

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії транспорту та архітектури
Кафедра технології машинобудування

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобутти ступеня вищої освіти магістра
Проектування екструзійної машини для гранулювання ПВХ
Назва теми
матеріалів з вторинної сировини

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 13 механічна інженерія
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 131 прикладна механіка
Шифр і назва спеціальності
Назва

Освітня програма «технології машинобудування»
Назва

Шифр ДРМ.ФІТА.ІМ.23.25.ПЗ

Виконав студент 2 курсу група ІМТМ-22-1
Шифр


Підпис

Андрій СЛОБОДЯН
Ім'я, прізвище

Керівник канд. техн. наук.
Науковий ступінь, звання


Підпис

Сава КОСТЮК
Ім'я, прізвище

Нормоконтролер канд. техн. наук.
доцент


Підпис

Сергій БИСЬ
Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри
технології машинобудування
Назва

Дата « 27 » 12 2023


Підпис

Віталій ТКАЧУК
Ім'я, прізвище

Завідувачу кафедри

Віталіно Ткачуку

здобувача вищої освіти (студента
ПІБ, факультет, «курс», «група»)

Свободана Андрій

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на академічний плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та/або Anti-Plagiarism) і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

25.12.2023р

дата

Свободана

підпис

ВІСНОВІК ЕКСПЕРТНОЇ КОМПІЇ КАФЕДРИ ТЕХНОЛОГІЙ МАШИНОБУДУВАННЯ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуючи ознайомлення з результатом звіту (звіт на відповідність) щодо роботи, проведеною програмно-технічним засобом (також перевірені тексти на плагіат):
Назва кваліфікаційної роботи: Проектування екструзійної машини для гранулювання ПНД матеріалів із вторинної сировини

Автор: Слободан Андрій Сергійович

Оквентна програма: технології машинобудування

Спеціальність: 131 Промислова механіка

Науковий керівник: Костюк С.А., к.т.н.

Після аналізу звіту відповідності зроблено наступні висновки:

| № | Висновок | Підписав звіт експерт |
|---|---|-----------------------|
| 1 | Значимістю, повністю в роботі, є значимими і не є плагиатом (але не означає) підстави власними матеріалами до прикладів, якщо потрібно. Робота прийнята для захисту. | ✓ |
| 2 | Виважено значимістю не є плагиатом, розуміючи в розділах, що не означає безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат переважно об'єм, авторський дослідження мають роботу і так не означає детально, за допомогою підставлено матеріалом до прикладів. Робота прийнята для захисту, але має бути вдосконалена. | |
| 3 | Виважено значимістю не є плагиатом, але частково розуміючи в розділах, що означає безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат переважно об'єм, авторський дослідження мають роботу. Робота може бути допущена до захисту після того як буде вдосконалена із допоміжними і додатковими зображеннями, зображеннями на відповідній кількості. | |
| 4 | Робота містить значимістю підставлено матеріалом, передбачено сировини і роботи значимістю або інші зображення дослідження плагиату. Робота містить, фактично або фальсифіковані дані. Робота не допускається до захисту. | |
| 5 | Інше | |

Підтвердження:


User name: Кафедра ТМ Check ID: 1016034621 Check date: 25.12.2023 12:30:43 EET Check type: Doc vs Internet + Library Report date: 25.12.2023 12:35:10 EET User ID: 100005638 File name: МКР Слободан Андрій Сергійович Page count: 100 Word count: 16854 Character count: 122920 File size: 6.14 MB File ID: 1015726513

Anti-Plagiarism v-15.257 The maximum coincidence with one document 4.0%

ID: 124557 Title: МКР Проектування екструзійної машини для гранулювання ПНД матеріалів із вторинної сировини Added in a DB: 2023-12-25 Authors: Слободан Андрій Сергійович Name: Костюк С.А., к.т.н. Date:

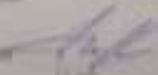
«25» грудня 2023

Завідуючий кафедрою



Віктор ТКАЧУК

Гарант освітньої програми



Віктор ТКАЧУК

Керівник кваліфікаційної роботи



Світлана КОСТЮК

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ

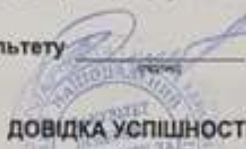
Направляється студент Слободян Андрій Сергійович на захист дипломного проєкту (роботи)

за спеціальністю 131 - Прикладна механіка

На тему: Проектування екструзійної машини для гранулювання ПВХ матеріалів із вторинної сировини

Дипломний проєкт (робота), рецензія і довідка про перевірку на плагіат додаються.

Декан факультету



ВІКТОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ
(підпис)

ДОВІДКА УСПІШНОСТІ

Слободян А. С. за період навчання на факультеті інженерії, транспорту та архітектури з 2022 по 2022 рік повністю виконав навчальний план спеціальності з таким розподілом оцінок за національною шкалою: відмінно 0,00 %, добре 50,00 %, задовільно 50,00 %, шкалою ЄКТС: А 0,00 %, В 9,09 %, С 54,55 %, D 0,00 %, E 36,36 %.

Методист факультету

[Signature]
(підпис)

ВИСНОВОК КЕРІВНИКА ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ (РОБОТИ) ТА ОБГРУНТУВАННЯ ОЦІНКИ

Студент Слободян А.С. виконав дипломну роботу у відповідності до завдання. Під час виконання роботи проявив ініціативність та високий рівень знань у вирішенні інженерних завдань з використанням комп'ютерних технологій. Робота має чітку й логічну структуру та відповідає вимогам щодо оформлення публікацій та графічних матеріалів.

Оцінка дипломного проєкту (роботи): Дипломна робота заслуговує на оцінку "Відмінно"

Керівник дипломного проєкту

[Signature]
(підпис)

Світлана Костюк
(підпис)

25 грудня 2023 р.

ВИСНОВОК КАФЕДРИ ПРО ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ)

Дипломний проєкт (роботу) розглянуто. Студент Слободян А. С. допускається до захисту цього проєкту (роботи) в екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри

Тетяна Миколаївна
(підпис)

[Signature]
(підпис)

27 грудня 2023 р.

Міністерство освіти і науки України
Хмельницький національний університет

РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну роботу Андрія СЛОБОДЯНА

Тема роботи: «Проектування екструзійної машини для гранулювання ПВХ матеріалів з вторинної сировини»

Актуальність дослідження пов'язана з тенденцією розвитку полімерної промисловості, чим обумовлена потреба у вирішенні задачі вторинної переробки полімерів та розроблення технологічного забезпечення процесу, які б забезпечували високі експлуатаційні характеристики виробів після переробки.

У Розділі 1 своєї роботи Андрій Слободян провів детальний аналіз науково-технічної інформації за напрямком досліджень. У Розділі 2 наведено методичку теоретичних та експериментальних досліджень. Розроблено фізичну та математичну моделі поведінки матеріалу в робочій камері з урахуванням перетікання розплаву. Розділ 3 присвячено дослідженням конструктивно-технологічних параметрів екструзійної машини для вторинної переробки ПВХ. Проведено розрахунки основних параметрів машини. Дослідження експлуатаційних властивостей корпусу екструдера за допомогою комп'ютерного моделювання дозволили встановити коефіцієнт запасу міцності, $K=5$ чим підтверджується працездатність конструкції. У конструкторському розділі 4, запропоновано екструзійну машину для вторинної переробки ПВХ, а також чер'як екструзійної машини з диспергуючими елементами спеціальної конструкції, що підтверджує оригінальність отриманих результатів досліджень.

У п'ятому розділі розроблено технологію виготовлення деталі «Чер'як екструдера» з використанням верстатів з ЧПК. Проведено аналіз технологічності конструкції деталі. Визначені припуски та режими різання з використанням сучасних програм аналітичним і табличним методами. Всі

прийняті заходи технологічного розділу підкріплені відповідними розрахунками.

Робота має чітку й логічну будову. Достовірність отриманих результатів не викликає сумніву, оскільки дослідження базувалися на науково-обґрунтованих методиках із застосуванням сучасних комп'ютерного забезпечення, методів дослідження і вимірювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в підвищенні довговічності і якості полімерних виробів з вторинної ПВХ сировини за рахунок покращеного змішування і розтирання агломерату з наступною дегазацією при формуванні якісного розливу.

До недоліків варто віднести наявність поодиноких друкарських огрехів у роботі, що не знижують загальної цінності дослідження.

Магістерська робота Андрія Слободяна є цілком зрілим, самостійним і оригінальним дослідженням. Роботу структуровано у відповідності до мети та поставлених завдань. Пояснювальна записка та графічна частина виконані у відповідності до вимог ЕСКД та ДСТУ. Додатки і виконаний здобувачем кількісний аналіз наочно підтверджують ґрунтовність результатів дослідження.

Беручи до уваги усе вищевикладене, вважаю, що магістерська робота Слободяна Андрія Сергійовича виконана на високому рівні, відповідає вимогам щодо оформлення робіт такого типу, може бути представлена на захист до Екзаменаційної комісії та заслуговує високої оцінки.

Рецензент:  к.т.н., доцент Олег БАБАК

« 25 » « грудня » 2023 р.

АНОТАЦІЯ

Тема роботи: «Проектування екструзійної машини для гранулювання ПВХ матеріалів з вторинної сировини».

Актуальність роботи. В наш час провідне місце займає полімерна промисловість. Вироби з пластмас набули широкого застосування в сучасній техніці та побуті. Але незважаючи на всі переваги полімерів, перед світовою спільнотою постала проблема №1 – це боротьба з відходами (налагодження вторинної переробки сировини в тому числі полімерів). Нажаль вторинна переробка полімерних відходів має свої закономірності та проблеми, це пов'язано з індивідуальними властивостями полімерів. Будова полімера та спосіб його використання для виготовлення конкретних виробів диктує тип переробки. Тому процес сортування та очищення від бруду і домішок, а також аналіз старіння полімеру є важливими завданнями при підготовці відходів до вторинної переробки. Також при вторинній переробці майже для кожного типу полімера проектується персональні робочі органи екструзійної машини для формування розплаву з заданими параметрами, щоб забезпечити якість і необхідні експлуатаційні властивості виробу.

Незважаючи на постійний розвиток науки і техніки задача вторинної переробки полімерів та розроблення технологічного забезпечення процесу, які б забезпечували високі експлуатаційні характеристики виробів після переробки є актуальним завданням.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення конструкції машини для вторинної переробки ПВХ матеріалів.

На основі аналізу науково-технічної літератури, обґрунтована необхідність удосконалення конструкції черв'яка екструзійної машини. Сформульовані шляхи підвищення якості розплаву ПВХ відходів. З врахуванням існуючого досвіду і результатів проведених досліджень розроблено конструкцію екструзійної машини для вторинної переробки ПВХ відходів. Розроблено пристрій для затискання заготовки при фрезеруванні торців в процесі виготовлення черв'яка. Для контролю параметрів черв'яка спроектовано контрольно-вимірювальний пристрій.

Результати проведеної роботи планується узагальнити і використати для виготовлення робочих органів екструдерів при переробці різних типів полімерів з забезпеченням високих експлуатаційних властивостей виробів.

Ключові слова: екструдер, робочі органи, черв'як, вторинна переробка ПВХ, екструзія, екструзійна машина, змішування, пластифікація, дегазація, гомогенізація, диспергування, зона дозування, зона завантаження, полімери, шнек, формуюча головка.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 8 |
| 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 11 |
| 1.1 Основні відомості про полімери | 11 |
| 1.2 Аналіз типових конструкцій екструзійних машин та принципу їх роботи | 13 |
| 1.3 Огляд конструкцій екструзійної пари «Шнек-циліндр» | 18 |
| 1.4 Матеріали деталей робочих органів екструзійної машини | 22 |
| Висновки до першого розділу | 25 |
| 2 МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ | 26 |
| 2.1 Теоретичні дослідження технологічних властивостей полівінілхлориду і його співполімерів | 26 |
| 2.2 Теоретичні дослідження процесу просування розплаву по гвинтових каналах шнека | 31 |
| 2.3 Методика моделювання процесу диспергуючого змішування | 37 |
| 2.4 Моделювання умов навантаження корпусу екструдера з використанням програмного комплексу Abaqus | 40 |
| Висновки до другого розділу | 42 |
| 3 ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРУЗІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ВТОРИННОЇ ПЕРЕРОБКИ ПВХ | 43 |
| 3.1 Основні параметри проектування черв'яків екструзійних машин | 43 |
| 3.1.1 Параметричний розрахунок черв'ячного екструдера | 45 |
| 3.1.2 Визначення продуктивності черв'ячного екструдера | 46 |
| 3.1.3 Розрахунок потужності приводу | 49 |
| 3.1.4. Розрахунок тиску, який розвиває «Черв'як екструдера » | 52 |
| 3.1.5. Розрахунок черв'яка на стійкість та міцність | 53 |
| 3.1.6 Тепловий розрахунок | 55 |
| 3.2 Проектування корпусу екструзійної машини | 58 |

| | |
|---|----|
| 3.3 Дослідження експлуатаційних властивостей корпусу екструдера в середовищі програмного комплексу ABAQUS | 64 |
| Висновки до третього розділу | 67 |
| 4. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ | 68 |
| 4.1 Екструзійна машина для вторинної переробки ПВХ | 68 |
| 4.2 Проектування шнека екструдера | 69 |
| 4.3 Проектування верстатного пристрою | 71 |
| 4.3.1 Вибір схеми базування та настановчих елементів | 71 |
| 4.3.2. Розрахунок пристрою на точність | 72 |
| 4.3.3. Розрахунок сили затиску пристрою | 73 |
| 4.3.4 Розрахунок елементів пристрою на міцність | 77 |
| 4.4 Проектування контрольно-вимірювального пристрою | 77 |
| 4.4.1 Вибір схеми вимірювання | 77 |
| 4.4.2 Розрахунок пристрою на точність | 78 |
| 4.5 Особливості конструювання екструзійних головок | 79 |
| 5 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ | 83 |
| 5.1 Аналіз та оцінка технологічності конструкції деталі «Черв'як екструдера» | 83 |
| 5.1.1 Кількісна оцінка технологічності конструкції | 84 |
| 5.2. Аналіз типу виробництва та існуючого технологічного процесу | 85 |
| 5.3 Вибір заготовки та обґрунтування способу її отримання | 87 |
| 5.3.1 Техніко-економічний розрахунок собівартості заготовки отриманої із прокату | 87 |
| 5.4 Вибір технологічних баз | 89 |
| 5.5 Вибір варіанта технологічного маршруту | 91 |
| Висновки до п'ятого розділу | 93 |
| 6. ОХОРОНА ПРАЦІ | 94 |
| 6.1 Характеристика виробничих небезпек при роботі з ексирюзійним обладнанням | 94 |
| 6.1.1 Повітря робочої зони | 95 |
| 6.1.2 Виробничий шум та вібрація | 95 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 6.1.3 Електробезпека | 96 |
| 6.1.4 Вплив високих температур | 97 |
| 6.1.5 Пожежна безпека | 98 |
| 6.1.6 Промислове освітлення | 99 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 100 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 101 |
| ДОДАТКИ | 104 |
| ДОДАТОК А | 105 |
| ДОДАТОК Б | 106 |
| ДОДАТОК В | 140 |

ВСТУП

Актуальність теми. За статистичними даними дослідницької організації IMD World Competitiveness Center світова галузь переробки полімерів демонструє стійке зростання, а попит на вироби з пластмас сягає понад 68%. Сучасна промисловість полімерів – це поєднання передових технологій та інновацій, вимоги до якої зростають з кожним роком. Вироби з полімерів повинні бути якісними, міцними, комфортним та безпечними для здоров'я та життя людей. В наш час поліетилену виробляють більше ніж заліза, чавуну, міді, бронзи разом взятих (за об'ємом). Але незважаючи на всі переваги полімерів існує важлива проблема – це відходи виробництва, яких з кожним роком накопичується все більше і більше.

Закономірність лінійна – чим більше полімерів тим більше відходів. В зв'язку з цим виникає дві основні проблеми – економічна та екологічна.

З точки зору економіки потрібно знову використати відходи в якості сировини. Але не завжди вдається отримати якісну продукцію при переробці полімерів. Нажаль і в наш час багато відходів спалюють з метою отримання енергії або утилізують на сміттєзвалищах. Дим що утворюється при спалюванні пластмас дуже шкідливий для здоров'я людей, а захороненні в землі відходи будуть забруднювати навколишнє середовище так як розкладуться можливо через сто років. Тому спалювати та захоронювати відходи полімерів шкідливо та економічно недоцільно.

Таким чином охорона навколишнього середовища (боротьба з відходами, налагодження вторинної переробки сировини в тому числі полімерів) стала задачею номер один у світі.

Якщо ж згадати, що нафта – це основна сировина для виробництва полімерів, а ціна на неї зростає з кожним днем то сам собою випливає висновок – сировину потрібно економити, тобто потрібно налагоджувати вторинну переробку полімерів. Як показує досвід та попередній огляд літературних джерел, процес переробки полімерів супроводжується низкою проблем.

Головна проблема – це сортування полімерних відходів, тобто підготовка до вторинної переробки (суміш полімерів з домішками води, масел, бруду понижує механічні властивості виробу).

Також важлива проблема – це старіння полімеру (окислення, деструкція). Важливо знати на скільки постарів полімер і який його відсоток можна додати до свіжого полімеру.

Технологія виступає ключовим фактором, який визначає можливості отримання економії від масштабів виробництва, впровадження нових процесів та методів переробки, і в результаті підвищує конкурентні позиції підприємств.

Незважаючи на постійний розвиток науки і техніки задача вторинної переробки полімерів та розроблення технологічного забезпечення процесу, які б забезпечували високі експлуатаційні характеристики виробів після переробки є актуальним завданням [1,2, 3].

Мета та завдання роботи. Метою роботи є розроблення конструкції машини для вторинної переробки ПВХ матеріалів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Провести аналітичний огляд науково-технічної літератури з питань вторинної переробки ПВХ відходів. Розглянути конструкції установок та відомі технології виготовлення робочих органів екструзійних машин..

