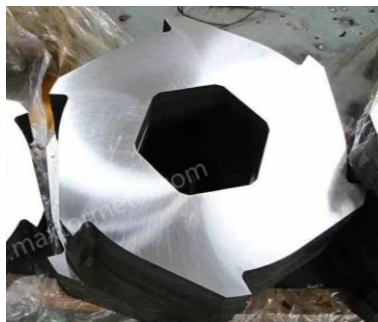
а) Ніж з двома різальними
зубцями



б) Ніж з трьома різальними
зубцями



в) Ніж з чотирма різальними зубцями



г) Ніж з шістьма ножами та приклад позначень його основних розмірів [4]



д) Багатозубчастий ніж

Рисунок 3.13 – Варіанти виконання різальних дискових ножів з шестигранним центральним отвором та різною кількістю різальних зубців

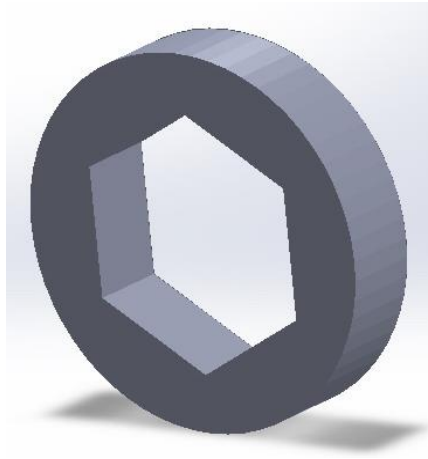


Рисунок 3.14 – Дистанційна шайба

Профіль робочої частини валу доцільно обирати шестигранної форми, що робить його технологічним при виготовленні із сортового прокату та забезпечує надійну фіксацію та просторове орієнтування ножів на ньому для оптимального подрібнення.

Нерухомі ножі (рис. 3.15). Зазвичай вони розташовуються між рухомими ножами та стінками робочої камери.

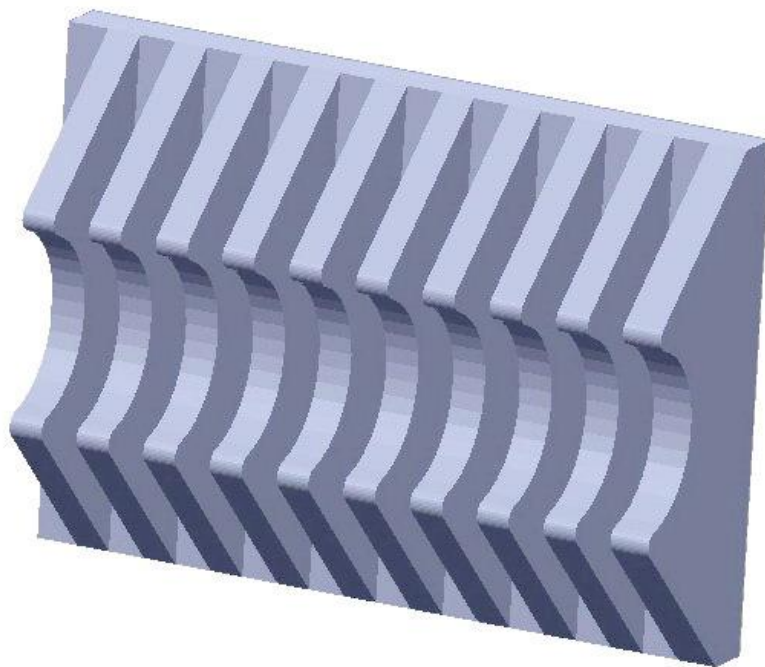


Рисунок 3.15 – Нерухомі ножі

Їх кількість також залежить від конструкції шредера, але зазвичай дорівнює або перевищує кількість рухомих ножів на два.

3.7 Компоновка корпусу та роторів шредера

Корпус шредера виготовляється із міцних матеріалів типу сталі, щоб витримувати навантаження. Корпус має бути достатньо жорстким, щоб витримати вібрації та навантаження під час роботи.

Ротор (рис. 3.16) складається з валу, на якому розміщені дискові ножі та дистанційні шайби. Посередині вал має профільну поверхню (чотирьох- або шестигранну) для передачі крутного моменту на дискові ножі та їх орієнтації відносно одне одного. Вал опирається на кількові підшипники та приводиться у рух за допомогою зубчастої передачі від редуктора.