2. Розробити методику теоретичних та експериментальних досліджень параметрів робочих органів екструзійної машини.

3. Визначити основні параметри черв'яка екструзійної машини.

4. На основі проведених досліджень та комп'ютерного моделювання запропонувати конструкцію та розробити технологію виготовлення черв'яка екструзійної машини.

5. Обґрунтувати вибір конструктивно-технологічних параметрів для проектування екструзійної машини. Запропонувати конструкцію та технологічне устаткування для переробки ПВХ.

Об'єктом дослідження є процес вторинної екструзійної переробки ПВХ відходів.

Предметом дослідження виступають технологічні параметри робочих органів екструзійної машини для забезпечення процесу вторинної переробки ПВХ відходів.

Методи дослідження. В роботі використано методи аналізу з застосуванням прикладного програмного забезпечення MathCAD 13, MS Excel 2007. Методи комп'ютерного моделювання з використанням програмного інтерфейсу SOLIDWORKS та ABAQUS. Експериментальні дослідження технологічних параметрів процесу екструзійної переробки ПВХ відходів.

Наукова новизна одержаних результатів

1. *Вперше* теоретично обґрунтуванні параметри робочих органів екструзійної машини чим забезпечуються оптимальні параметри процесу вторинної переробки ПВХ, що дозволяє підвищити продуктивність, енергоефективність обладнання та якість виробів.

2. *Вперше* побудовано фізичну та математичну моделі поведінки екструдованого матеріалу в робочій камері з урахуванням процесів перетікання розплаву, які включають аналітичні залежності зв'язку конструктивно-технологічних та вихідних параметрів устаткування, що дозволило розробити інженерну методика проектування робочого органу екструзійного обладнання для вторинної переробки ПВХ матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в підвищенні довговічності і якості полімерних виробів з вторинної ПВХ сировини за рахунок покращеного змішування і розтирання агломерату вторинної сировини з наступною дегазацією при формуванні якісного розплаву.

Експериментальні дослідження, обробка та аналіз одержаних результатів виконано особисто автором. Обговорення отриманих результатів і висновків проведені разом з керівником.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Основні відомості про полімери

На сьогоднішній день не існує виробництва, де не використовуються полімери або полімеромісткі матеріали. Полімери та матеріали із їх застосуванням мають низку унікальних властивостей, які забезпечують ефективні експлуатаційні характеристики виробів та їх рентабельність у виробництві.

До переваг полімерних матеріалів можна віднести:

- висока технологічність;
- низька енергоємність (температури переробки не перевищує 150–250 °С);
- можливість виготовлення за один цикл відразу декількох виробів складної конфігурації, а при безперервному виробництві виробів (рулонних, плівкових, погонних) збільшити швидкість виробництва;
- майже всі процеси переробки полімерів автоматизовані, що дозволяє знизити собівартість продукції, підвищити її якість та конкурентоспроможність на ринку.

Полімерні матеріали поширюються у різних галузях промисловості та побуті, так як їхні особливі експлуатаційні властивості та ефективні методи переробки у готові вироби, із запасів сировини або сортованих полімерів дають можливість одержання композиційних матеріалів на базі полімерів або їх сумішей.

Полімери поділяють на низькомолекулярні (молекулярна маса не більше 5000), і високомолекулярні (понад 5000). До високомолекулярних належать природні органічні високомолекулярні сполуки – білки й полісахариди (крохмаль, целюлоза) – основа живої природи.

Речовини, молекули яких складаються із багатьох елементарних ланок однакової структури, називаються полімерами.

За походженням та способом отримання полімери поділяють на природні, штучні та синтетичні. Природні полімери – це речовини одержані із природних

матеріалів. Штучні – сполуки, отримані хімічною модифікацією полімерів природного походження. Синтетичні полімери синтезуються із мономерів (низькомолекулярних сполук).

Мономери мають кратні (подвійні або потрійні) зв'язки або функціональні групи ($-\text{CH}_2\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{COOH}$) та можуть взаємодіяти з двома або більше молекулами мономерів. В результаті проходження хімічних реакцій утворюється макромолекула полімеру.

Властивості високомолекулярних сполук (полімерів) залежать від хімічного складу макромолекул, їхньої молекулярної маси, структури і взаємного розміщення складових макромолекули та їх сукупності (наприклад, чим довший ланцюг макромолекули, тим за інших однакових умов вища механічна міцність полімеру) [1].

До основних фізичних параметрів полімерів належать: міцність, теплопровідність, дилатометричні характеристики, характеристичні температури.

Молекулярна маса полімеру впливає на реологічні показники його розплаву. Вона залежить від методів отримання полімеру, тобто від обладнання та технології синтезу.

Молекулярно-масовий розподіл (ММР) характеризує неоднорідність полімеру, за молекулярною масою складових його макромолекул, і залежить від технології виробництва.

В залежності від організації макромолекул, полімери отримують структуру лінійну, розгалужену або сітчасту. Структура визначає домінуючі особливості полімерів, такі як: термопластичність і термореактивність.

Термопластичні полімери (термопласти) здатні при нагріванні переходити з твердого в в'язкоеластичний або в'язкотекучий стан, а при охолодженні в твердий. При нагрівання термопластів до температури плавлення фізичні зв'язки зникають, а хімічні (ковалентні) зберігаються, тому хімічна будова полімеру незмінна. При охолодженні і твердінні розплаву фізичні зв'язки й властивості термопластичної полімерної речовини відновлюються. Тому з'являється можливість формувати вироби з розплаву з

наступним охолодженням, а також багаторазово перобляти. Вторинна переробка зробить виробництво безвідходним та економічно-доцільним.

Термореактивні полімери (реактопласти) мають хімічну структуру (сітчасту) необоротну і необмежене нагрівання призводить до руйнування просторової сітки (термодеструкції). Тому реактопласти переробляються одноразово у виробі, які формуються в результаті хімічної реакції отвердіння і їх відходи виробництва практично не перобляються.

Також серед полімерів вирізняють еластомери вони за звичайної температури мають еластичні властивості тобто здатні до оборотних деформацій розтягу (каучк, гума)

Окремо вирізняють термоеластоласти- полімери які переплавляються як термопласти, а за нормальної температури мають властивості еластомерів (гум). До термоеластоластів відносять пластифікований ПВХ, співполімери бутадієну з стиролом та деякі поліуретани.

Співполімерізація мономерів цілеспрямовано змінює властивості і формує потрібні характеристики одержуваних полімерів .

1.2 Аналіз типових конструкцій екструзійних машин та принципу їх роботи

Для екструзійної переробки пластмас в промисловості використовують червячні, дискові та комбіновані екструдери (рисунок 1.1 – 1.3). Широкого застосування набули червячні екструдери. В залежності від продуктивності та технології переробки (режими роботи, термодинаміка процесу переробки) робочі органи екструдерів постійно модернізують. Тому існує велика гама модифікацій робочих органів , які різняться кількістю робочих органів, відношенням геометричних параметрів, формою канавок, кроком червяка і т. д.

Червячні екструдери можуть бути одночервячними, двочервячними та багаточервячними. Але в промисловості при переробці пластмас перевагу надають одночервячним циліндричним з постійним кроком і змінною глибиною каналу.

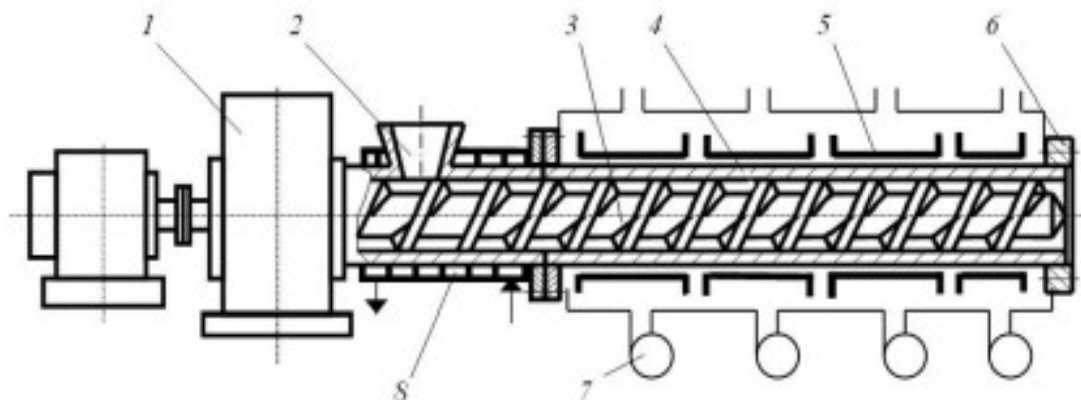


Рисунок 1.1 – Принципова схема одночерв'ячного екструдера
 1– редуктор, 2– бункер, 3– черв'як, 4– циліндр, 5– термоелементи, 6 – екструзійна головка (фільєра), 7– вентилятор, 8– водяні канали

Дискові (безчервячні) екструдери інколи успішно використовують при переробці полімерів та їх композицій коли потрібно забезпечити гарне перемішування сировини і не потрібно високого тиску для формування.

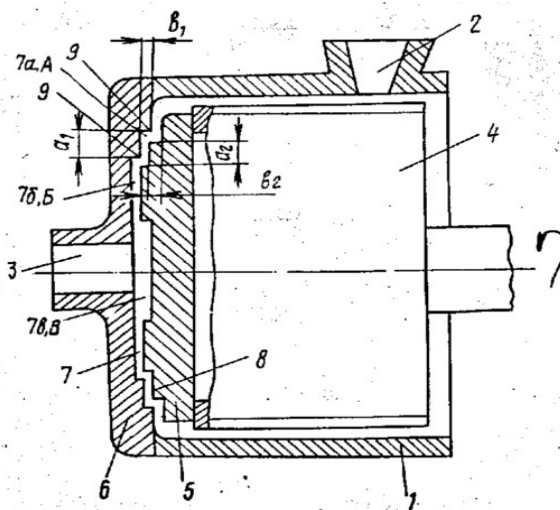


Рисунок 1.2 – Принципова схема дискового екструдера
 1– корпус, 2– вхідний отвір, 3– вихідний отвір, 4– транспортний черв'як,
 5–приводний диск, 6– нерухомий диск, 7– робочий зазор, 8– кільцеподібні
 уступи, 9– кільцеві уступи нерухомого диску

Комбіновані екструдери (черв'ячно-дискові) використовують для покращеного перемішування сировини і забезпечення низької в'язкості і високої еластичності розплаву перероблюваного матеріалу. Також на практиці використовують каскадні схеми екструзії коли в тандемі працює два або три

екструдера з індивідуальними приводами, що дає можливість розбити процес екструзії на етапи та керувати кожним окремо.

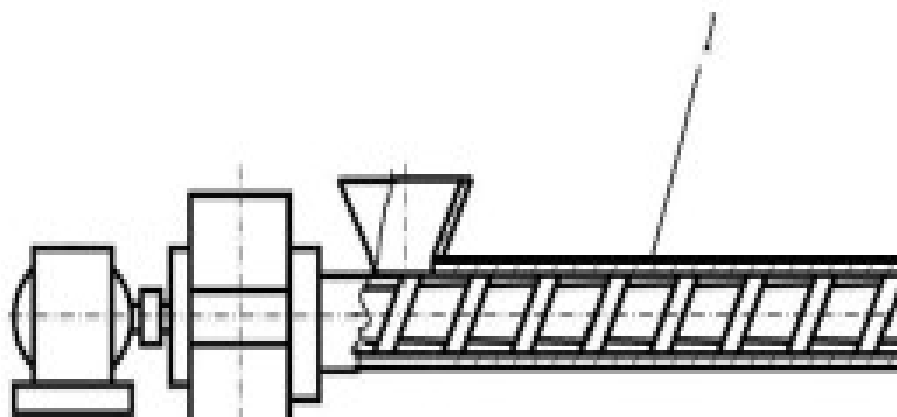


Рисунок 1.3 – Схема комбінованого екструдера

1 – черв'ячна частина; 2 – дискова частина

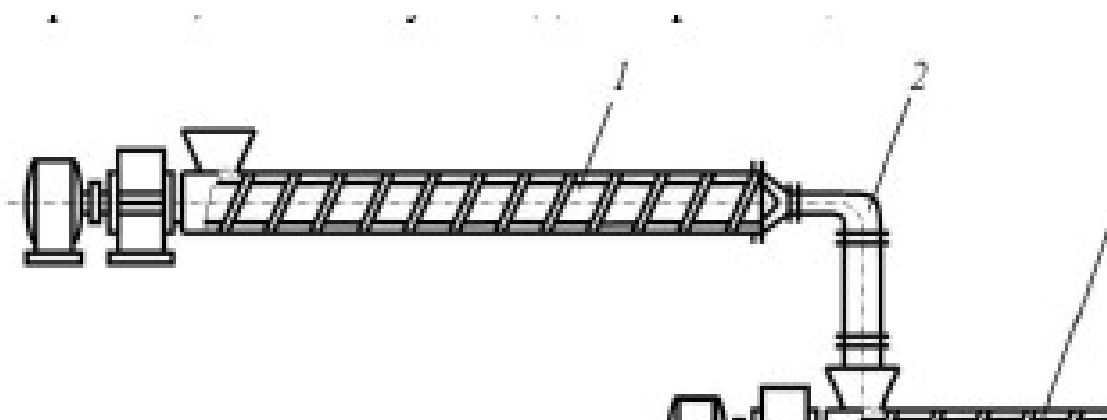


Рисунок 1.4 – Каскадна схема екструзії

1 – перша гілка каскаду; 2 – розплавопровід; 3 – друга гілка каскаду

Як правило для промислової переробки полімерів використовується виробничі лінії. Близько 70% термопластів переробляються в виробі в такий спосіб. Методом екструзії отримують труби, шланги, капіляри, прутки, листи, плівки, різноманітні профілі, наносять полімерну ізоляцію на дроти і кабелі, а також виконують вторинну переробку полімерів з гранулюванням

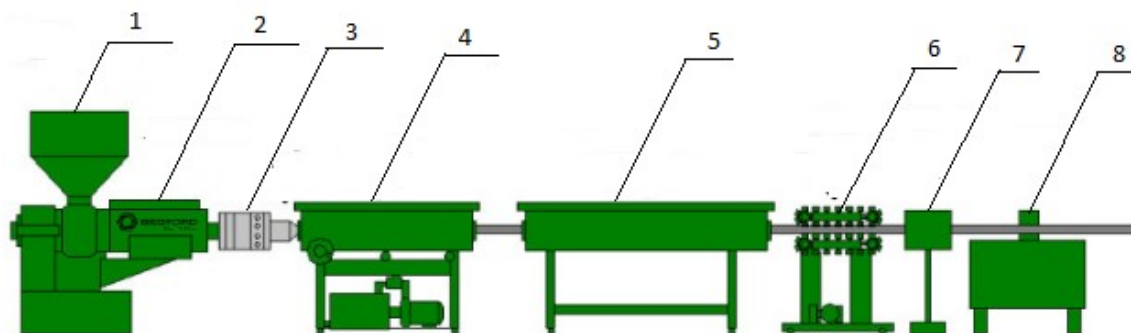


Рисунок 1.5 – Схема автоматизованої лінії по переробці полімерів
 1– Завантажувальний пристрій, 2 – екструдер, 3 – головка екструдера, 4 – герметично охолоджуюча ванна, 5 – ванна з повітряно-крапельним охолодженням, 6– ультразвуковий контрольний пристрій, 7 – лазерний контроль, 8 – протяжний механізм

Основним обладнанням екструзійного процесу є черв'ячний екструдер (рисунок 1.6).

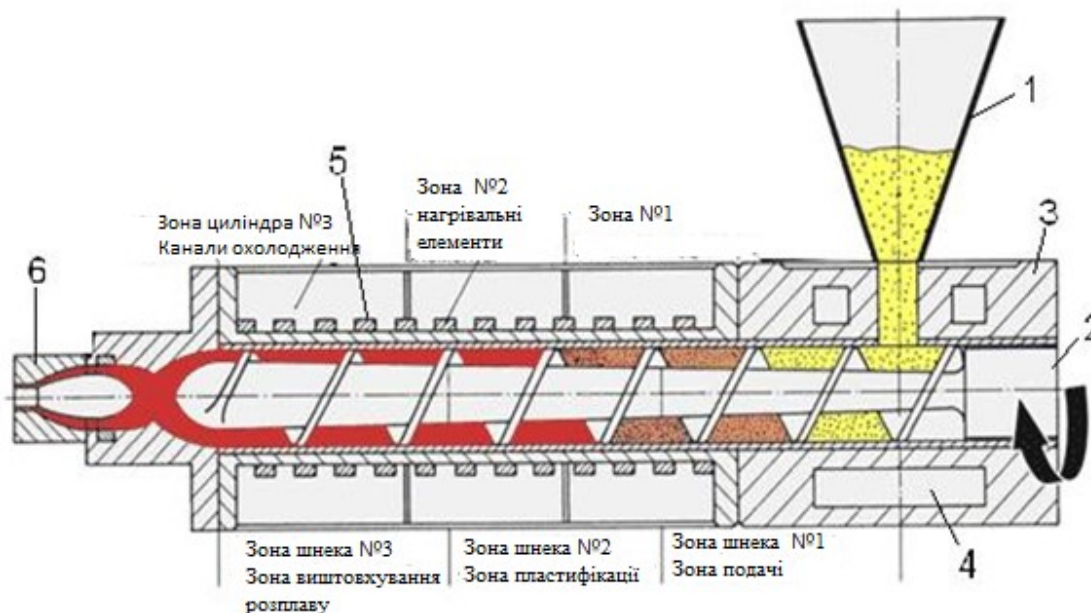


Рисунок 1.6 –Схема черв'ячного екструдера
 1– бункер, 2– черв'як, 3– циліндр, 4– водяні канали, 5– нагрівач, 6– формуюча головка з адаптером

В завантажувальний бункер 1 сировина надходить у вигляді гранул або порошку при температурі навколишнього середовища. Сучасні екструдери

обладнані устаткуванням для підігріву (до 110 градусів) та підсушування сировини, чим забезпечується стабільність процесу екструзії та якість виробу. Через завантажувальну лійку гранули полімеру потрапляють у зону №1 (подачі шнека) і перемішуючись транспортуються черв'яком 2 вздовж стінок циліндра 3. Далі матеріал потрапляє в зону №2 (пластифікації), зону №3 (дозування розплаву). Готовий розплав потрапляє в канали формуючої головки 6 і видавлюється під певним тиском через профільний отвір (фільєру).

Поділ шнека умовний так як залежить від багатьох факторів технологічного процесу і від природи перероблюваного полімера, що в свою чергу регламентує температурно швидкісний режим процесу та тиск. Циліндр як правило оснащений зонами обігріву 5 та зонами охолодження 4 чим забезпечується необхідний температурний режим процесу.

До основних технологічних параметрів одношнекового екструдера відносяться: швидкість обертання шнека n , відношення довжини до діаметра L/D , геометричний профіль шнека (рисунок 1.7), степінь стиску (компресія) – відношення об'єму одного витка черв'яка в зоні загрузки до об'єму витка в зоні дозування.



Рисунок 1.7 – Схема конструкції черв'яка

Короткі черв'яки мають відношення $L/D = 12-18$, довгі $L/D > 30$.

Найбільш розповсюдженні екструдери мають відношення $L/D = 20-25$. Також важливим показником екструдера є його ефективність-відношення продуктивності до споживаної потужності.

1.3 Огляд конструкцій екструзійної пари «Шнек-циліндр»

Екструзійне обладнання класифікують за призначенням, за типом робочих органів ,їх кількістю та геометрією, за конструктивними ознаками (рисунок 1.8) тощо.

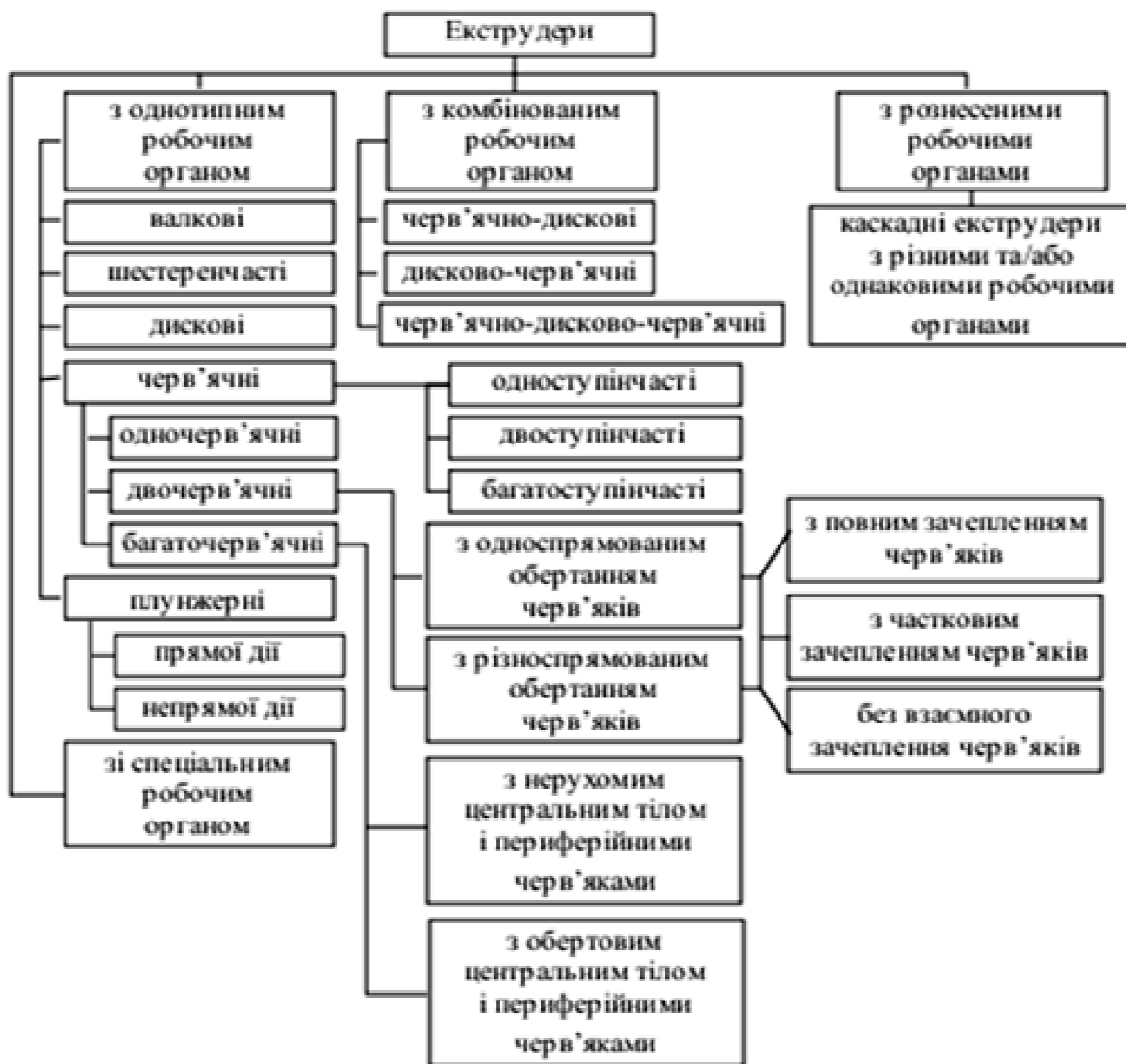


Рисунок 1.8– Схема класифікації екструдерів за конструктивними ознаками

До основних робочих органів черв'ячних екструдерів відносять циліндр в якому обертається черв'як. Черв'яки розрізняють за формою, за об'ємом, за західністю та за відношенням довжини до діаметра. Класифікацію черв'яків черв'ячних екструдерів представлено на рисунку 1.9

При проходженні перероблюваного матеріалу по каналу утвореним між стінкою циліндра і нарізкою черв'яка фіксується перебіг різноманітних процесів(перемішування сировини, зростання тиску, підвищення температури, хімічні та фазові перетворення, ущільнення, дегазація і т.д.) що дає можливість використовувати черв'ячні екструдери на різних стадіях виробництва полімерів і виробів з них.

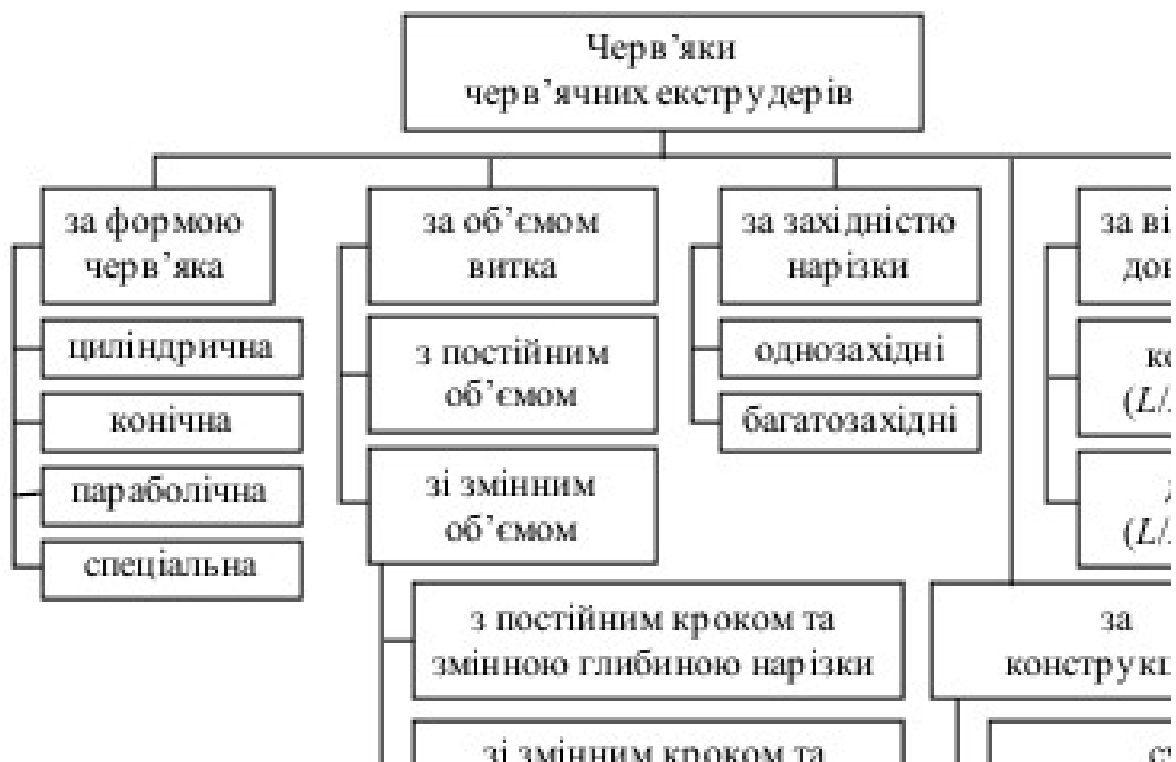


Рисунок 1.9–Схема класифікації черв'яків черв'ячних екструдерів

При конструюванні екструдера важливо правильно підібрати форму і розміри черв'яка так як цим визначається продуктивність і якість розплаву перероблюваної речовини. Для кожного матеріалу проектується своя пара(циліндр-черв'як) щоб забезпечити технологічні параметри виробництва тому що у кожного матеріалу вони різні.

В наш час в промисловості використовують черв'яки з розмірним рядом діаметрів 20, 32, 45, 63, 90, 125, 160, 250, 320мм. Відношення L/D найчастіше приймають 20, 25,30. Для екструдерів спеціального призначення це значення може збільшуватись. Коли потрібно проводити дегазацію розплаву відношення

L/D досягає до 40 і більше. Як правило крок гвинтової нарізки черв'яка дорівнює його діаметру чим забезпечується кут нахилу нарізки 17.7 градусів. Тому для заданого діаметра розраховують лише глибину гвинтової нарізки(глибину каналу) у кожній зоні.

Для переробки полімерів часто використовують простий тризонний черв'як (рисунок 1.10). Він має три зони по довжині. Перша зона подачі, черв'як циліндричної форми з максимальною глибиною каналу. Друга зона плавлення з конічним осердям. Третя зона гомогенізації з циліндричним осердям і мінімальною глибиною каналу.

), відбувається зростання тиску й подалше

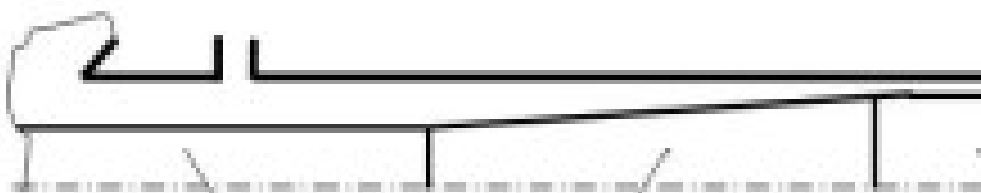


Рисунок 1.10– Схема тризонного черв'яка

1-зона подачі; 2-зона плавлення; 3- зона гомогенізації

На рисунку 1.11 наведено схему черв'яка для переробки полімерів коли потрібно проводити дегазацію розплаву. За такої схеми перші три зони працюють як у попереднього, а у четвертій різко збільшується величина каналу черв'яка, що різко знижує тиск чим забезпечується вивід газів через спеціальний отвір циліндра. В зоні 5 тиск знову зростає, а в зоні 6 проходить гомогенізація розплаву



Рисунок 1.11– Схема тризонного черв'яка для дегазації

1-зона подачі; 2-зона плавлення; 3- зона гомогенізації;4- зона дегазації; 5- зона підвищення тиску; 6- зона гомогенізації

Для переробки деяких полімерів використовують розтирання розплаву та динамічне змішування, що досягається шляхом модернізації черв'ячної пари, введенням конструктивних елементів(рисунок 1.12). Після зони 1,2 розміщують конструктивний елемент 3 через мінімальні зазори якого продавлюється і розтирається розплав(нерозплавлені частинки), а на кінці черв'яка розміщені гомогенізувальні елементи 4 (динамічний змішувач).



Рисунок 1.12– Схема трizonного черв'яка з конструкційними елементами
1-зона подачі; 2-зона плавлення; 3- зона з конструкційним елементом;4- зона гомогенізації з конструкційними елементами

Для забезпечення ефективного екструзійного перероблення полімерів важливо провести якісний аналіз термомеханічних кривих відповідного матеріалу, це дасть можливість визначити розподіл температур по зонах шнека.

Особливу увагу потрібно приділити тиску в екструдері для забезпечення продавлення розплаву крізь головку. Тиск на виході екструдера має дорівнювати опору головки P_g . Характер зміни тиску по довжині черв'яка на пряму залежить від його геометрії. Характерні криві зміни тиску по довжині екструдера наведені на рисунку 1.13.

елементами, оскільки створюється «надд», необхідний для продавлювання розплав. Такими елементами в черв'ячному екструзорі (рис. 5.14,в), конструкцій яких на сьогоднішні



Рисунок 1.13– Графік залежності зміни тиску по довжині екструдера

1 – крива безперервного зростання тиску; 2,3 – криві зростання тиску з максимумом

Існує багато різноманітних схем екструзії та конструктивних елементів за допомогою яких забезпечується якісна переробка матеріалів тому завдання конструктора зводиться до вибору оптимальної схеми екструзії для конкретного матеріалу, модернізації робочих органів з використанням конструктивних елементів і оптимізації режимів перероблення, що забезпечить оптимальну працездатність і якість виробу.

1.4 Матеріали деталей робочих органів екструзійної машини

Узагальнивши вимоги конструкторської документації, як вітчизняного так і зарубіжного виробництва, слід відмітити, що основними матеріалами для виготовлення шнеків є наступні сталі закордонного виробництва марок SAE3135, 40CrNi, 40Ni Cr6, SNC236, 640M40, 35NC6.

Аналогами до цих марок сталей є Вітчизняна 40ХН (відповідно до міжнародного транслятора сучасних сталей) таблиця 1.1.

Таблиця 1.1

Вітчизняні та закордонні аналоги сталей, які використовуються у виробництві пальців кульової опори

| | США | Китай | Німеччина | Японія | Англія | Франція |
|-----------------------|------|--------|-----------|--------|--------|---------|
| Зарубіжні марки сталі | SAE | GB | DIN | UNI | BS | AFNOR |
| | 3135 | 40CrNi | 40Ni Cr6 | SNC236 | 640M40 | 35NC6 |
| Вітчизняні аналоги | 40ХН | 40ХН | 40ХН | 40ХН | 40ХН | 40ХН |

За формою, конструкцією та технологічними ознаками деталь «Шнек екструдера 137.450-016» належить до деталей класу «Вали» (гвинт Архімеда) [2] – вали ступінчасті з канавками і точними поверхнями.

Матеріал деталі – сталь 40ХН, відноситься до категорії високо вуглецевих легованих сплавів, класу: сталь корозійна – стійка жароміцна.

Основні характеристики сталі 40ХН:

Питома вага: 7650 кг/ м³; термообробка: гартування 980 - 1020⁰С, відпуск 680 - 700⁰С.

Температура кування, ° С: початок 1200°, кінець 850°.

Температура критичних точок: A_{c1} = 800°, A_{r1} = 780°.

Зварюваність матеріалу: не застосовується для зварних конструкцій.

Жаростійкість: сталь стійка до температури 600 – 650° С

Твердість матеріалу: НВ = 217 – 229 МПа, Температура критичних точок: A_{c1} = 800°, A_{c3} (A_{cm}) = 830°, A_{r3} (A_{rcm}) = 700°.

Хімічний склад сталі 40ХН ДСТУ 7806: 2015 приведено в табл.1.2, а механічні показники – в табл. 1.3 [2].

Таблиця 1.2

Хімічний склад сталі 40ХН ДСТУ 7806: 2015

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Ti |
|-------------|-----|----|-----------|-------|------|------|-----|
| | | | Не більше | | | | |
| 0,35...0,44 | 0,6 | | 0,03 | 0,025 | до 1 | до 1 | 0,1 |

Таблиця 1.3

Механічні властивості сталі 40ХН ДСТУ5949-75

| σ_T | σ_B | δ_5 , | ψ , | a_n , | HB |
|------------|------------|--------------|----------|---------------------|-----------|
| МПа | МПа | % | % | кДж/см ² | |
| 940 | 1165 | 13 | 42 | 70 | 217...229 |

Вид поставки: сортовий прокат, в тому числі фасонний: калібрований пруток ДСТУ 7806: 2015.

Застосування в промисловості. Сталь 40ХН використовується для виготовлення відповідальних деталей машин (для роботи при температурах до 400-450° в агресивному середовищі). Виготовляють з сталі 40ХН вали, шнеки, циліндри, втулки, пальці, диски, фланці, кріпильні деталі, кулькові підшипники.

За класифікацією виробників ріжучого інструмента (по класифікації «Sandvik Coromant») дані леговані сталі з тимчасовим опором на розрив $R_m \leq 750$ МПа відносять до одного класу обробки різанням, наприклад P02.2.

Також дані сталі зміцнюються методами ППД степінь зміцнення яких може досягати 120%. Але різницю фізико-механічних властивостей та структури матеріалу заготовки необхідно враховувати при проектуванні операцій технологічного процесу виготовлення деталі.

Висновки до першого розділу

В першому розділі дипломної роботи проведено детальний огляд науково-технічної інформації з проектування обладнання для переробки ПВХ матеріалів.

Розглянуто конструктивно-технологічні особливості робочих органів екструзійної машини та систематизовано інформацію щодо їх удосконалення.