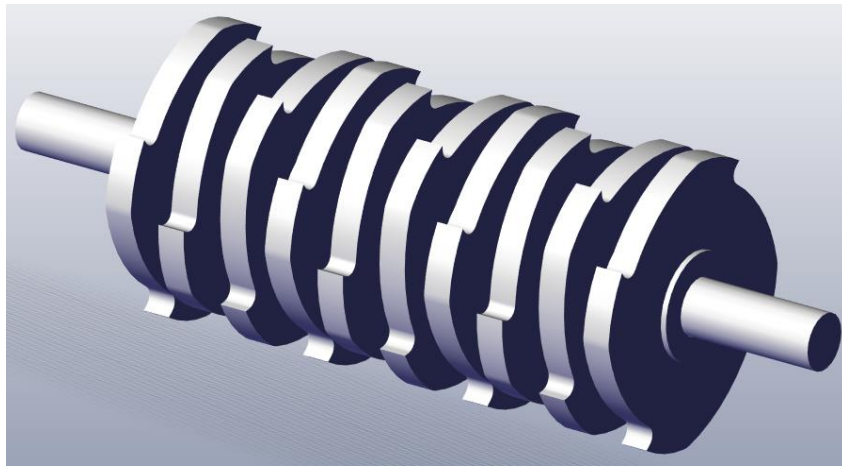


Рисунок 3.16 – Ротор шредера у зборі

В камері подрібнення (рис. 3.17) відбувається взаємодія оброблюваного матеріалу з робочими органами шредера.

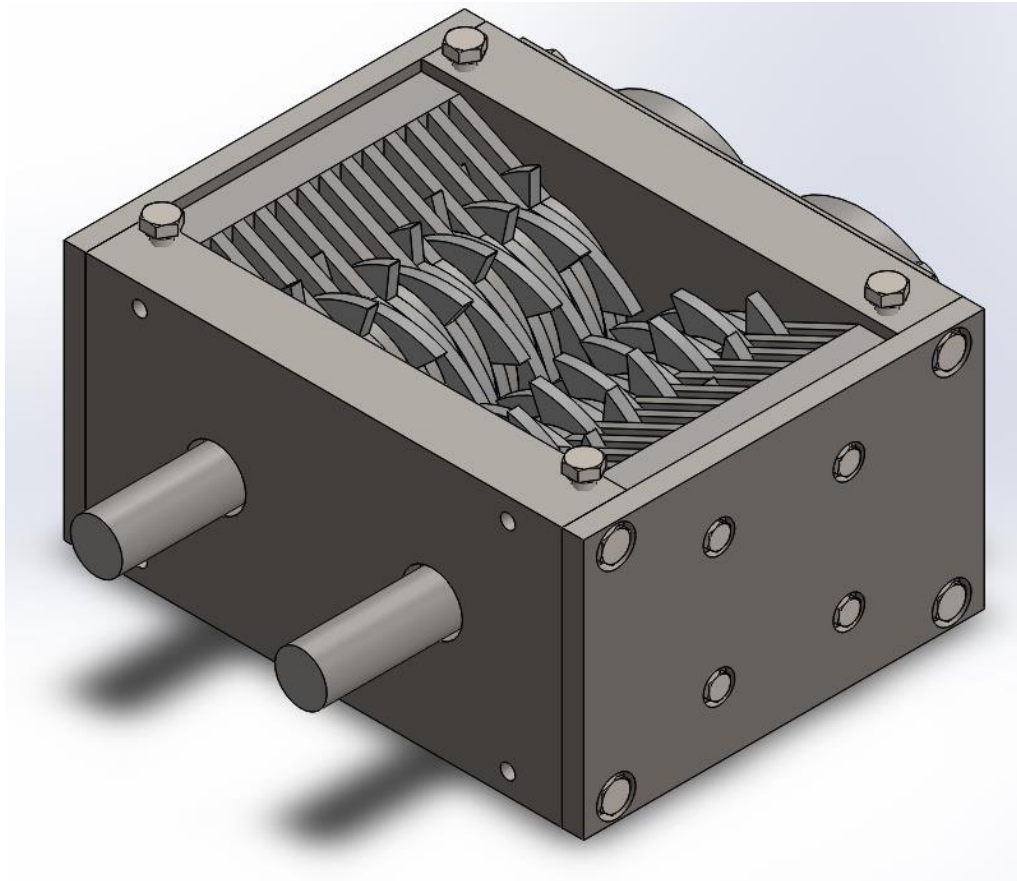


Рисунок 3.18 – Загальний вигляд робочої камери шредера

Розміри камери (ширина, довжина та висота) визначаються в залежності від об'єму перероблюваного пластику та потужністю двигуна.

Редуктор призначений для передачі обертального руху від двигуна до робочих валів, він зменшує швидкість обертання робочих валів до заданої та збільшує крутний момент на них. Зазвичай використовують 2-х або трьохступінчастий редуктор з приводом від асинхронного електродвигуна змінного струму потужністю від 2 до 10 кВт залежно від розміру та продуктивності шредера.

Кулькові підшипники закритого типу служать опорами для валів роторів, вони встановлюються або безпосередньо у торцеві стінки корпусу камери подрібнення, або в накладні кришки.

Рама служить основою для розміщення всіх компонентів шредера та сприймає навантаження від двигуна і роторів з різальними ножами.