Проведено огляд полімерних матеріалів придатних для вторинної екструзійної переробки, виявлено технологічні особливості.

Встановлено конструктивні закономірності та визначені параметри, які необхідно дослідити для конструювання екструзійної машини з переробки вторинної ПВХ сировини.

2 МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Теоретичні дослідження технологічних властивостей полівінілхлориду і його співполімерів

Полівінілхлорид (ПВХ) та поліетилен є найпоширенішими полімерами. ПВХ отримують шляхом полімеризації вінілхлориду, який часто отримують з етилену. Синтез може відбуватися в масі, емульсії або суспензії, і це впливає на його властивості.

Полівінілхлорид – термопластичний полімер з лінійною макромолекулярною структурою, отримують шляхом полімеризації вінілхлориду, який часто отримують з етилену. Висока механічна міцність та обмежена розчинність обумовлені електростатичною взаємодією атомів хлору та водню сусідніх ланцюгів. Однак його недолік термодеструкція при нагріванні вище 140 °С, що призводить до виділення хлористого водню.

Метод одержання ПВХ впливає на його властивості, які змінюються в широкому діапазоні.

Полівінілхлорид – це полімер вінілхлориду зі складовою ланкою, яка має наступну структурну формулу:

(2.1)

Полівінілхлорид є термопластичним полімером з лінійною макромолекулярною структурою, яка забезпечує щільну упаковку завдяки електростатичній взаємодії атомів хлору та атомів водню на сусідніх ланцюгах. Ця взаємодія призводить до високої механічної міцності, обмеженої розчинністю та невеликого лінійного видовження під час розтягу. Однак значним недоліком є термодеструкція при нагріванні до 140 °С, що супроводжується виділенням хлористого водню, який виступає як каталізатор

подальшого процесу деструкції. Через нестійкість до впливу кисню, повітря та світла, в ПВХ вводять термо та світлостабілізатори.

Полівінілхлорид має низьку ступінь кристалічності і відноситься до аморфних полімерів. Зміна його властивостей можлива в широкому діапазоні завдяки додаванню пластифікаторів, різних добавок та хімічній модифікації. Не пластифікований або частково пластифікований ПВХ представляє собою твердий і жорсткий конструкційний матеріал, відомий як вініпласт. Він застосовується для виробництва листів, плівок, труб, прутків та інших виробів за допомогою екструзії та каландрування. Пластифікований ПВХ, або пластифікат, виробляється у формі плівок, профільних виробів, шлангів і використовується для ізоляції в кабельних лініях (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1

Характеристики ПВХ матеріалів

| Матеріал | Ступінь стиску |
|-----------------------|----------------|
| Пластифікований ПВХ | 2,5-3,5:1 |
| Непластифікований ПВХ | 1,75-2,5:1 |

Додавання газотвірних добавок призводить до отримання пінопластів з закритими порами або поропластів з відкритими порами, які застосовуються для теплозвукоізоляції в авіабудуванні, автомобілебудуванні, суднобудуванні та інших галузях. Лінолеум, пластизол, пасти та інші вироби також виробляють із полівінілхлориду.

У результаті співполімеризації полівінілхлориду з іншими полімерами, такими як вініліт, хлорвініт, вініліденхлорид і інші, утворюються співполімери з підвищеними фізико-механічними характеристиками. Наприклад, при співполімеризації вінілхлориду з вініліденхлоридом виникають співполімери, які застосовуються для виробництва жорстких виробів, таких як арматура, корпуси акумуляторів, жорсткі труби і листи. При додаванні пластифікатора отримують еластичні матеріали, наприклад, плівки типу "саран", які відрізняються прозорістю, мають низьку газопроникність і використовуються як пакувальні матеріали для харчових продуктів і хімікатів.

Однією з ключових задач у виробництві високоякісних полімерних матеріалів з певними технічними характеристиками, включаючи наповнення пластмас, є процес екструзії полімеру із наповнювачами, стабілізаторами, пластифікаторами та іншими добавками, які надають новому матеріалу бажані властивості. Ефективність цього процесу в значній мірі залежить від правильного вибору екструзійного обладнання.

Залежно від різниці між температурою плавлення полімерної матриці та температурою плавлення, кипіння або деструкції наповнювача, можливий перехід наповнювача з твердої фази в рідку чи з рідкої або твердої фази в газоподібну. Таким чином, для ефективної обробки важливо визначити температурні інтервали для зазначених станів матриці та наповнювача. Для всіх відомих полімерів можна провести характеристику цих температур фізичних переходів (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Схема температурних фізичних переходів полімерів
 $T_{кр}$ – температура крихкості; T_c – температура склування; T_m – температура текучості(плавлення); T_d – температура деструкції; $T_{кр} - T_c$ – склоподібний стан; $T_c - T_m$ – еластичний стан; $T_m - T_d$ – в'язкотекучий стан.

Якість змішування залежить від виду наповнювача, його адгезії, розчинності, агрегатного стану при введенні та іншими фізико-хімічними характеристиками. Наповнювачами можуть бути тверді, рідкі та газоподібні речовини органічного і неорганічного походження, які рівномірно розподіляються у об'ємі матеріалу і мають чітку межу поділу з полімером.

Змішування – це процес, під час якого два чи більше компонентів переміщуються у визначеному об'ємі зі зміною початкового розподілення цих компонентів. У виробництві та обробці полімерів або композитів на їх основі

до полімеру (матриці) додають різні наповнювачі, такі як стабілізатори, пластифікатори, барвники та інші компоненти.

Існують два основних типи змішування: звичайне (дистрибутивне) та диспергуюче. Дистрибутивне змішування, або звичайне, є процесом, в результаті якого відбувається просторове розподілення частинок додаткового компонента в основному без зменшення їхніх розмірів (агломератів). Цей вид змішування застосовується для модифікації властивостей полімерної композиції. Наприклад, для підвищення морозостійкості полістиролу, який характеризується низькою ударною в'язкістю при температурі 0°C, використовують дистрибутивне змішування, додаючи каучук та отримуючи ударостійкий полістирол.

В системах з багатьма компонентами змішування розглядається послідовний процес, в якому кожний компонент по черзі додається до раніше сформованої суміші, що представляє собою дисперсне середовище.

Вибір методу виготовлення виробів залежить від їх конфігурації та розмірів. Наприклад, порожні ємності виробляють екструзією, за якою слідує роздування, у той час як об'ємні вироби виготовляють ротаційним формуванням. Крім того, метод обробки полімеру визначається фізичним станом, в якому знаходиться полімер під час виготовлення виробу: склоподібний (застосування холодного пресування, вирубки і т.д.), високоеластичний (термоформування), в'язкотекучий (лиття, пресування, екструзія і т.д.).

Усі складові суміші взаємнонерозчинні, тому для отримання структури матеріалу в утворених гранулах важливий не лише процес перерозподілу компонентів у дисперсному середовищі, але й їх подрібнення (диспергування).

Під час диспергуючого змішування відбувається одночасне зменшення розмірів частинок змішуваного компонента та їх рівномірний розподіл в об'ємі основного компонента. Схема процесів звичайного (механічного) та диспергуючого змішування показана на рисунку 2.2.

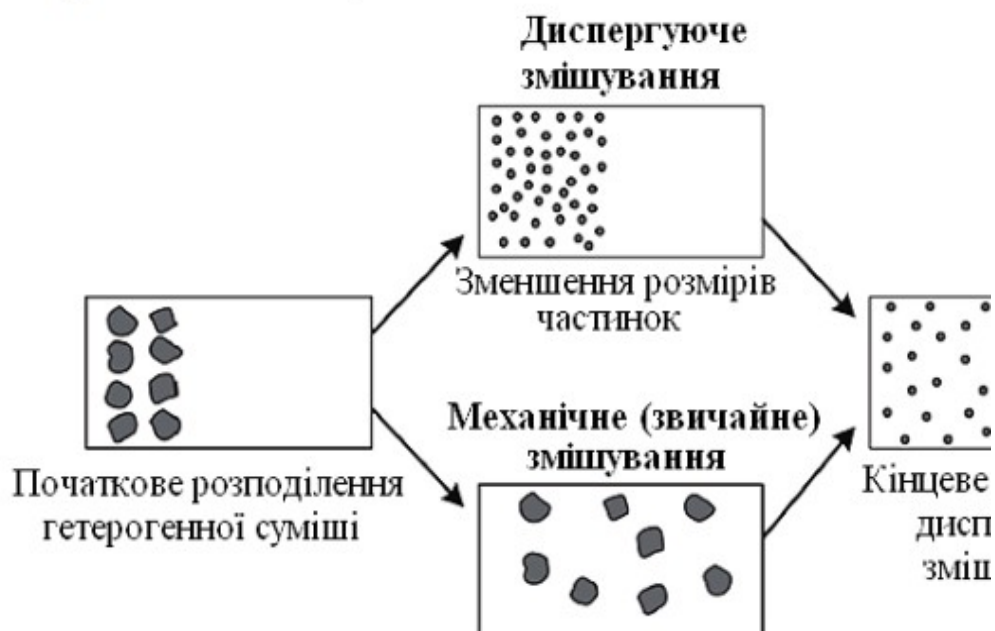


Рисунок 2.2 – Схема процесів змішування

Полівінілхлорид володіє достатньо високою хімічною стійкістю до впливу кислот, лугів і мастильних масел. Але при цьому він має цілий перелік характерних недоліків для складних полімерів: низька стійкість до впливу тепла і світла. Значне зниження міцності при підвищенні температури, а також холодно текучості під впливом тривалого навантаження, обмежують його застосування, незважаючи на високі показники механічної міцності при нормальній температурі. Основні фізико-механічні властивості наведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2

Основні фізико-механічні властивості ПВХ

| | |
|------------------------------------|-----------|
| Питома вага, кг/м ³ | 1380-1400 |
| Константа Фікентчера | 45-75 |
| Теплостійкість за Мартенсом, °С | 50-70 |
| Температура розкладання, °С | 140-170 |
| Межа міцності на розтяг, МПа | 50-60 |
| Відносне видовження при розриві, % | 10-50 |

2.2 Теоретичні дослідження процесу просування розплаву по гвинтових каналах шнека

Конструктивно всі шнекові машини (рис. 2.3) складаються з таких основних складових: завантажувальний пристрій, робочі органи (шнек і циліндр), привід обертання шнека (двигун-редуктор), вузол упорного підшипника, вузол обігріву і охолодження, система автоматизованого керування.

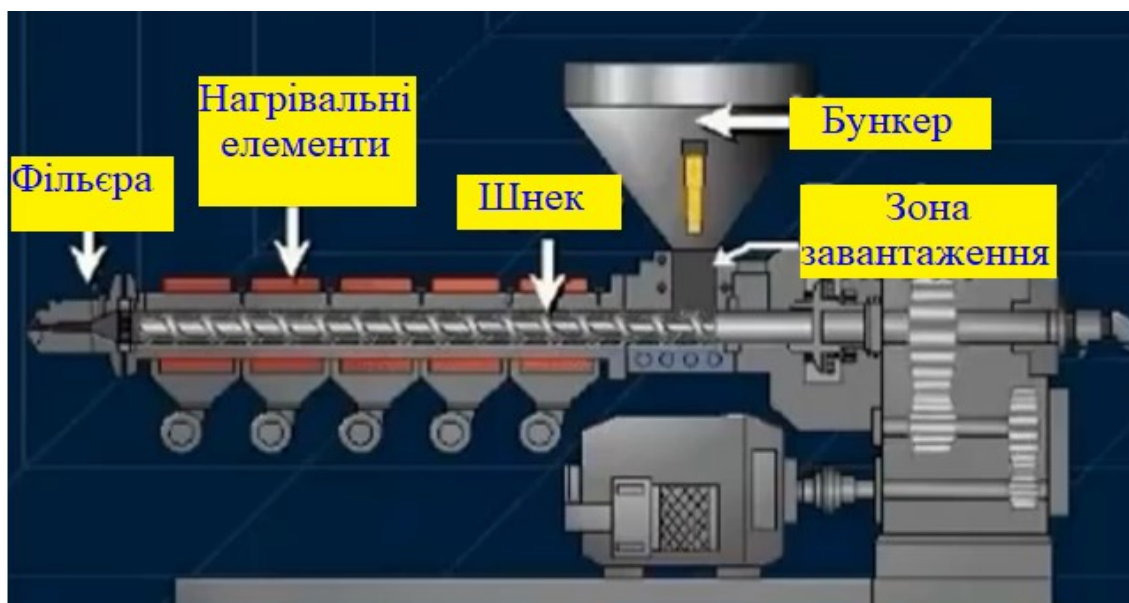


Рисунок 2.3 – 3D модель екструзійної машини

Сировина потрапляє в завантажувальний бункер, а далі в гвинтовий канал шнека, що обертається. При транспортуванні шнеком матеріал перемішується і частково стискається, а зайве повітря частково виходить через завантажувальний отвір. Потрапивши в зону пластифікації матеріал прогрівається і пластифікується за рахунок теплової енергії нагрівачів, а також тієї, що виділяється при інтенсивному деформуванні його частинок (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Принципова модель просування полімеру в робочих зонах екструзійної машини [2]

1–зона транспортування; 2–зона пластифікації ; 3– зона дозування .

На цій стадії повітря видаляється з суміші майже повністю, а її об'єм зменшується і можуть з'являтися пустоти в потоці розплаву, що рухається по гвинтовому каналу шнека. Щоб забезпечити стабільність потоку нарізку шнека в зоні загрузки роблять з декількома заходами, а глибину каналу монотонно зменшують по ходу розплаву.

Підготовлений таким чином розплав продавлюється шнеком через формуючу (екструзійну) головку, закріплену на фланці циліндра (корпус шнека). Внаслідок великого гідравлічного опору головки і високої в'язкості розплаву полімеру на виході в головці нагнітається тиск до 50МПа. В результаті виникає значне осьове зусилля, що діє на шнек, на вихідний вал, на упорну шайбу, на упорний підшипник і на корпус екструдера, де і замикається силовий ланцюг. Таким чином виникає замкнутий силовий ланцюг деталей шнекової машини. Тому всі ці деталі при проектуванні шнекової машини повинні бути розраховані на це зусилля.

Основними технологічними параметрами процесу екструзії є продуктивність шнекової машини, температура та тиск перероблюваного

полімеру на вході і виході з циліндра, швидкість просування розплаву, потужність.

Процес просування розплаву по гвинтових каналах нарізки шнека описується системою диференціальних рівнянь другого порядку: нерозривності, руху, енергії і реологічного рівняння в векторній формі

$$\frac{Dp}{Dt} = -\rho(\nabla\vec{V}) \quad 2.2$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \nabla t + \rho \vec{g}) \quad 2.3$$

$$\rho c_r \frac{DT}{Dt} = -(\nabla \vec{q}) - AT \left(\frac{dp}{dT} \right)_\rho (\nabla \vec{V}) + \tau / \nabla \vec{V}) A \quad 2.4$$

$$\tau = \eta \Delta \quad 2.5$$

Де t – час, с; $\frac{D}{Dt}$ – повний диференціал; ρ – густина, кг/м^3 ; ∇ – диференціальний оператор; \vec{V} – вектор швидкості; p – гідростатичний тиск, Па; \vec{g} – головний вектор масових сил, які діють на розплав в певній точці; c_r – питома теплоємність розплаву при постійному об'ємі, $\text{Дж/кг}^\circ\text{C}$; T – температура, К; \vec{q} – вектор теплового потоку, залежний від градієнту температури в ізотропному середовищі за законами Фур'є. $\vec{q} = k\nabla T$; k – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт/(м}^\circ\text{C)}$; A – термічний еквівалент роботи; η – густина розплаву, τ – тензор напружень; Δ – тензор швидкості деформації.

Рівняння 2.2 – 2.5 описують потік розплаву в каналі шнека. Вирішення даних рівнянь не є простим та потребує багато зусиль, тому подальші розрахунки проводяться за допомогою комп'ютерного моделювання.

На малюнку 2.5 зображено фізичну модель роботи одно шнекової машини в нерухомій системі координат.

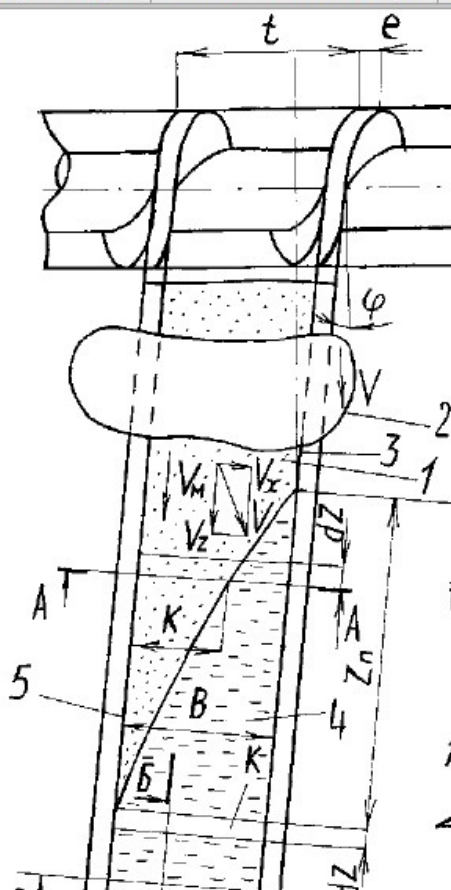


Рисунок 2.5– Фізична модель процесу

1– спресований твердий полімер; 2– стінка циліндра; 3– гребінь шнека; 4– шнек; 5– потік розплаву полімеру.

При математичному описі та моделюванні процесу роботи машини використовується принцип інверсії, мається на увазі, що корпус обертається, а гвинтовий черв'як нерухомий.

Швидкість обертання корпусу визначається як:

$$V = \omega D/2, \quad 2.6$$

де ω кутова швидкість шнека, с^{-1} ; D – зовнішній діаметр шнека, м.