3.8 Схема взаємодії рухомих та нерухомих ножів шредера для подрібнення пластику

Взаємодія ножів шредера та пластику під час подрібнення є ключовим етапом у роботі шредера, і вона визначає ефективність процесу подрібнення. Розглянемо, як відбувається цей процес:

Механіка процесу різання

Ножі шредера виконують різання пластику через поєднання ротаційного та стискаючого зусилля. На рисунках 3.18 показана взаємодія ножів шредера та пластику під час подрібнення. Різальні ножі 1 та 2 встановлені на валах 3 та 4 таким чином, що під час обертання валів кожна пара ножів послідовно захоплює частки пластику 7. При подальшому обертанні пластик подрібнюється на шматочки 8 в зоні між рухомими лезами та нерухомими ножами 9. Внаслідок удару та ковзання, пластик розривається та розрізається, оскільки ножі ротору діють як різальні елементи, а протирізальні пластини служать для створення необхідного стискаючого тиску та зусилля. Наступна пара обертальних ножів 5 та 6 повторює цей процес, за рахунок чого пластик з бункера поступово весь розрізається, подрібнюється та просипається вниз через сита в приймальний бункер.

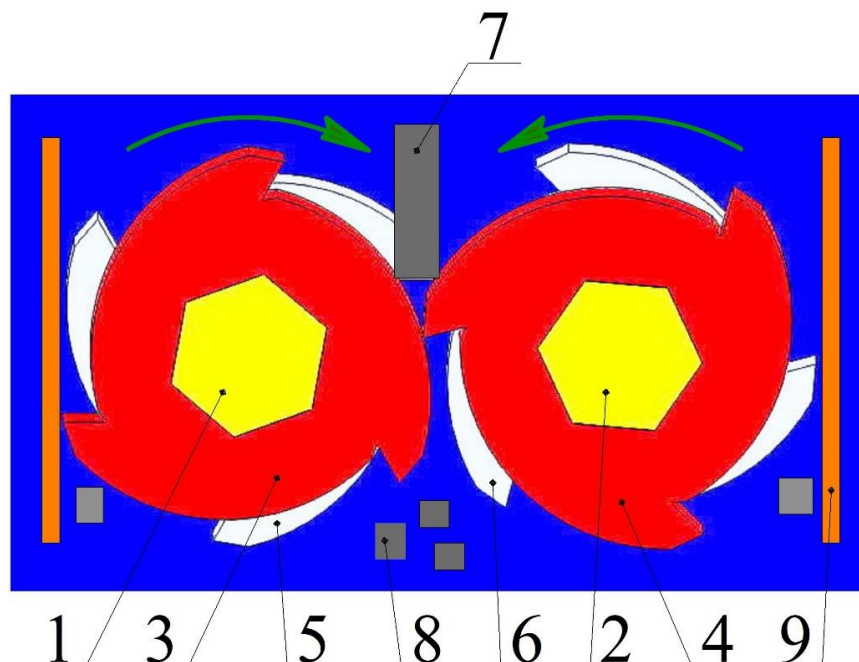


Рисунок 3.18 – Взаємодія ножів шредера та пластику під час подрібнення.

Типи подрібнення:

Пряме різання відбувається, коли ніж безпосередньо ріже пластик, як ножиці. Це основний спосіб взаємодії для шредерів з гострими ножами, де пластик ріжеться на дрібні шматки під впливом сили обертання.

Зсувне різання: Якщо пластик більш твердий (як у випадку з ABS), ножі часто діють як клин, що подрібнює матеріал на частини завдяки поєднанню різання та зсуву.

Дроблення: Для більших шматків пластику, які не можуть бути одразу розрізані, відбувається механічне дроблення під тиском між ножами і нерухомими пластинами. Призначенням протирізальних пластин є створення точки опору. Ножі не можуть самостійно подрібнити пластик без опори. Протирізальні пластини забезпечують нерухому точку опору для ножів. Це дозволяє ножам краще розрізати пластик, створюючи тиск на матеріал, який розташований між лезом і пластиною. Різальний ніж діє на матеріал, прикладаючи силу, яка перевищує межу міцності пластику ABS. Це викликає локальні зусилля зсуву, що призводить до руйнування структури матеріалу та подрібнення його на частинки.

Таким чином, процес подрібнення пластику ABS у шредері залежить від взаємодії між різальним інструментом і пластиком, включаючи геометрію ножів, швидкість обертання, та фізико-механічні властивості пластику.

Енергія деформації:

$E = \sigma \times V$, де σ – напруга, необхідна для деформації пластику,

V — об'єм матеріалу.

Потужність двигуна:

$P = T \times \omega$, де T — крутний момент,

ω — кутова швидкість обертання ножів.

Оптимізація розміру подрібнених часток: В залежності від зазору між ножами і протирізальними пластинами, а також від форми і положення цих різальних елементів, можна контролювати розмір вихідних гранул пластику.

Зношування ножів. Під час подрібнення пластикових відходів ножі шредера поступово затуплюються через тертя та удари об матеріал. Чим жорсткіший пластик, тим швидше зношуються ножі.

Кут заточування: Кут заточування різальних ножів є важливим для оптимізації процесу різання. Більш гострий кут зменшує зусилля різання та дає можливість краще прорізати матеріал, але леза ножа може швидше зношуватися або взагалі поламатись у випадку потрапляння на нього крупного або міцного куска пластика.

3.9 Рекомендації щодо обслуговування основних робочих органів шредерів.

Регулярний огляд, технічне обслуговування та заміна робочих органів шредера може продовжити термін служби та підтримувати його ефективну роботу. Леза дискових ножів є однією з найбільш уразливих частин шредерів. Вони відповідають за безпосередній контакт з матеріалами та операції подрібнення, тому різальні краї лез можуть зношуватися та пошкоджуються після певного часу роботи шредера. Регулярна перевірка і заміна зношених лез є важливими кроками для підтримки ефективної роботи шредера.

Підшипники, на яких обертаються вали з різальними лезами в корпусі, витримують навантаження від сил, виникаючих під час роботи шредера. Тривале високошвидкісне обертання та тиск можуть призвести до зносу або пошкодження підшипників, що вплине на продуктивність і термін служби шредера. Регулярне змащування та своєчасна заміна пошкоджених підшипників є важливими заходами для обслуговування шредера.

Привідні паси між двигуном та редуктором: Привідні паси використовуються для передачі потужності від електродвигуна до понижуючого редуктора. Тривала робота на високій швидкості може призвести до зносу або пошкодження приводних пасів. Регулярна перевірка

натягу і зносу приводних пасів і своєчасна заміна пошкоджених приводних пасів можуть забезпечити стабільну роботу подрібнювача.

Сита використовуються для контролю розміру частинок подрібнених матеріалів і запобігання потраплянню великих шматків у систему розвантаження. Тривалі операції подрібнення можуть призвести до зносу або блокування екрану, що вплине на ефективність і якість виведення шредера. Регулярне очищення та заміна зношених сіток є необхідними кроками для обслуговування шредера.

В більшості випадків на шредери встановлюється електричний двигун. Його тривала робота під високим навантаженням може призвести до перегріву електродвигуна або його пошкодження. Регулярна перевірка стану роботи та системи охолодження електродвигуна, своєчасне технічне обслуговування та ремонт є запорукою забезпечення нормальної роботи подрібнювача.

Отож вибираємо ножі товщиною 2 мм для формування ниток подрібненого пластику 2 мм і повторним пропусканням їх через шредер для отримання подрібненого пластику 2 мм х 2 мм х 2 мм. Форму вала обираємо шестигранну, діаметр ножа приймаємо 100 мм, розташування ножів на валах зі зміщенням на товщину ножа, товщина дистанційної шайби між ножами рівна товщині ножа, отвір середині ножа обираємо шестигранний без подвоєння, і кількість лез 5 на ножі. Тоді кожен 7 ніж буде одночасно взаємодіяти з пластиком. Для монтажу беремо 12 ножів на один вал. Звідки можна вибрати потужність двигуна знаючи необхідний крутний момент на валу і плече сили рівну радіусу ножа. Звідки крутний момент необхідна для розрізання пластику одним ножем рівних $50 \cdot 50 = 250$ Н мм. При конфігурації 5 лез на ножі і взаємодією з пластиком кожного 6-того ножа і так як з пластиком можуть взаємодіяти тільки четверта частина всіх ножів маємо