При обертанні корпусу із швидкістю V (н), стінка, що рухається захоплює за собою розплав полімеру, а нерухома частина має гальмуючу дію. У внутрішній поверхні корпусу швидкість розплаву, яка захоплюється

максимальна, а біля поверхні дорівнює нулю. Це й зумовлює умови для внутрішнього перемішування розплаву.

Так як вісь каналу розміщена під кутом φ до вектора напрямку швидкості V , яка розкладається на складові V_x і V_1 , де перша складова $V_x = V \cos \varphi$ направлена вздовж осі каналу x , а друга $V_1 = V \sin \varphi$ направлена перпендикулярно. Швидкість V_x – швидкість розплаву, об'ємні витрати якого визначають продуктивність одно шнекової екструзійної машини.

Швидкість V_1 – швидкість циркуляційного потоку з круговим рухом (рис.2.6).



Рисунок 2.6– Траєкторія циркуляційного руху розплаву

При русі поперек каналу потік впирається в стінку гребеня та повертається у зворотний бік, не впливаючи на продуктивність, але сприяючи перемішуванню, гомогенезації речовини та покращення умов теплообміну. Таким чином в каналі шнека виникає зворотний потік(потік під тиском), який направлений протилежно прямому потоку.

Для спрощення математичного опису процесу впливу компонентів швидкості V розглядають незалежно один від одного.

Об'ємні витрати отримують інтегруванням компоненти V_x , вектора швидкості розплаву по поперечному січенню каналу:

$$Q = \int_0^h \int_0^B V_x \, di \, dy \quad 2.7$$

де h, B – глибина та ширина гвинтового каналу шнека

В результаті розв'язку рівнянь (2.3) та (2.5) отримаємо диференціальне рівняння руху розплаву в каналі шнека:

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) = \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial I^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right), \quad 2.8$$

де μ – в'язкість ньютонівської рідини, Па*с. Якщо знехтувати масовими, інерційними силами і прийняти, що зазор між поверхнею шнека та циліндра рівний нулю то отримаємо граничні умови для розв'язання рівняння (2.8).

$$V_x(0, y) = 0, V_x(I, 0) = 0, V_x(b, y) = 0, V_x(I, d) = V_x, \quad 2.9$$

де V_x – компонента швидкості руху біля поверхні циліндра.

Рівняння (2.8) розв'язуємо методом ділення змінних, в результаті отримаємо:

$$Q_L = \frac{\pi D \delta^3 m \Delta P_3}{12 \mu c \cos^2 \varphi}, \quad 2.10$$

де ΔP_3 – падіння тиску в зазорі між виступами нарізки шнека і поверхнею циліндра, Па; c – товщина виступу в напрямку осі шнека, м; m – коефіцієнт, що враховує ексцентриситет шнека відносно циліндра.

Якщо припустити, що компонента швидкості V_x залежить тільки від координати y , то отримаємо вираз для об'ємної витрати розплаву:

$$Q = \int_0^d V_x dy = 0 \quad 2.11$$

$$V_x = y \left(\frac{U_n}{H} \right) \left[3 \frac{y}{H} - 2 \right] \quad 2.12$$

З рівняння (2.12) видно, що розподіл швидкостей не залежить від в'язкості розплаву і градієнта тиску.

Спрощена ньютонівська модель дозволяє легко розібратись з механізмом руху полімеру по гвинтовому каналу шнека. Перевага даного методу полягає в простоті розрахунків. До недоліків слід віднести великі похибки при

розрахунках тому що не враховуються реологічні особливості потоку розплаву та процеси теплообміну.

2.3 Методика моделювання процесу диспергуючого змішування

Змішування в одночерв'ячному екструдері відбувається в зоні гомогенізації розплавленого полімеру, завантажений матеріал повністю розплавлений, і припустимо, що нерозплавлені гранули полімерів в розплаві відсутні. Таким чином можемо стверджувати що, змішуються взаємно нерозчинні рідини з різними густинами. Основним критерієм оцінки якості змішування є деформація зсуву, яка виникає в розплаві під час його руху та взаємодії з робочими елементами. Для подальшого моделювання будемо розглядати гідромеханічні властивості процесу змішування. Для аналізу процесу змішування та просування розплаву в робочих каналах екструдера, який складається з перемішування та диспергування. Даний процес має наступні характеристики:

- процес підготовки розплаву досягається фізичним переміщенням компонентів у розплаві;
- в екструдері спостерігається ламінарний режим течії розплаву через високу в'язкість;
- неоднорідне швидкісне поле в каналах та зазорах змішувального елемента призводить до неоднакових швидкостей деформації та тепловиділення.
- низька теплопровідність полімеру призводить до різної в'язкості розплаву в об'ємі полімеру.
- неоднорідність розплаву полімеру обумовлена різними густинами компонентів та їх розмірами.

Враховуючи припущення, що при зміні систем координат обертових елементів, отримані значення будуть еквівалентні, процес змішування розплаву полімеру розглядаємо за наступною принциповою схемою, наведеною на рисунку 2.7.

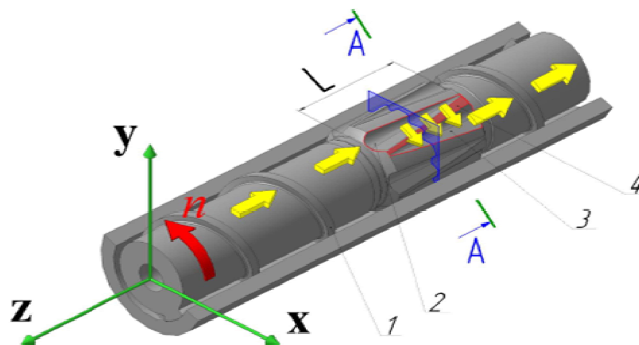


Рисунок 2.7– Принципова схема диспергуючого змішування

1 – гвинтова нарізка; 2 – впускний канал; 3 – випускний канал; 4 – робочий зазор; L – довжина змішувального елемента

Обертання черв'яка формує градієнт тиску, а в каналі одночерв'ячного екструдера ламінарний потік розплаву полімеру. Після проходження гвинтової лінії черв'яка розплав потрапляє у впускні канали змішувального елемента для покращеного перемішування і розтирання агломерату більшої фракції. Для спрощення моделювання припустимо, що компоненти мають форму сфери з початковим діаметром d_0 і розташовані довільним чином (рис. 2.8).

При виході розплаву з гвинтової лінії шнека виникає градієнт тиску по осі z, що вдавлює розплав у впускний канал диспергуючого елемента до його повного заповнення. Далі розплав витісняється з впускного каналу змішувального елемента в поперечному напрямі і по спеціально нарізаним вузьким каналам. Витіснений розплав каналу, натрапляє на рухомі нахилені виступи, що рухаються в зустріч потоку розплаву із швидкістю обертання черв'яка, створюючи інтенсивні деформації зсуву, які призводять до руйнування та подрібнення агломератів. Цей процес забезпечує якісне диспергування і є важливим етапом у змішуванні компонентів.

Існують різні теоретичні напрямки вдосконалення даного процесу, але їх об'єднання з практикою наразі не є повним. Тому вдосконалення методик розрахунку та моделювання процесу диспергуючого змішування є актуальним завданням. У моделюванні даного процесу важливо створити адекватну модель,

яка враховує поведінку розплаву полімеру у гвинтових каналах екструзійної машини.

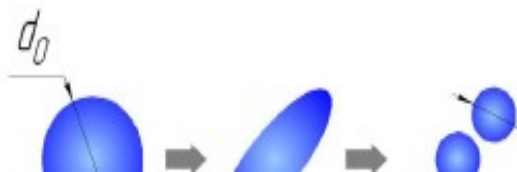


Рисунок 2.8 – Схема диспергування агломератів в змішувальному елементі

d_0 – середній початковий діаметр агломерату диспергованої фази, м;

d_1 – середній кінцевий діаметр агломерату диспергованої фази, м

При проходженні розплаву через робочий зазор змішувального елемента (рис. 2.9) створюється складна картина швидкісних параметрів потоку.

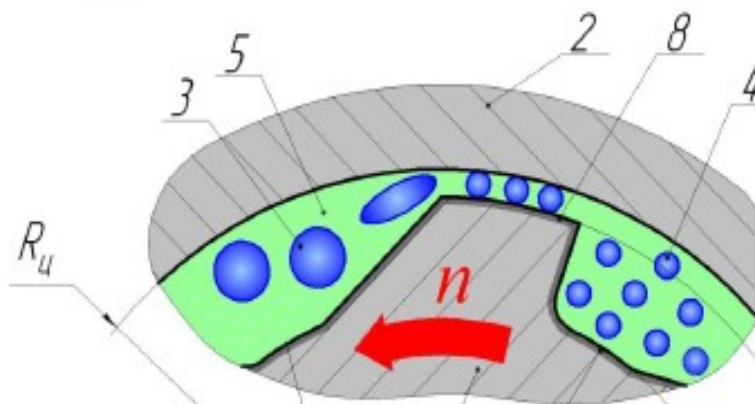


Рисунок 2.9 – Процес диспергування агломератів в змішувальному елементі

1 – ротор; 2 – корпус; 3 – диспергуюча фаза; 4 – диспергована фаза; 5 –

дисперсне середовище; 6 – впускний канал; 7 – випускний канал;

8 – робочий зазор; n – швидкість обертання черв'яка; $R_{вн}$ – внутрішній

радіус змішувального елемента; $R_{ц}$ – внутрішній радіус корпусу; h – глибина

каналу диспергуючого елемента; δ – робочий зазор

Чим інтенсивніший та складніший профіль потоку швидкості по висоті зазору тим процес змішування є ефективнішим.

2.4. Моделювання умов навантаження корпусу екструдера з використанням програмного комплексу Abaqus

В процесі екструзійної переробки, циліндрична поверхня корпусу під впливом наростаючого тиску в камері буде пружно-пластично деформуватись змінюючи своє положення відносно рівноважного стану на величину a . Значення a в свою чергу не повинно перевищувати половини максимально-допустимого значення у нашому випадку $\Delta x \leq 0.05$ мм.

Товщина стінки корпусу повинна бути такою, щоб режими екструзійного навантаження не призводили до зростання величини a , яка б перевищувала вказане значення Δx . При моделюванні процесів напружено-деформованого стану, аналітичні залежності зв'язують між собою режими навантаження, з епюрами розподілення напруження по об'єму, епюрами залишкових напружень та деформацій.

В зв'язку з цим встановлення відповідності між параметрами робочої камери і значеннями амплітуди коливань навантаженої поверхні, які формуються на різних стадіях процесу є важливою задачею.

Для вирішення поставленої задачі використано програмний комплекс – Abaqus, який дозволяє моделювати процеси, що відбуваються в осередку деформації, без проведення численних та трудомістких експериментів.

Комп'ютерні розрахунки на основі методу скінчених елементів (МСЕ) дозволяють за порівняно невеликий проміжок часу провести повний аналіз і розрахунки енергосилових параметрів та створити об'єктивну картину явищ. Сімейство продуктів Abaqus розробляється і підтримується компанією Abaqus, Inc. (USA) з 1978 року [23].

В основі методики моделювання лежить розрахунок напружено-деформованого стану матеріалу зразка (сталь 40ХН, аналогом якої є сталь 4140Н за класифікацією SAE) при деформуванні чисельним методом кінцевих елементів.

Для описання степені деформації, в більшості випадків достатньо мати лише одне характерне значення деформації. Abaqus використовує значення відомі як степінь деформації або Фон-Мізес деформація:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (2.13)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – головні деформації.

Напруження в Abaqus визначається як сила, що діє на область модуля матеріалу. Напруження які діють на грань модуля бувають нормальні (перпендикулярні до грані) і зсувні (по грані). Напруження зсуву можна представити у вигляді двох компонентів по довільним ортогональним осям. Таким чином кінцевий стан напруження може бути виражений трьома нормальними складовими $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ і шістьма компонентами зсуву фрагмента об'єкта $\sigma_{xy}, \sigma_{yx}, \sigma_{yz}, \sigma_{zy}, \sigma_{zx}, \sigma_{xz}$.

З умови рівноваги можна стверджувати, що компоненти які діють в одній площині еквівалентні. Тобто $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy}, \sigma_{zx} = \sigma_{xz}$. Таким чином, кінцевий стан напруження може бути представлений трьома нормальними компонентами і трьома компонентами зсуву фрагмента.

Використовуючи математичний аналіз можна зорієнтувати три ортогональні осі так, що компоненти зсуву фрагмента об'єкта напруження по цим осям будуть рівні нулю. Результуючі нормальні напруження, які діють в напрямку цих осей і є основними напруженнями.

На базі програмного комплексу Abaqus розроблена методика моделювання і дослідження процесу навантаження зразків із сталі 40ХН.

Основними елементами методики моделювання і дослідження є:

- створення геометричної тривимірної моделі дослідного зразка та моделювання умов навантаження в системі SolidWorks та імпорт в програмний комплекс Abaqus;
- присвоєння кінематичних параметрів, які емітують умови закріплення та навантаження на дослідний зразок;
- створення сітки та призначення типу скінчених елементів;
- моделювання процесу і розрахунок фізичних параметрів стану поверхневого шару досліджуваного зразка;
- аналіз і обробка результатів експерименту, формування журналу фізичних параметрів стану поверхневого шару зразка та побудова графічних залежностей.

На рис. 2.10 зображена об'ємна тривимірна модель корпусу екструдера зі сталі SAE4140H (аналог сталь 40XH), створена в SolidWorks та імпортована в Abaqus.

Сталь 40X

$P = 20\text{MPa}$

ція корпусу матиме вигляд.



Рисунок 2. 10 3D модель корпусу екструдера

Для дослідження процесу навантаження по внутрішній поверхні встановлено датчики. Задано функцію відображення хвильових процесів на поверхні у масштабі 400%. На стадії Step 1 присвоєно умови навантаження. Усі наступні кроки експерименту Step 1... Step 10 відпрацьовуються автоматично. Значення половини амплітуди переміщень заданих точок формуються у табличному та графічному вигляді в журналі реєстрації (додаток В).

Висновки до другого розділу

Описана загальна методологія роботи, яка передбачає теоретичні та експериментальні дослідження, комп'ютерне моделювання та аналіз вибору оптимальних параметрів процесу екструзійної переробки ПВХ матеріалів.

Розроблена фізична та математична моделі поведінки просування розплаву в робочій камері екструдера, які враховують процеси перетікання розплаву.

Запропоновано методику проектування диспергуючого елемента «Черв'яка екструдера», а також методику комп'ютерного моделювання процесів навантаження корпусу екструдера.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРУЗІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ВТОРИННОЇ ПЕРЕРОБКИ ПВХ

3.1 Основні параметри проектування черв'яків екструзійних машин

Головним робочим органом екструзійних машин є черв'як, так як від правильного вибору його геометричних та конструктивних параметрів напряму залежить якість та продуктивність процесу переробки полімеру. Черв'як містить хвостову (передача крутного моменту) і робочу (гвинтова нарізка) частини.

Конструктивні параметри хвостовика вибирають так щоб забезпечити передачу крутного моменту на черв'як від приводу та унеможливити просування перероблюваної сировини у бік редуктора.

Геометричні параметри робочої частини черв'яка напряму впливають на проходження технологічного процесу переробки та продуктивність екструзійної машини.

Робочу частину черв'яка розділяють, як правило на три зони (завантаження, стискання, дозування), а при необхідності додають зони змішування, відведення надлишкових газів та динамічного змішування (в залежності від параметрів перероблюваного матеріалу).

Початкові геометричні параметри черв'яка призначають спираючись на емпіричні залежності, а потім коригують.

Крок нарізки витків черв'яка t беруть у діапазоні $(0,6-1,2)D$, найчастіше $t=D$. Довжина зони завантаження l_3 складає $(4-6)D$ або $(0,25-0,35)L$.

Довжина зони стискання $l_c =$ для більшості полімерів становить $(7-13)D$ або $(0,2-0,35)L$.

Довжину зони дозування l_d вибирають у межах $(0,4-0,6)L$, що впливає на якість розплаву. Для вторинної переробки полімерів черв'яки можуть мати інший розподіл зон за довжиною. Інколи шнек в зоні стискання може мати більш крутий кут нахилу.

При вторинній переробці полімерів конструкція черв'яка містить змішувальні зони та зону дегазації, де глибина каналу збільшується, а потім знов зменшується. Довжину змішувальної зони приймають $(1-3)D$.

Ширину гребеня витка нарізки черв'яка призначають $(0,06-0,12)D$ (більші значення приймають для менших діаметрів). Збільшення ширини гребеня підвищує тертя і зменшує корисний об'єм каналу.

Глибину каналу зони завантаження призначають $(0,12-0,16)D$ (більші значення для менших діаметрів). Глибина каналу зони дозування h_2 залежить від параметра ступеня стискання i (відношення об'ємів витка черв'яка на вході та виході). Параметр i розраховується за формулою (3.1).

$$i = \frac{h_1}{h_2} \left(\frac{D - h_1}{D - h_2} \right), \quad (3.1)$$

де h_1 – глибина каналу в зоні загрузки; D – діаметр черв'яка.

Величина параметра i лежить в межах $1,5 - 4$ і залежить від властивостей перероблюваного матеріалу. Для поліетиленів рекомендують $i=2-2,5$, а для переробки $i=1,7-2$.

Звідси отримаємо

$$h_2 = 0.5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i} (D - h_1)} \right] \quad (3.2)$$

Ще одним важливим параметром є величина зазору між циліндром і гребенем черв'яка, яку приймають рівною $(0,002-0,003)D$ (більші значення призначають для менших діаметрів). При збільшенні зазору падає продуктивність через міжвиткові втрати розплаву.

Робочу і хвостову частини черв'яка розділяють циліндричною зоною довжиною $(1-2) D$, яка імітує підшипник ковзання і унеможлиблює просування полімеру до підшипникового вузла.

Приклад конструктивного виконання черв'яка для вторинної переробки ПВХ матеріалів відображено на рисунку 3.1.

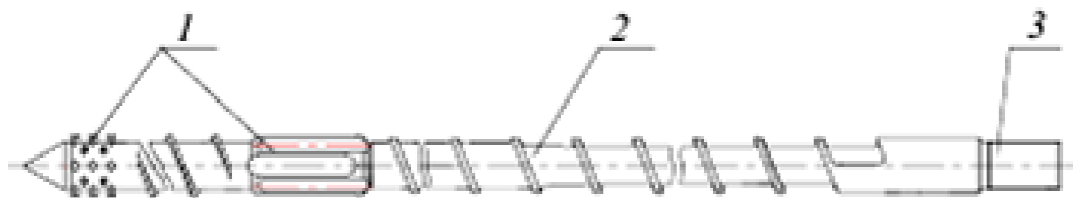


Рисунок 3.1– Черв'як зі змішувальними елементами

1– змішувальні елементи; 2 – зона пластифікації; 3– хвостовик

Основні параметри проектування черв'яка зведено в таблицю 3.1

Таблиця 3.1

Конструктивні параметри черв'яка

| Параметр | Значення параметра |
|--|--------------------|
| Діаметр D , мм | 125 |
| Крок гвинтової нарізки t , мм | 86 |
| Довжина черв'яка L , мм | 1790 |
| Відношення L/D | 14 |
| Кут нахилу гвинтової нарізки φ° | 12,36° |

Для визначення необхідних параметрів для конструювання необхідно проводити додаткові теоретичні та експериментальні дослідження.

3.1.1 Параметричний розрахунок черв'ячного екструдера

Для розрахунку геометричних параметрів черв'яка необхідні наступні вихідні дані: діаметр черв'яка $D=125$ мм, загальна довжина черв'яка $14D$, оброблюваний матеріал – ПВХ. Визначення геометричних параметрів конструкції проведено згідно з методикою наведеною у [11].

Довжину робочої частини шнека екструдера визначаємо за формулою:

$$L_{\text{роб}}=14D=14 \cdot 125=1790 \text{ мм.} \quad (3.3)$$

Довжину зони дозування визначаємо за формулою:

$$l_{\text{дз}}=(0,25 \dots 35) l_p = 0,25 \cdot 1790= 450 \text{ мм.} \quad (3.4)$$

Довжину зони завантаження матеріалу визначаємо за формулою:

$$l_{зв}=(0,12...0,25)l_p = 0,12 \cdot 1790 = 220 \text{ мм.} \quad (3.5)$$

Довжину зони пластифікації матеріалу знаходимо за формулою :

$$l_{п}=(0,25...0,5)l_p = 0,5 \cdot 1790 = 880 \text{ мм.} \quad (3.6)$$

Крок нарізки черв'яка визначаємо за формулою:

$$t=(0,7...1,2)D=0,7 \cdot 125=86\text{мм.} \quad (3.7)$$

Ширину виткової стрічки визначаємо за формулою:

$$e=(0,08...0,14)D=0,14 \cdot 125=18\text{мм.} \quad (3.8)$$

Глибину різи шнека екструдера в зоні завантаження полімеру визначаємо:

$$h_1=h_n=(0,1...0,16)D=0,16 \cdot 125=22\text{мм.} \quad (3.9)$$

Кут нахилу гвинтової нарізки φ°

$$\varphi = \arctg t/\pi d = \arctg 86/3,14 \cdot 125 = 12,36^\circ. \quad (3.10)$$

3.1.2 Визначення продуктивності черв'ячного екструдера

Для визначення продуктивності черв'ячного екструдера необхідні вихідні дані, які зведено в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2

Вихідні дані для проектування

| | |
|--|--------------|
| Номінальне значення частоти обертання черв'яка | N=0,83 об/с |
| Зовнішній діаметр черв'яка | D = 0,125м |
| Крок черв'яка | T = 0,086м |
| Ширина витка | E = 0,0018м |
| Значення заходу черв'яка | I = 1 |
| Діаметр осердя черв'яка в зоні завантаження | D1= 0,081м |
| Глибина гвинтового каналу в зоні завантаження | H1= 0,022м |
| Глибина гвинтового каналу в зоні дозування | H2= 0,0075м |
| Середня глибина канавки витка черв'яка | H = 0,01475м |
| Довжина зони дозування черв'яка | Lн =0,45м |
| Матеріал | ПВХ |

Продуктивність машини визначається наступною формулою [11]:

$$Q = 60V_{cp}NI\rho\beta, \quad (3.11)$$

де $\rho=0,94 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ густина ПВХ; $\beta=0,2$ – коефіцієнт заповнення між витками [2];

V_{cp} – середній об'єм простору між двома нитками однозаходового черв'яка і визначається за формулою:

$$V_{cp} = \frac{V_n + V_k}{2}, \quad (3.12)$$

де, V_n об'єм несучого каналу, який приблизно на один крок ближче до завантажувальної горловини:

$$V_n = \frac{\pi(D^2 - D_1^2)}{4} (T - E) = \frac{3.14(0.125^2 - 0.081^2)}{4} (0.086 - 0.018) = 48,38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \quad (3.13)$$

де V_k об'єм каналу черв'яка, який відноситься до кроку ближче до зони дозування:

$$V_k = \frac{\pi(D^2 - D_2^2)}{4} (T - E) = \frac{3.14(0.125^2 - 0.110^2)}{4} (0.086 - 0.018) = 18,81 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \quad (3.14)$$

Тоді,

$$V_{cp} = \frac{V_n + V_k}{2} = \frac{48,38 \cdot 10^{-5} + 18,81 \cdot 10^{-5}}{2} = 33,595 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \quad (3.15)$$

Степінь стиснення:

$$K = \frac{V_n}{V_k} = \frac{48,38 \cdot 10^{-5}}{18,81 \cdot 10^{-5}} = 2.57 \quad (3.16)$$

Розрахункова продуктивність машини:

$$Q = 60V_{cp}NI\rho\beta = 60 \cdot 33.595 \cdot 10^{-5} \cdot 48 \cdot 0.2 \cdot 0.94 \cdot 10^3 = 179 \text{ кг/год} \quad (3.17)$$

Повна продуктивність черв'яка зі змінною глибиною осердя:

$$Q = a_2 N - \frac{\beta_2 + \gamma_2}{\mu_{ef}} + P, \quad (3.18)$$

де a_2 – коефіцієнт потоку нагнітання:

$$\alpha_2 = \frac{\pi^3 \cdot (T - T \cdot E) \sigma}{A + T^2 \cdot B}, \quad (3.19)$$

де σ – об'ємний коефіцієнт камери:

$$\sigma = 1 - \frac{6.9 \cdot D}{2 \cdot [H_n - H_2]} \lg \frac{H_n}{H_2} + \frac{D^2}{2 \cdot H_n \cdot H_2} = \quad (3.20)$$

$$= 1 - \frac{6.9 \cdot 0.125}{2 \cdot [0.01475 - 0.0075]} \lg \frac{0.01475}{0.0075} + \frac{0.125^2}{2 \cdot 0.01475 \cdot 0.0075} =$$

$$= 54.2$$

Тоді:

$$H_H = H_1 - [H_1 - H_2] \cdot 0.5 = 0.022 - [0.022 - 0.0075] \cdot 0.5 = 0.014 \text{ м} \quad (3.21)$$

Знаходимо числа А і В, які характеризують конструкцію і визначаються за формулою.

$$A = \frac{\pi^2}{H_H H_2} \cdot \left[\frac{D(H_H + H_2)}{2H_H H_2} - 1 \right] = \frac{3.14^2}{0.01475 \cdot 0.0075} \cdot \left[\frac{0.125(0.01475 + 0.0075)}{2 \cdot 0.01475 \cdot 0.0075} - 1 \right] = 890.63 \quad (3.22)$$

$$B = \frac{2.3}{(H_H - H_2) D^3} \cdot \lg \left(\frac{H_H (D + D_2)}{H_2 (D + D_1)} \right) + \frac{2H_2 H_H + (H_H + H_2) D}{2D^2 H_H^2} =$$

$$= \frac{2.3}{(0.01475 - 0.0075) 0.125^3} \cdot \lg \left(\frac{0.01475(0.125 + 0.11)}{0.0075(0.125 + 0.081)} \right) + \quad (3.23)$$

$$+ \frac{2 \cdot 0.0075 \cdot 0.01475 + (0.01475 + 0.0075) 0.125}{2 \cdot 0.125^2 \cdot 0.01475^2} = 5.744 \cdot 10^4$$

Отже, коефіцієнт потоку нагнітання рівний:

$$\alpha_2 = \frac{\pi^3 \cdot (T - TE) \sigma}{A + T^2 B} = \frac{3.14^3 \cdot (0.086 - 0.086 \cdot 0.018) \cdot 54.2}{89063 + 0.086^2 \cdot 57440} =$$

$$= 0.0015 \quad (3.24)$$

Коефіцієнт протівотуку β_2 визначається за формулою:

$$\beta_2 = \frac{\pi \cdot (I - I \cdot E)}{12 \cdot L_H \cdot (A + I^2 \cdot B)} = \frac{3.14 \cdot (1 - 1 \cdot 0.018)}{12 \cdot 0.45 \cdot (89063 + 1^2 \cdot 57440)} =$$

$$= 3.89 \cdot 10^{-6} \quad (3.25)$$

Коефіцієнт втрат потоку γ_2 визначаємо:

$$\gamma_2 = \frac{\pi \cdot D \Delta^3 I^2}{10 \cdot E \cdot L_H \cdot (\pi D^2 + I^2) \cdot 0.5} =$$

$$= \frac{3.14 \cdot 0.125 \cdot 0.00025^3 \cdot 1^2}{10 \cdot 0.018 \cdot 0.45 \cdot (3.14 \cdot 0.125^2 + 1^2) \cdot 0.5} = 1.44 \cdot 10^{-10} \quad (3.26)$$

де $\Delta = 0,00025$ м – радіальний зазор; $\mu_{ef} = 1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}}{\text{см}^2}$ – характеристика динамічної в'язкості, визначаємо з довідкових таблиць.

$$P = \left(\frac{dV}{dX} \right) = 3.38 \frac{V}{H} = 3.38 \frac{0,314}{0,01475} = 71,95 \quad (3.27)$$

де V – швидкість обертання черв'яка:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{3.14 \cdot 0.125 \cdot 48}{60} = 0,314 \text{ м/с} \quad (3.28)$$

Таким чином оптимальна ефективність робочого органу із змінною глибиною осердя дорівнює:

$$Q = a_2 N - \frac{\beta_2 + \gamma_2}{\mu_{ef}} + P =$$

$$= 0.0015 \cdot 48 - \frac{3.89 \cdot 10^{-6} + 1.44 \cdot 10^{-10}}{1 \cdot 10^{-3}} + 71.95 = 72.01 \text{ кг/год} \quad (3.29)$$

Повна продуктивність $Q = 0,02 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$

3.1.3 Розрахунок потужності приводу

Вихідні дані для розрахунку потужності приводу екструзійної машини зведені в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3

Вихідні дані для проектування

| | |
|---|-----------------------------------|
| Масова продуктивність машини | $G=0,02 \text{ кг/с}$ |
| Об'ємна витрата розплаву поліетилену | $V=-87\text{м}$ |
| Тиск в пресі | $P_r = 75\text{МПа}$ |
| Температура матеріалу, що завантажується | $T_1 = 20=293\text{К}$ |
| Температура стінки | $T_{\text{ц}}=250=523\text{К}$ |
| Температура плавлення розплаву | $T_{\text{пл}}= 140 =413\text{К}$ |
| Діаметр осердя черв'яка на початку зони дозування | $D_n= 0,081\text{м}$ |
| Діаметр осердя черв'яка в кінці зони дозування | $D_z= 0,11\text{м}$ |
| Глибина каналу на початку зони дозування | $H_n = 0,01475\text{м}$ |
| Глибина каналу в кінці зони дозування | $H_z =0,0075\text{м}$ |
| Середнє значення глибини нарізки в зоні подачі | $H_{\text{ср}}=0,22 \text{ м}$ |
| Довжина зони дозування черв'яка | $L_{\text{дз}}=0,45 \text{ м}$ |

Корисна потужність, що споживається в черв'ячній машині на процес перероблення ПВХ матеріалу [11]:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + N_r \quad (3.30)$$

де N_1 – відносно мала потужність якою ми нехтуємо

$$N_2 = N_2' + N_2'' \quad (3.31)$$

N_2' – потужність, що споживається на тертя та втрату енергії між силовим циліндром та площею поверхні.

N_2'' – потужність, яка споживається у зазорі між гребенем та циліндром витка.

$$N_2'' = \mu_{\text{еф}} \cdot \Delta W_{np}^2 \cdot \frac{T - TE}{2 \cdot \Delta O \cdot \text{tg} \varphi} \cdot L_2 \quad (3.32)$$

W_{np} швидкість руху пробки твердої фази циліндра вздовж стінки циліндра:

$$\begin{aligned} \Delta W_{np} &= \sqrt{\left((\pi \cdot D \cdot N - W_{np} \cdot \cos \varphi)^2 + (W_{np} \cdot \cos \varphi)^2 \right)} = \\ &= \sqrt{\left((3,14 \cdot 0,125 \cdot 0,83 - 0,0566 \cdot 0,9768)^2 + (0,0566 \cdot 0,9768)^2 \right)} = 0,27 \end{aligned} \quad (3.33)$$

де $W_{np} = \frac{G}{\rho_H \cdot B \cdot H_{1cp}} = \frac{0,02}{1300 \cdot 0,0184 \cdot 0,01475} = 0,0566 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; $\rho_H = 1300 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ густина

насипного ПВХ матеріалу; B ширина гвинтового каналу:

$$B = t \sin \varphi = 0,086 \sin 12,36 = 0,0184 \text{ м},$$

де $\varphi = 12^\circ 36'$ кут підйому витка.

Ефективна в'язкість визначається середньою температурою пристінного шару та середнім градієнтом швидкості:

$$T_{cm} = \frac{T_y + T_{nl}}{2} = \frac{250 + 140}{2} = 195^\circ\text{C} \quad (3.34)$$

$\gamma = \frac{\Delta W_{np}}{\Delta O}$ середній градієнт швидкості, ΔO товщина шару розплаву над пробкою матеріалу в міжвитковому просторі,

$$\Delta O = \frac{2(I - E)}{\rho_H W_{np} \sin \varphi} \phi \quad (3.35)$$

Параметр ϕ визначаємо:

$$\phi = \frac{\lambda \cdot (T_y - T_{nl})}{C_T \cdot (T_{nl} - T_1) + r_{nl}} = \frac{0,17 \cdot (250 - 140)}{1,29 \cdot (140 - 20)} = 0,121, \quad (3.36)$$

де $\lambda = 0,17 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К}}$ – теплопровідність розплаву ПВХ; $C_m = 1,29 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ – питома теплоємність твердої фази поліетилену, величиною r_{nl} нехтуємо.

Визначаємо величину товщини шару:

$$\Delta O = \frac{2(I-E)}{\rho_H \cdot W_{\text{пр}} \cdot \sin \varphi} \phi = \frac{2(0,086-0,018)}{1300 \cdot 0,0566 \cdot \sin 12,36} 0,121 = 0,00109 \text{ м} \quad (3.37)$$

Середній градієнт швидкості:

$$\gamma = \frac{\Delta W_{\text{пр}}}{\Delta O} = \frac{0,27}{0,00109} = 247,7 \text{ с}^{-1} \quad (3.38)$$

Отже, потужність, яка споживається на тертя у зазорі між циліндром і поверхнею пробки твердого тіла, дорівнює:

$$N'_2 = \mu_{\text{еф}} \cdot \Delta W_{\text{пр}}^2 \cdot \frac{T-TE}{2 \cdot \Delta O \tan \varphi} L_2 = 110 \cdot 0,27^2 \cdot \frac{0,086-0,086 \cdot 0,018}{2 \cdot 0,00109 \tan 12,36} 1,33 = 1,9 \text{ кВт} \quad (3.39)$$

Визначаємо потужність яка витрачається в зазорі між циліндром і гребенем витка:

$$N''_2 = \mu_{\text{еф}} \cdot I \cdot E \cdot L_2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N^2}{2 \Delta \tan \varphi} = 110 \cdot 0,086 \cdot 0,018 \cdot 1,33 \cdot \frac{3,14^2 \cdot 0,125^2 \cdot 0,83^2}{2 \cdot 0,000375 \tan 12,36} = 1,53 \text{ кВт} \quad (3.40)$$

Потужність, що витрачається у зоні дозування:

$$N'_3 = \mu_{\text{еф}} \cdot N^2 \cdot \frac{\pi^3 \cdot (T - I \cdot E) L_2 \cdot \theta_2}{T} \quad (3.41)$$

Коефіцієнт θ визначаємо за формулою:

$$\theta = \frac{\pi^2 \cdot D^2 - 4T^2}{\pi^2} + \frac{[D + D_3]^3 + [D + D_H]^3}{3(D_3 - D_H)} + \frac{2,3 \cdot \pi^2 \cdot D^5}{(T^2 + \pi^2 \cdot D^2) \cdot [H_H - H_3]} = \frac{3,14^2 \cdot 0,125^2 - 4 \cdot 0,086^2}{3,14^2} + \frac{[0,125 + 0,11]^3 + [0,125 + 0,081]^3}{3(0,11 - 0,081)} + \frac{2,3 \cdot 3,14^2 \cdot 0,125^5}{(0,086^2 + 3,14^2 \cdot 0,125^2) \cdot [0,01445 - 0,0075]} = 0,263 + 0,616 = 0,879 \quad (3.42)$$

Тоді потужність

$$N'_3 = \mu_{\text{еф}} \cdot N^2 \cdot \frac{\pi^3 \cdot (T - I \cdot E) L_2 \cdot \theta_2}{T} = 110 \cdot 0,83^2 \cdot \frac{3,14^3 \cdot (0,086 - 1 \cdot 0,018) 1,33 \cdot 0,879}{0,086} = 2,1 \text{ кВт} \quad (3.43)$$

Потужність, що витрачається в зазорі на довжині зони дозування:

$$N_3'' = \mu_{\text{еф}} \cdot I \cdot E \cdot L_2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot N^2}{\Delta \tan \varphi} =$$

$$= 110 \cdot 1 \cdot 0,018 \cdot 1,33 \cdot \frac{3,14^2 \cdot 0,125^2 \cdot 0,83^2}{0,000375 \tan 12,36} = 3,55 \text{ кВт} \quad (3.44)$$

Потужність, яка втрачається в каналі формувальної головки:

$$N_2 = V \cdot P_r = 87 \cdot 10^{-6} \cdot 75 \cdot 10^6 = 6,5 \text{ кВт} \quad (3.45)$$

Загальні втрати потужності в черв'ячній машині складають:

$$N_{\text{інд}} = N_2' + N_2'' + N_3' + N_3'' + N_2 = 1,9 + 1,53 + 2,1 + 3,55 + 6,5 = 15,58 \text{ кВт}$$

Потужність електродвигуна приводу машини:

$$N_E = \frac{N}{\varepsilon} = \frac{15,58}{0,8} = 18,75 \text{ кВт} \quad (3.46)$$

де $\varepsilon = 0,4 \dots 0,8$ – коефіцієнт, що враховує втрати енергії в приводі черв'ячної машини.