$$КЛ = Н/Р \cdot Л \cdot В / Ч \quad (3.4)$$

$$КЛ = 12/6 \cdot 5 \cdot 2/4 = 5$$

КЛ-Кількість лез шредера взаємодіючих з пластиком одночасно

Н - кількість ножів

Р -рознесення ножів

Л -Кількість лез

В -Кількість валів

Ч-Яка частина ножів взаємодіє одночасно

$$M = 250 \cdot 5 = 1250 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

N кількість обертів редуктора

M крутний момент

P потужність двигуна

$$P = M \cdot N / 9550 \quad (3.5)$$

$$P = 1250 \cdot 10 / 9550 = 1,3 \text{ кВт}$$

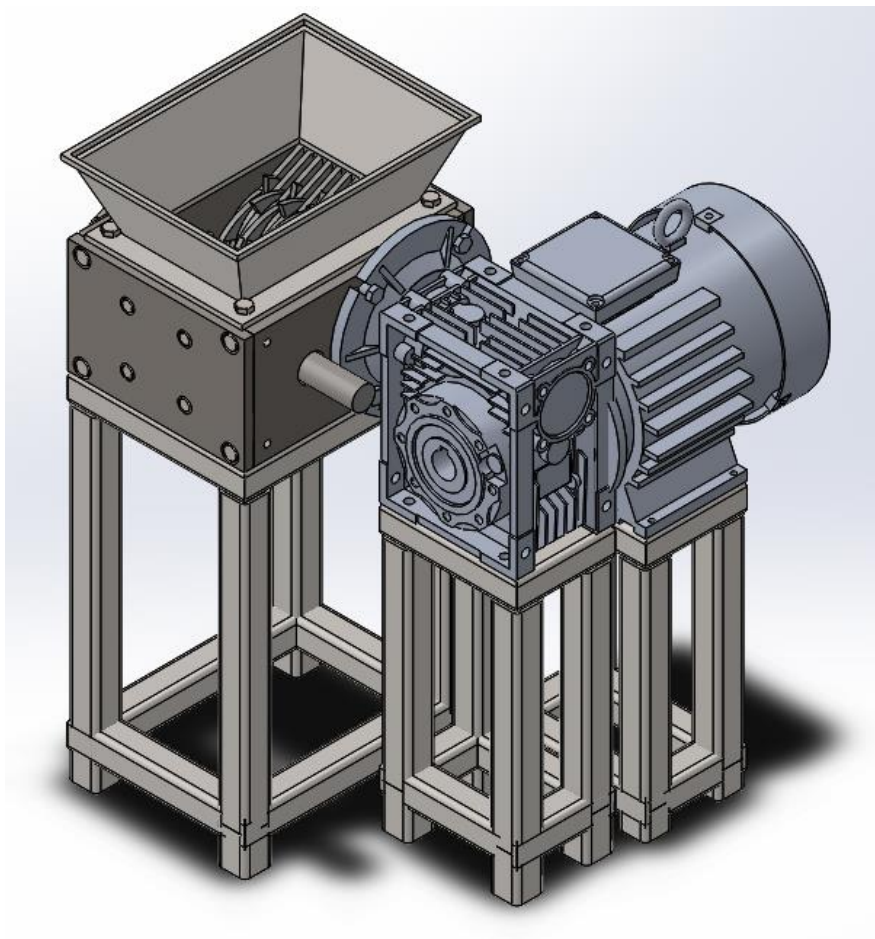


Рисунок 3.19 – Загальний вид шредера в зборі.

4. Економічне обґрунтування доцільності використання запропонованого шредера для подрібнення вторинного пластику з подальшим виготовленням з нього гранул для 3D друку.

Сучасні засоби проектування є одним з напрямків досягнення високого рівня розвитку сучасного машинобудування. У нинішній час створюються та розвиваються програми для моделювання технологічних процесів механічної обробки деталей та їх подальшого випробування.

Світовий досвід свідчить про можливість отримання значного економічного ефекту від застосування подріднювачів, завдяки застосування вторинного пластику для виготовлення нових виробів і зменшення навантаження на екологію нашої планети.

Використання шредера, запропонованого у даній дипломній роботі, дає можливість відмовитися від закупівлі готових гранул для 3d друку і застосовувати вторинну сировину пластику ABS.

Для визначення економічної ефективності використання запропонованої прикладної програми, у якості бази для порівняння приймемо описаний вище існуючий варіант проектування шредера, знаходимо економічний ефект від для підприємства виробника і споживача який буде виготовляти гранули з допомогою цього шредера..

4.1 Визначення витрат на підготовку виробництва шредера пластику

4.1.1 Витрати на проектування шредера визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot Z_{сг}^к \cdot \left(1 + \frac{\kappa_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon}, \quad (4.1)$$

де: $H_{ор}$ - кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції інструменту, шт.;

$T_{кон}$ - сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{сг.к}$ - середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

K_{∂} - додаткова заробітна плата конструктора, %;

B_c - відрахування у соціальні фонди від заробітної плати конструкторів, %;

H_{ϵ} - накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{mk} = 11 \cdot 20 \cdot 70,18 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 1 \cdot 20 \cdot 77,98 \cdot \frac{45}{100} = 27667,76 \text{ грн.}$$

4.1.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва шредера:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{tex} \cdot Z_{cz}^m \cdot \left(1 + \frac{K_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon}, \quad (4.2)$$

де: T_{tex} - сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{cz.m}$ - середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_m = 11 \cdot 21 \cdot 70,18 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) + 11 \cdot 21 \cdot 70,18 \cdot \frac{50}{100} = 29861,73 \text{ грн.}$$

4.2 Визначення витрат на виготовлення шредера

На основі встановленої трудомісткості виготовлення шредера розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$Z_{op} = \sum_{i=1}^n C_{ri} \cdot T_i, \quad (4.3)$$

де n – кількість і-тих видів робіт;

$C_{z(i)}$ - середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують і-тий вид робіт (з урахуванням умов праці), грн.