Обираємо двигун потужністю $N = 20$ кВт.

3.1.4. Розрахунок тиску, який розвиває «Черв'як екструдера»

Для визначення тиску, що створюється черв'яком проводять спеціальний розрахунок, початкові дані наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Вихідні дані для визначення тиску, що створюється черв'яком

| | |
|------------------------------------|---------------------|
| Встановлена потужність | $N = 20$ кВт |
| Максимальне число обертів черв'яка | $n = 0,83$ |
| Зовнішній діаметр черв'яка | $D = 0,125$ м |
| Внутрішній діаметр черв'яка | $D_v = 0,081$ м |
| ККД приводу екструдера | $\varepsilon = 0,8$ |

Розрахунок проводять починаючи з визначення осьової сили, яку розвиває «Черв'як»:

$$P_z = \frac{19500 \cdot N \cdot \eta \cdot \tan \varphi}{N_1 \cdot D} = \frac{19500 \cdot 20 \cdot 0.8 \cdot \tan 12.36}{0.83 \cdot 0.125} = 629 \text{ кН} \quad (3.47)$$

де $\varphi = 12^\circ 36'$

Питомий тиск що створює «Черв'як»:

$$p = \frac{P_z}{F} = \frac{P_z}{\pi(R^2 - R_B^2)} = \frac{629000}{3.14(0.0625^2 - 0.0405^2)} = 88.7 \text{ МПа} \quad (3.48)$$

Приймаємо розрахунковий тиск рівним $p = 90 \text{ МПа}$.

3.1.5. Розрахунок черв'яка на стійкість та міцність

Черв'як піддається дії осьової сили, яка розвивається внаслідок опору ПВХ матеріалу при проходженні через екструзійну головку. Вихідними даними для розрахунку на стійкість та міцність є:

споживана потужність $N = 20 \text{ кВт}$;

частота обертання черв'яка $n = 48 \text{ об/хв}$;

довжина робочої частини черв'яка $L = 1.56 \text{ м}$;

допустиме напруження розтягу для матеріалу черв'яка (Сталь 40ХН, $\sigma_T = 940 \text{ МПа}$).

Крутний момент, який діє на черв'як:

$$M_{кр} = \frac{9550 \cdot N}{n} = \frac{9550 \cdot 20}{48} = 3980 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.49)$$

Перевіряємо черв'як на стійкість (гнучкість):

$$\lambda = (\mu \cdot L) / I \quad (3.50)$$

де λ – гнучкість черв'яка ; $\mu = 2$ – коефіцієнт, що характеризує спосіб закріплення валу [10] I момент інерції перерізу черв'яка, який визначається за формулою:

$$I = \sqrt{(I_{min} / F)} \quad (3.51)$$

де I_{min} – момент інерції поперечного перерізу черв'яка, що визначається для небезпечних перерізів за формулою:

Переріз 1

$$I_{\min} = \pi(D_{\min}^4 - D_{\text{отв}}^4) / 64 = 3.14(0.081^4 - 0.001^4) / 64 = 0,211 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4 \quad (3.52)$$

де F – площа поперечного перерізу черв'яка, визначена за формулою:

$$F = \frac{\pi(D_{\min}^2 - D_{\text{отв}}^2)}{4} = \frac{3.14(0.081^2 - 0.001^2)}{4} = 0.00514 \text{ м}^2 \quad (3.53)$$

Переріз 2

$$I_{\min} = \frac{\pi(D_{\min}^4 - D_{\text{отв}}^4)}{64} = \frac{3.14(0.082^4 - 0.001^4)}{64} = 0.228 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4 \quad (3.54)$$

$$F = \frac{\pi(D_{\min}^2 - D_{\text{отв}}^2)}{4} = \frac{3.14(0.082^2 - 0.001^2)}{4} = 0.00527 \text{ м}^2 \quad (3.55)$$

Визначаємо момент інерції:

Переріз 1

$$I = \sqrt{\frac{I_{\min}}{F}} = \sqrt{\frac{0,211 \cdot 10^{-6}}{0,00514}} = 0,0202 \text{ м} \quad (3.56)$$

Переріз 2

$$I = \sqrt{\frac{I_{\min}}{F}} = \sqrt{\frac{0,228 \cdot 10^{-6}}{0,00527}} = 0,0207 \text{ м} \quad (3.57)$$

Середня гнучкість черв'яка:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot L}{I} = \frac{2 \cdot 1.56}{0.0204} = 152.94 \quad (3.58)$$

Критична сила:

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{4 \cdot L^2} = \frac{3.14^2 \cdot 2.1 \cdot 10^6 \cdot 0.211}{4 \cdot 1.56^2} = 448798 \text{ Н} \quad (3.59)$$

Переріз 2

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\min}}{4 \cdot L^2} = \frac{3.14^2 \cdot 2.1 \cdot 10^6 \cdot 0.228}{4 \cdot 1.56^2} = 484958 \text{ Н} \quad (3.60)$$

Отже у всіх випадках $P > P_{\text{кр}}$.

Перевіряємо умову стійкості черв'яка:

$$\sigma_{\text{ст}} \leq [\sigma]_y \quad (3.61)$$

Переріз 1

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{P}{F} = \frac{629000}{0,00514} = 122 \text{ МПа} \quad (3.62)$$

Переріз 2

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{P}{F} = \frac{629000}{0,00527} = 119 \text{ МПа} \quad (3.63)$$

Визначаємо допустиме напруження на стійкість:

$$[\sigma]_y = \frac{[\sigma_{\text{ст}}] \cdot \varphi}{n_y} = \frac{290 \cdot 0.76}{1.125} = 196 \text{ МПа} \quad (3.64)$$

де $\varphi = 0,76$ – коефіцієнт зниження напружень; n_y – запас міцності.

$\sigma_{\text{ст}} \leq [\sigma]_y$, $119 \leq 196 \text{ МПа}$ – умова стійкості виконується.

Максимальний згинаючий момент:

$$M_{\text{max}} = (Q \cdot L) / 2 = (38 \cdot 1.755) / 2 = 66.7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (3.65)$$

Момент опору перерізу черв'яка:

$$W = \frac{\pi(D_{\text{min}}^4 - D_{\text{отв}}^4)}{32D} = \frac{3.14(0.082^4 - 0.001^4)}{32 \cdot 0,125} = 3,54 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \quad (3.66)$$

Напруження згину:

$$\sigma_u = M_{\text{max}} / W = 66.7 / 3,54 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 = 18.8 \text{ МПа} \quad (3.67)$$

Еквівалентне напруження:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_u + \sigma_{\text{ст}} = 119 + 18,8 = 137,8 \text{ МПа} \quad (3.68)$$

$$\sigma_{\text{екв}} < [\sigma]_p; \quad 137,8 \text{ МПа} < 196 \text{ МПа}$$

Умова міцності виконується. «Черв'як» з даною геометрією забезпечує критерій надійності за замцністю та стійкістю.

3.1.6 Тепловий розрахунок

Тепловий розрахунок проводять з метою визначення кількості тепла, яке необхідно підвести в зону обробки за рахунок електронагрівачів. Вихідні данні для розрахунку зведенні в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5

Вихідні дані для теплового розрахунку

| | |
|--------------------------------------|---|
| Встановлена потужність | $N = 20$ кВт |
| Початкова температура матеріалу | $T_{\Pi} = 20^{\circ}\text{C} = 293$ К |
| Кінцева температура матеріалу | $T_{\text{к}} = 140^{\circ}\text{C} = 413$ К |
| Температура поверхні кожуха | $T_{\text{кож}} = 45^{\circ}\text{C} = 318$ К |
| Температура навколишнього середовища | $T_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C} = 293$ К |
| Продуктивність машини | $G_{\text{м}} = 72$ кг/год |
| Ширина теплообмінної поверхні | $B = 0,23$ м |
| Довжина теплообмінної поверхні | $L = 1,33$ м |
| ККД приводу екструдера | $\eta_1 = 0,7$ |
| ККД електродвигуна | $\eta_2 = 0,86$ |

Тепловий баланс процесу

$$Q_n + Q_{q1} = G_{\text{м}} \cdot C_{\text{м}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}) + Q_{\text{втр}} \quad (3.69)$$

де Q_n – кількість тепла, яке виділяється в ході технологічного процесу:

$$Q_n = 860N\eta_1\eta_2 = 860 \cdot 20 \cdot 0,7 \cdot 0,86 = 10715 \frac{\text{Дж}}{\text{год}} \quad (3.70)$$

де $Q_{\text{втр}}$ – втрати тепла в оточуюче середовище:

$$Q_{\text{втр}} = Q_{\text{к}} + Q_{\text{випр}} \quad (3.71)$$

де $Q_{\text{к}}$ – втрати тепла в оточуюче середовище конвекцією:

$$Q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} \cdot F(T_{\text{кож}} - T_{\text{в}}) \quad (3.72)$$

де F – теплообмінна поверхня екструдера

$$F = B \cdot L = 0,23 \cdot 1,33 = 0,306 \text{ м}^2 \quad (3.73)$$

де $\alpha_{\text{к}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від стінки корпусу в оточуюче середовище, визначений за формулою:

$$\alpha_k = \frac{N_u \cdot \lambda_m}{H} \quad (3.74)$$

де N_u – критерій Нуссельта, λ_m – коефіцієнт теплопровідності при середній температурі.

Критерій Нуссельта визначається за формулою:

$$N_u = C \cdot (G_r \cdot P_r)_m^n \quad (3.75)$$

де G_r – критерій Грасгофа, визначений за формулою:

$$G_r = \frac{\beta \cdot B^3 \cdot g \cdot \Delta T}{\mu^2} \quad (3.76)$$

Розрахункова температура:

$$T_P = \frac{(T_{\text{кож}} + T_B)}{2} = \frac{(45 + 20)}{2} = 32.5 \text{ } ^\circ\text{C} = 305.5 \text{ K} \quad (3.77)$$

Знаходимо значення теплофізичних параметрів та критерієв подібності при розрахунковій температурі:

$$\lambda_m = 9.6 \frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C}} \text{ – коефіцієнт теплопровідності;}$$

$$\mu = 16.48 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \text{ – коефіцієнт кінематичної в'язкості;}$$

$$P_r = 0,3 \text{ – критерій Прандтля.}$$

За формулою (3.76) знаходимо критерій Грасгофа:

$$G_r = \frac{\beta \cdot B^3 \cdot g \cdot \Delta T}{\mu^2} = \frac{1}{293 + 413} \cdot \frac{0.23^3 \cdot 9.8 \cdot (318 - 293)}{(16.48 \cdot 10^{-6})^2} = 15,54 \cdot 10^6 \quad (3.78)$$

$$G_r \cdot P_r = 15,54 \cdot 10^6 \cdot 0.3 = 4,66 \cdot 10^6 \quad (3.79)$$

Визначаємо Критерій Нуссельта:

$$N_u = C \cdot (G_r \cdot P_r)_m^n = 0.54 \cdot (4,66 \cdot 10^6)^{\frac{1}{4}} = 25,08 \quad (3.80)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки корпусу в оточуюче середовище:

$$\alpha_k = \frac{N_u \cdot \lambda_m}{F} = \frac{25,08 \cdot 9,6}{0.306} = 7.9 \cdot 10^2 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C}} \quad (3.81)$$

Втрати теплоти в оточуюче середовище конвекцією:

$$Q_k = \alpha_k \cdot F \cdot (T_{\text{кож}} - T_b) = 7.9 \cdot 10^2 \cdot 0.306 \cdot (318 - 293) =$$

$$= \frac{6045 \text{ Дж}}{\text{год}} = \frac{1.68 \text{ Дж}}{\text{с}} \quad (3.82)$$

Втрати теплоти в оточуюче середовище через випромінювання:

$$Q_{\text{випр}} = 4,9 \cdot F \cdot E \cdot \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) =$$

$$= 4,9 \cdot 0,6 \cdot 0,306 \cdot \left(\left(\frac{318}{100} \right)^4 - \left(\frac{293}{100} \right)^4 \right) = 25.72 \frac{\text{Дж}}{\text{год}} \quad (3.83)$$

де $E = 0,6$ степінь чорноти матеріала кожуха.

Втрати тепла в оточуюче середовище визначаємо за формулою (3.71):

$$Q_{\text{втр}} = Q_k + Q_{\text{випр}} = 6045 + 25.72 = 6.07 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{год}} \quad (3.84)$$

Кількість тепла, яка підводиться до корпусу електронагрівачами:

$$Q_{q1} = G_m \cdot C_m \cdot (T_k - T_n) + Q_{\text{втр}} - Q_n =$$

$$= (72 \cdot 2.3 \cdot (413 - 293) + 6.07 \cdot 10^3 - 10,7 \cdot 10^3) =$$

$$= 15,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{год}} \quad (3.85)$$

Щоб забезпечити нагрівання матеріалу при заданих режимах роботи необхідно забезпечити передачу теплової енергії $Q_{q1} = 15,2$ кДж/год.

3.2 Проектування корпусу екструзійної машини

Корпус є ключовим компонентом черв'ячного екструдера і виконує важливі функції. Його основні завдання включають завантаження матеріалу, забезпечення необхідного теплового режиму в усіх технологічних зонах та транспортування підготовленого розплаву до формувальної головки з певним тиском і температурою. В середині корпусу екструдера розташований черв'як, який забезпечує транспортування полімерної сировини.

З боку приводу черв'яка до корпусу приєднаний завантажувальний пристрій та вузол упорного підшипника, який сприймає осьові зусилля від екструдованого матеріалу. Корпус повинен витримувати внутрішній тиск, який може досягати значних значень, забезпечувати зносо та корозійну стійкість по

внутрішній робочій поверхні, а також ефективно проводити тепло від нагрівальних елементів в робочу зону, до розплаву матеріалу під час нагріву, а також відводити зайве тепло під час охолодження.

Зазвичай корпус черв'ячного екструдера має форму товстостінного циліндра з визначеним внутрішнім діаметром, який є базовим параметром екструзійної машини. Корпус може бути суцільним або складеним, як в радіальному, так і в повздовжньому напрямку.

Під час експлуатації екструдера відбувається процес зношування внутрішньої робочої поверхні корпусу. З метою збільшення терміну експлуатації корпусу, його виготовляють складеним. Зовнішній товстостінний циліндр виготовляють з вуглецевої сталі (Сталь 20, Сталь 45 тощо) в середині якого встановлена термооброблена гільза з високоякісної легованої сталі (38X2MЮА, 1X17H2, 9X18, тощо).

Сучасні конструкції екструзійних машин використовують циліндри без гільз з наплавленням на внутрішній поверхні зносостійкого покриття.

На зовнішній поверхні корпусу екструдера розміщують електронагрівачі. Для відводу тепла від корпусу використовують водяні або повітряні системи охолодження. Водяне охолодження забезпечують шляхом створення на поверхні корпусу спіральних канавок для циркуляції охолоджуючої рідини, які закривають кожухом. При повітряному охолодженні на зовнішній поверхні корпусу виконують концентричні або повздовжні канавки для збільшення площі теплообміну. Контролювання температури зовнішньої поверхні корпусу здійснюється за допомогою термопар. Корпуси зазвичай виготовляють у вигляді блоків складених по довжині з використанням фланцевих з'єднань. Частину корпусу, яка включає завантажувальну лійку, іноді називають корпусом завантажувальної лійки (воронка). Завантажувальні лійки бувають різних конструктивних виконань і можуть розташовуватись як вздовж осі циліндра так і зміщені в бік обертання черв'яка для поліпшення умов завантаження. Розміри і конструкція завантажувальної лійки визначаються фізичними властивостями перероблюваного полімеру та конструктивними параметрами машини. В зоні завантаження, необхідно активно здійснювати

процес охолодження для поліпшення умов завантаження та запобігання проникненню розплавленого матеріалу в вузол упорного підшипника. Як правило в даній області корпусу встановлюється оболонка або спіральний канал для забезпечення водяного охолодження.

З'єднання корпусу з формувальною головкою та вузлом упорного підшипника забезпечується за допомогою фланців.

Розрахунок корпусу екструдера проводять за методикою розрахунку товстостінних циліндрів.

На корпус екструдера чинять вплив такі навантаження:

- 1) Крутний момент ;
- 2) Розтягувальна осьова сила ;
- 3) Внутрішній тиск ;
- 4) Напруження по товщині стінки від перепаду тисків та температур.