Наприклад для механічних робіт.

$$Z_{op} = 77,98 \cdot 7,8 = 11989,63 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^m Z_{opi} \cdot \frac{\Pi_{sp}}{100} \quad (4.4)$$

де: $\Pi_{\text{го}(i)}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт (цеху) за заводською калькуляцією:

Так, витрати на утримання та експлуатацію обладнання на механічних роботах:

$$B_o = 77,98 (285/100) = 1733,48 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$K_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^m Z_{\text{opi}} \cdot \frac{\Pi_{\text{цв}}}{100}, \quad (4.5)$$

де $\Pi_{\text{цв}}$ – процент цехових витрат по кожному i -му виду робіт (цеху) за заводською калькуляцією.

$$K_{\text{цех}} = 77,98 \cdot (132/100) = 802,88 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Трудовітність та окремі види витрат на виготовлення дослідного зразка комбінованої шредера

Види робіт	Трудовітність робіт ч.гол	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників Z_{op} , грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання B_o		Загально виробничі (цехові) витрати, B цех	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	0,5	3	70,18	7,02	220	15,44	150	10,53
Механічні	0,8	4	77,9795	608,24	285	1733,48	132	802,88
Термічні	1,5	3	70,18	105,27	310	326,34	182	191,59
Слюсарсько-складальні	2,0	4	77,9795	77,98	210	163,76	142	110,73
Всього	24,0	-	-	798,51	-	2239,02	-	1115,73

Виробничу собівартість виготовлення протяжки розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базових конструкцій за формулою:

$$C_{нов} = M_o + M_{\partial} + T_{\partial} - B_{зв} + П_{тех} + E_{тех} + З_{ор} + З_{др} + B_c + З_{цп} + B_o + B_{цех} + B_{ін} \quad (4.6)$$

де M_o , M_{∂} – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

Розрахунок витрат на основні матеріали зведено до табл. 4.2.

T_{∂} – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$B_{зв}$ – зворотні відходи, які реалізуються (віднімаються), грн.;

$E_{тех}$, $П_{тех}$ – енергія та паливо на технологічні цілі, грн.;

$З_{др}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

B_c – єдиний соціальний внесок, грн.;

$З_{цп}$ – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

$B_{цех}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{ін}$ – інші виробничі витрати, грн.;

Таблиця 4.2

Склад матеріальних витрат на шредер

№ з/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт., кг)	Ціна, грн.	Витрати на виріб, грн.
1	2	3	4	5	6
	Основні матеріали				
1.	ЛИСТ СТАЛЕВИЙ 5X1250X3000 СТ.65Г	кг	10,00	57,50	575,00
2.	Лист сталевий 5x1500x6000 ст. 20	кг	10,00	4,80	448,00
3.	ЛИСТ СТАЛЕВИЙ 30X2000X6000 СТ. 45	кг	12,43	9,50	594,00
	Шестигранник сталевий 30 ст45 металопрокат	шт.	3	7,50	142,50
	Всього основних матеріалів	-	-	-	1759,50

1	2	3	4	5	6
1.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби, у тому числі: а) електро- та гідрообладнання Ел. Двигун з редуктором та схема запуску 2,2 кВт	шт.	1	7200	17200
	Всього покупних	-	-	-	17200

Розрахунок собівартості зводимо до табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Повна собівартість та оптова ціна дослідного шредера

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.2	18959,50
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4 % від M_o	758,38
3.	Матеріали покупні	M_n	табл. 4.2	17200,00
4.	Транспортно-заготівельні витрати	T_s	6 % від ($M_o + M_d + M_n$)	2215,07
5.	Зворотні відходи (віднімаються)	$-B_{зв}$	5% від M_o	947,60
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{tex}, E_{tex}$	53,8 % від $З_{op}$	429,60
7.	Всього матеріальні витрати			21414,57
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{op}$	табл. 4.1	798,51
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{op}$	10 % від $З_{op}$	7,99
10.	Відрахування у соціальні фонди (єдиний соціальний внесок)	B_c	22 % від ($З_{op} + З_{op}$)	177,43

Продовження таблиця 4.3

1	2	3	4	5
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати	$З_{ин}$	8,5% від $З_{ор}$	67,87
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.1	2239,02
13.	Цехові витрати	$B_{цех}$	табл. 4.1	1115,73
14.	Загальновиробничі витрати	$B_{зав}$	141% від $З_{ор}$	1125,90
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ин}$	1,4% від $З_{ор}$	11,18
16.	Виробнича собівартість інструменту	$C_{вир}$	Σст. 6-14	23603,45
17.	Позавиробничі витрати	$B_{нв}$	2% від $C_{вир}$	2194,20
18.	Повна собівартість	$C_{нов}$	$C_{вир} + B_{нв}$	472,07
19.	Прибуток нормативний	$П_n$	20% від $C_{нов}$	24075,52
20.	Оптова ціна	$Ц_{опт.}$	$C_{нов} + П_n$	28891,00

Розрахунок витрат на випробування шредера виконуємо за формулою [11]:

$$B_{\epsilon} = \sum_{i=1}^m B_i \quad (4.7)$$

де M_o – витрати на матеріали, грн.;

B_z – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування у соціальні фонди випробувача, грн.;

B_e – витрати на силову електроенергію, грн.;

$B_{мд}$ – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

B_p – витрати на ремонт пресу, грн.;

B_n – витрати на утримання приміщення, грн.;

B_a – витрати на амортизацію пресу, грн.;

B_n – витрати на налагодження пресу, грн.;

$B_{накл}$ – накладні витрати, грн.

$$M_o = C_m \cdot (1 + K_{mp})$$

$$(4.8)$$

де C_m – вартість з врахуванням доставки, грн.;

K_{mp} – коефіцієнт, який враховує транспортно заготівельні витрати.

$$M_o = 10 \cdot (1 + 0,05) = 10,5 \text{ грн.} \quad (4.9)$$

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування у соціальні фонди інженера-випробовувача:

$$B_3 = C_r \cdot \frac{T_6}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (4.10)$$

де C_r – середньогодинна заробітна плата інженера-випробовувача, грн./год.;

T_6 – середній час випробування шредера, хв.;

K_d, K_c – відповідно коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань у соціальні фонди.

$$B_3^{6az} = 88,375 \cdot (8/60) \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 15,81 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_e = \frac{N_b \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \frac{T_b}{60} \cdot C_{el}, \quad (4.11)$$

де: N_b – встановлена потужність електродвигунів шредера, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи двигунів ($K_o = 0,6 \dots 1,0$);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю ($K_N = 0,5 \dots 0,6$);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом ($K_d = 0,6 \dots 0,7$);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів ($\eta_c = 0,86 \dots 0,9$);

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства ($\eta_m = 0,92 \dots 0,96$);

C_{el} – ціна 1 кВт-год силової електроенергії, грн.

$$B_e^{6az} = \frac{2,2 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,6}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{8}{60} \cdot 7,5 = 0,56 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мд}} = \frac{M_{\text{дм}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{в}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}}, \quad (4.12)$$

де $M_{\text{дм}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини обладнання, коп.;

$R_{\text{м}}$ – категорія складності ремонту шредера, УРО;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва.

$$B_{\text{мд}}^{\text{баз}} = \frac{88,4 \cdot 7,0 \cdot 8}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 0,41 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт шредеру:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot P_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot P_{\text{вс}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{60}, \quad (4.13)$$

де $P_{\text{вм}}$, $P_{\text{вс}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин вузла, грн./рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи шредера (при однозмінному режимі роботи для серійного виробництва)

$$B_{\text{р}}^{\text{баз}} = \frac{7 \cdot 680 + 4,5 \cdot 520}{1975} \cdot \frac{8}{60} = 0,48 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{д}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{60}, \quad (4.14)$$

де $F_{\text{о}}$ – виробнича площа, яку займає шредр, м²;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення) [11];

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1м² виробничого приміщення, грн./м².

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{7,1 \cdot 3,5 \cdot 480}{1975} \cdot \frac{8}{60} = 0,81 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію шредера:

$$B_{\text{а}} = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_{\text{а}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{в}}}{60}, \quad (4.15)$$

де $H_{\text{а}}$ – норма амортизації, %;

Фбал – балансова вартість шредера, грн., визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = \Pi_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}), \quad (4.16)$$

де $\Pi_{\text{опт}}$ – оптова ціна пресу, грн.;

$K_{\text{тр}}$, $K_{\text{м}}$, $K_{\text{ф}}$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) та влаштування фундаменту (0,02...0,08).

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 28891,00 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 34380,29 \text{ грн.}$$

$$B_a^{\text{баз}} = \frac{34380,29 \cdot 15 \cdot 8}{1975 \cdot 60 \cdot 100} = 0,35 \text{ грн.}$$

Витрати на налагодження шредера:

$$B_n = C_{\text{зн}} \cdot (1 + K_{\text{д}}) \cdot (1 + K_c) \cdot \frac{T_{\text{нал}} \cdot A}{60 \cdot N_{\text{д}}}, \quad (4.17)$$

де $C_{\text{зн}}$ – годинна тарифна ставка наладчика, грн./год.;

A – кількість налагоджень за рік;

$T_{\text{нал}}$ – час налагодження, хв.;

$N_{\text{д}}$ – річна програма випробування інструменту, шт./рік.

$$B_n = 88,375 \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) \cdot \frac{15 \cdot 12}{60 \cdot 50} = 7,12 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Витрати при роботі шредера

№ п/п	Стаття витрат	Умовне позначення	Величина
1	2	3	4
1.	Витрати на матеріали	M_o	10,5
2	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями на соціальні потреби	B_z	15,81
3.	Силовa електроенергія	B_e	0,56
4.	Допоміжні матеріали	$B_{\text{дм}}$	0,41

1	2	3	4
5.	Ремонт обладнання	B_p	0,48
6.	Утримання приміщення	B_{yn}	0,81
7.	Амортизація обладнання	B_a	0,35
8.	Налагодження обладнання	B_n	7,12
Загальна сума витрат на випробування		B_{ε}	36,04

4.3. Річний економічний ефект від застосування шредера

4.3.1 У виробника

Річний економічний ефект від продажу виготовленого шредера розраховується за формулою:[11]

$$E_{pe} = (C_{ont} - C_{nov}) \cdot P_{\varepsilon} - E_n \cdot K_{\varepsilon}, \quad (4.18)$$

де: C_{ont} –оптова ціна, грн. (таб 4.3);

C_{nov} –повна собівартість, грн; (таб 4.3);

P_{ε} –план виробництва, шт.;

E_n –нормативний коефіцієнт ефективності капітальних витрат;

K_{ε} – додаткові капітальні витрати при виготовлення шредера, грн., розраховуються за формулою

$$K_{\varepsilon} = K_{nk} + K_m \quad (4.19)$$

де K_{nk} -витрати на проектування шредера визначаємо за формулою (4.1.1)

K_m -витрати на технологічну підготовку виробництва шредера (4.1.2)

$$K_{\varepsilon} = 27667,76 + 29861,73 = 57529,49 \text{ грн.}$$

$$E_{pe} = (2889100 - 2360345) \cdot 5 - 0,16 \cdot 57529,49 = 17233,03 \text{ грн.}$$

4.4.1 У споживача

$$E_{pe} = (B_{e.zak} - B_{e.vir}) \cdot N_{\varepsilon} - E_n \cdot K_{cn}, \quad (4.20)$$

де: $B_{e.zak}$ –закупівельна вартість готових гранул пластику;

$B_{e.вир}$ – вартість виготовлення гранул пластику;

N_0 – кількість вироблених гранул за рік;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних витрат;

$K_{сн}$ – витрати на закупівлю шредера та екструдера;

$$K_{сн} = B_{шр} + B_{екс} \quad (4.21)$$

де: $B_{шр}$ – закупівельна вартість шредера;

$B_{екс}$ – закупівельна вартість екструдера;

$$K_{сн} = 2889100 + 17600 = 46491,00 \text{ грн.}$$

$$E_{рв} = (46,4 - 36,04) \cdot 1000 - 0,16 \cdot 46491 = 2921,44 \text{ грн.}$$

ВИСНОВКИ

В даній роботі було проаналізовано сучасний стан технології вторинної переробки відходів пластику шляхом його подрібнення та подальшої переплавлення в гранули або готові вироби;

На основі отриманих даних запропонована методика вибору основних вузлів механічного шредера з приводом від електродвигуна, матеріалів та геометрії різальних ножів, а також розрахунки основних режимів роботи. Розроблені 3D моделі основних компонентів камери подрібнення та розглянуті різні варіанти їх компоновки для забезпечення якісного подрібнення пластику ABS. Наведені рекомендації щодо обслуговування основних робочих органів шредерів під час їх експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Інжиніринг пакування та пакувального обладнання» спеціальності 131 «Прикладна механіка» та «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / І. О. Мікульонок. 2-ге вид., переробл. та доповн. ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,21 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 292 с. – Бібліогр.: с. 287–288.
2. Утилізація упакувань: Практикум з навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів, які навчаються за програмою підготовки магістрів з галузі знань 13 – Механічна інженерія; за спеціальністю 131 «Прикладна механіка», спеціалізація – «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Т.Б. Шилович, Сімончук Є.П. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,16 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 36 с.
3. Вибір матеріалів для лез промислових подрібнювачів. URL: <https://maxtormetal.com/choose-industrial-shredder-blade-material-extend-lifespan-maintenance-tips-tungsten-carbide-tool-steel-carbon-stainless/> (дата звернення 31.10.2024)
4. Інноваційні стратегії подовження строку служби лез промислових подрібнювачів. URL: <https://maxtormetal.com/extend-lifespan-industrial-shredder-blades-maintenance-material-selection-protection-coatings/> (дата звернення 31.10.2024)

5. Всебічний аналіз подрібнювачів з двома валами. URL: <https://maxtormetal.com/dual-shaft-shredders-blades-teeth-knife/> (дата звернення 31.10.2024)

6. Shredder machine - Paper , Plastic , Metal, Agricultural waste Shredder | Mechanical. URL: Project <https://www.youtube.com/watch?v=s7B4rzf8Xrc> (дата звернення 31.10.2024)

7. МЕТИНВЕСТ. Продукція із сталі 65Г. URL: <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/65g> (дата звернення 31.10.2024)

8. Переробка відходів пластику <https://plast-lom.com.ua/pererobka-vidhodiv-plastiku/>

9. Shredder machine - Paper , Plastic , Metal, Agricultural waste Shredder | Mechanical. URL: Project <https://www.youtube.com/watch?v=s7B4rzf8Xrc> (дата звернення 31.10.2024)

10. Маркування пластику для харчових продуктів URL: <https://alyans-km.com.ua/markirovka-plastika-dlya-pischevyh-produktov> (дата звернення 31.10.2024)

11. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів: метод. Вказівки для виконання економічної частини дипломних проектів для студ. спец. 131 «Прикладна механіка» та 133 «Галузеве машинобудування» //Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 40 с.

12. International Journal of Scientific and Research Publications: article

«Cutter blade design for Shredder Machine» / URL:

<http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.10.06.2020.p102124> (дата звернення

31.11.2024)