В зоні завантаження корпус розраховують враховуючи дію осьової сили та крутного моменту (внутрішній тиск та перепад температур незначні). Осьову силу розраховують за формулами (3.86), (3.87) і приймають більше значення.

$$Q_{oc} = \frac{\pi D_B^2}{4} P \quad (3.86)$$

$$Q_{oc} = \frac{2M_{кр}}{D_B} \tan \varphi \quad (3.87)$$

де D_B – внутрішній діаметр корпусу екструдера, м; P – внутрішній тиск, Па; $M_{кр}$ – крутний момент, Н м; φ – кут підйому нарізки черв'яка .

Напруження від осьової сили (Па)

$$\sigma_z = \frac{Q_{oc}}{S} \quad (3.88)$$

де S – площа перерізу корпусу, м²,

$$S = \frac{\pi}{4} (D_3^2 - D_B^2) \quad (3.89)$$

де D_3 – зовнішній діаметр корпусу, м.

Максимальний крутний момент (Н·м), що діє на корпус, визначається за формулою (3.90)

$$M_{max} = 30N/\pi n \quad (3.90)$$

де N – потужність, яка споживається черв'яком, Вт; n – швидкість обертання черв'яка, об/хв.

Значення крутного моменту в будь якому поперечному січені циліндра:

$$M = \frac{M_{max} x}{L} \quad (3.91)$$

де x – відстань від головки до перерізу, що розглядається, м; L – довжина корпусу, м.

Для розрахункового перерізу визначаємо дотичне напруження від дії крутного моменту:

$$\tau = \frac{M}{W} \quad (3.92)$$

де W – момент опору розрахункового перерізу корпусу (m^3), який визначається за формулою:

$$\tau = \frac{\pi D_3}{16} (1 - \alpha^4) \quad (3.93)$$

де $\alpha = \frac{D_6}{D_3}$

Еквівалентне напруження:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_z^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma] \quad (3.94)$$

В зоні дозування крутний момент значно менший від крутного моменту в зонах завантаження та пластикації, яким можна знехтувати. Розрахунок проводять для перерізу з максимальним внутрішнім тиском, розтягувальної осьової сили та температурних напружень. Схема розрахунку буде залежати від конструкції корпусу.

При вторинній переробці полімерів найбільший внутрішній тиск в корпусі екструдера приймають рівним $P=50$ МПа під дією якого виникають радіальні, тангенціальні та осьові напруження.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) P \\ \sigma_\theta &= \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) P \\ \sigma_z &= \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} P \end{aligned} \right\} \quad (3.95)$$

де r_1 і r_2 – внутрішній і зовнішній радіус корпусу, відповідно, м; r – поточний радіус, м.

Розподіл тангенціальних і радіальних напружень по товщині стінки корпусу нерівномірний (рис.3.2).



Рисунок 3.2 Розподіл тангенціальних і радіальних напружень по товщині стінки корпусу

Враховуючи, що σ_z залишаються незмінними по товщині, радіальні σ_r і тангенціальні σ_θ напруження мають найбільші за модулем значення по внутрішній поверхні:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -P \\ \sigma_\theta &= \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} P \\ \sigma_z &= \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} P = const \end{aligned} \right\} \quad (3.96)$$

Напруження від перепаду температур ΔT у корпусі визначають за формулами (3.97):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{Ea\Delta T}{2(1-\mu)\ln\frac{r_2}{r_1}} \left[\ln\frac{r_2}{r} + \frac{r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right) \ln\frac{r_2}{r_1} \right] \\ \sigma_\theta &= -\frac{Ea\Delta T}{2(1-\mu)\ln\frac{r_2}{r_1}} \left[1 - \ln\frac{r_2}{r} - \frac{r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right) \ln\frac{r_2}{r_1} \right] \\ \sigma_z &= -\frac{Ea\Delta T}{2(1-\mu)\ln\frac{r_2}{r_1}} \left[1 - \ln\frac{r_2}{r} - \frac{2r_1^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \ln\frac{r_2}{r_1} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.97)$$

Аналіз показує, що на внутрішній поверхні корпусу $\sigma_r = 0$, $\sigma_z = \sigma_\theta$ і є найбільшими за модулем (розподіл температурних напружень наведено на (рис.3.3.)).

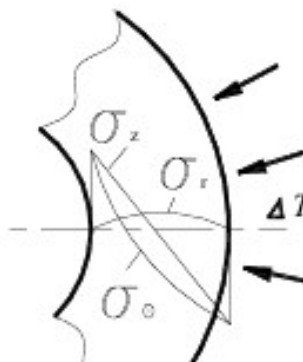


Рисунок 3.3 Розподіл температурних напружень по товщині стінки корпусу

Враховуючи вплив багатовекторних зусиль, що діють на корпус напруження однакових напрямків від дії різних зусиль можна записати наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_r^P + \sigma_r^T \\ \sigma_\theta &= \sigma_\theta^P + \sigma_\theta^T \\ \sigma_z &= \sigma_z^P + \sigma_z^T \end{aligned} \right\} \quad (3.98)$$

Еквівалентні напруження за Мізісом становлять:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2} \quad (3.99)$$

Працездатність корпусу визначається коефіцієнтом запасу міцності, який знаходиться в межах 2...4.

$$n = \frac{\sigma_\tau}{\sigma_{екв}} \geq [n] \quad (3.100)$$

де σ_τ – границя плинності, МПа.

Товщини стінок корпусу проектують не лише з умов міцності, а й рівномірного розподілення температурного поля по довжині при підведенні необхідної кількості теплоти в робочу зону екструдера. Тому дійсний коефіцієнт запасу міцності може перевищувати допустимий.

3.3 Дослідження експлуатаційних властивостей корпусу екструдера в середовищі програмного комплексу ABAQUS

Вихідними даними для проектування корпусу виступають діаметр та довжина шнека, робочі зусилля та інші конструктивно-технологічні параметри екструзійної машини.

Для перевірки корпусу на міцність, створену модель в програмному середовищі solidworks імпортують в abaqus. 3D модель корпусу наведено на рис.3.4.

За допомогою умовних перерізів імітуємо робочі зони по довжині корпусу (рис.3.5)

рпусу матиме вигляд.

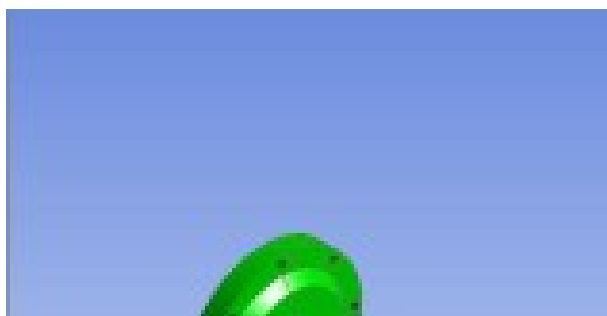


Рисунок 3.4 3D модель корпусу екструдера

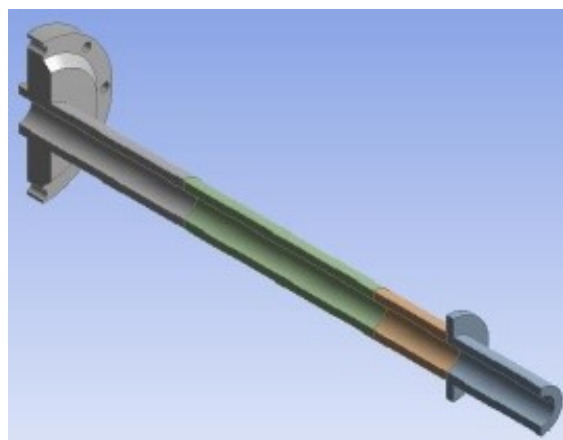


Рисунок 3.5 Зони корпусу екструдера

Для дослідження впливу температури на внутрішні напруження проводимо температурний аналіз. Кожному умовному перерізу по довжині задаємо параметр температури в зоні нагріву і навколишнього середовища, (рис.3.6).

Для дослідження впливу робочого тиску на формування напружень, в умовних перерізах імітуємо навантаження стінки корпусу робочими тисками 70 МПа, (рис.3.7) та призначаємо тип закріплення, залишаючи корпус ступеней вільності.

ВІЛЬНОСТІ.

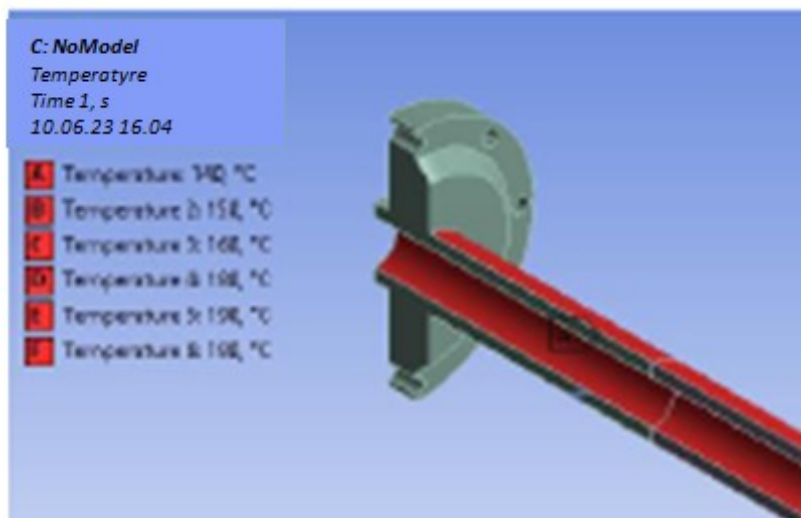


Рисунок 3.6 Задання температур

Рисунок 3.6 Задання тем

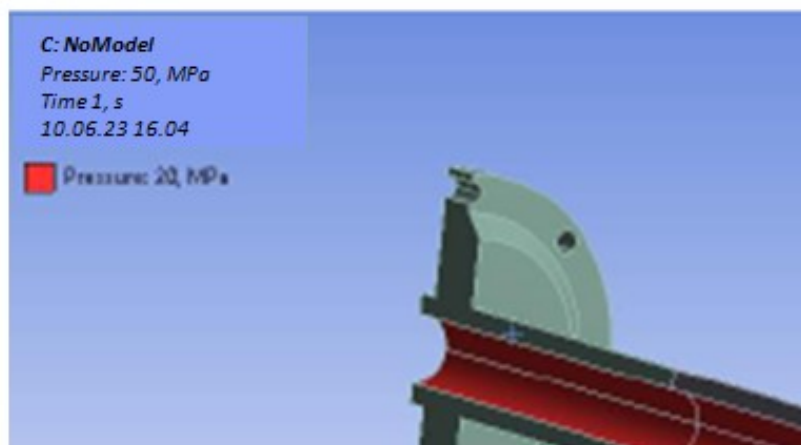


Рисунок 3.7 – Задання тиску конструкції корпусу

Результати розрахунків відображено на рисунках 3.8 3.10.

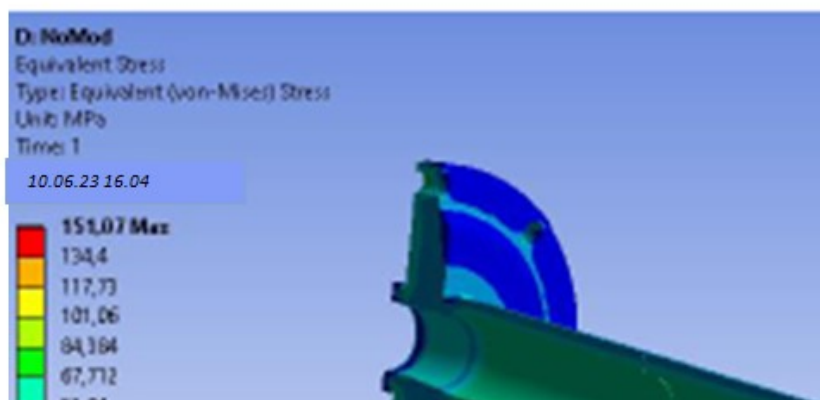


Рисунок 3.8– Еквівалентні напруження

Рисунок 3.8– Еквівалентні на



Рисунок 3.9 – Переміщення

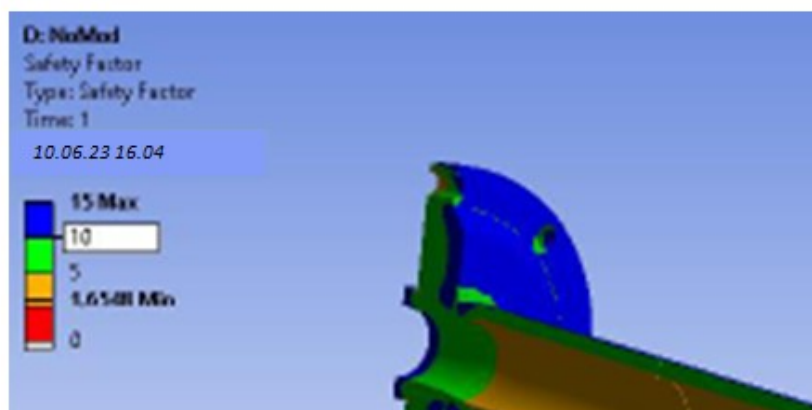


Рисунок 3.10 – Запас міцності

Аналіз результатів експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання показав, що вплив заданих температур на внутрішні напруження незначний. Натомість вплив тиску призводить до наростання внутрішніх напружень по довжині корпусу в напрямку екструзійної головки. Дослідження конструкції на циклічну витривалість та міцність показали, що запас міцності лежить в межах від 1,65 до 5.

Висновки до третього розділу

Проведено розрахунок конструктивно-технологічних параметрів робочих органів екструзійної машини. Встановлено взаємозв'язок фізико-механічних властивостей ПВХ матеріалів з геометричними параметрами «Червяка екструдера». Проведено тепловий розрахунок процесу екструзії. Проведено енерго-силовий розрахунок екструзійної машини.

Запропоновано конструктивні параметри робочих органів екструзійної машини для переробки ПВХ відходів.

Проведено дослідження експлуатаційних властивостей корпусу екструдера в середовищі програмного комплексу ABAQUS

4. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

4.1 Екструзійна машина для вторинної переробки ПВХ

На основі аналізу та отриманих результатів досліджень запропоновано екструзійну машину для вторинної переробки ПВХ (рис.4.1).

Екструзійна машина містить станину 1 на якій встановлено приводний двигун 4 та редуктор 5. Корпус 2 з черв'яком 8 та формуючою головкою 9 в зборі прикріплюється до редуктора за допомогою фланця. Редуктор виконано разом з вузлом упорного підшипника куди встановлюється черв'як 8 хвостовою частиною. Передня частина корпусу 2 за допомогою кронштейна кріпиться до станини 1. До корпусу 2 кріпиться завантажувальний бункер 3 з механізмом подачі сировини та елементами підігріву (не показано). На корпусі 2 встановлено нагрівальні елементи 7, а також охолоджувальний вентилятор 6. Параметри технологічного процесу задаються і підтримуються системою автоматичного керування (не показано).

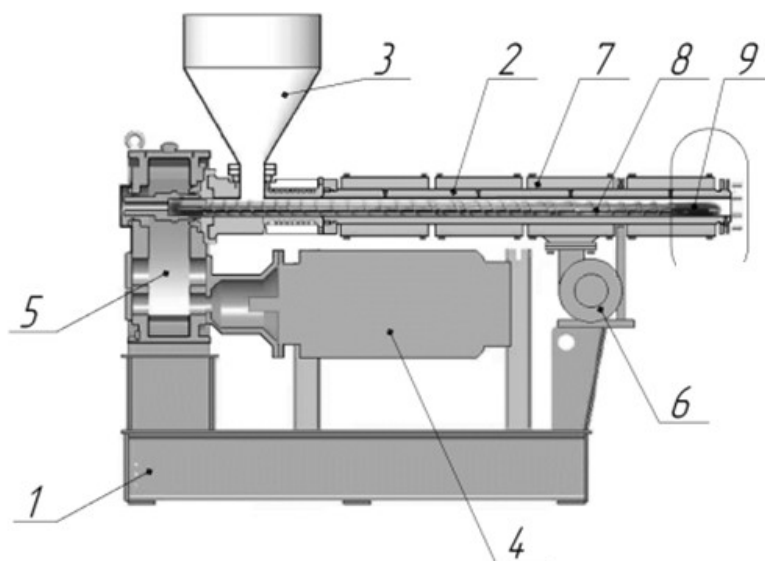


Рисунок 4.1 – Схема екструзійної машини

1– станина; 2–корпус; 3–завантажувальний бункер; 4–електродвигун; 5–редуктор; 6–вентилятор охолодження; 7–нагрівальний елемент; 8–черв'як; 9–формуюча (екструзійна) головка

В екструзійної машини застосовується черв'як спеціальної конструкції, який здатний на високому рівні забезпечувати процеси диспергування, дегазації та гомогенізації розплаву, що значно розширює технологічні можливості з переробки полімерів.

Основні параметри екструзійної машини вторинної переробки ПВХ зведені в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

Параметри екструзійної машини

| | |
|--|---------------|
| Частота обертання шнека, об/хв | 48 |
| Діаметр шнека, мм | 125 |
| Відношення довжини шнека до діаметра | 14 |
| Потужність електропривода, кВт | 20 |
| Потужність електрообігрівача, кВт | 7 |
| Температура в зоні нагріву, °С | 120...280 |
| Температура підігріву в бункері, °С | 20...60 |
| Кількість зон нагріву | 4 |
| Матеріал черв'яка | Сталь 40ХН |
| Максимальний тиск у зоні екструзійної головки, МПа | до 70 |
| Продуктивність, кг/год | 70...100 |
| Фракція перероблюваного матеріалу, мм | до 10х10х10 |
| Габарити АхВхН, мм | 900х2800х1700 |
| Вага з електрообладнанням, кг | 1700 |

4.2 Проектування шнека екструдера

На рисунку 4.2 представлено проектний ескіз черв'ячного вала з диспергуючим елементом 6 та з заниженим діаметром осердя 5 для забезпечення процесу дегазації.

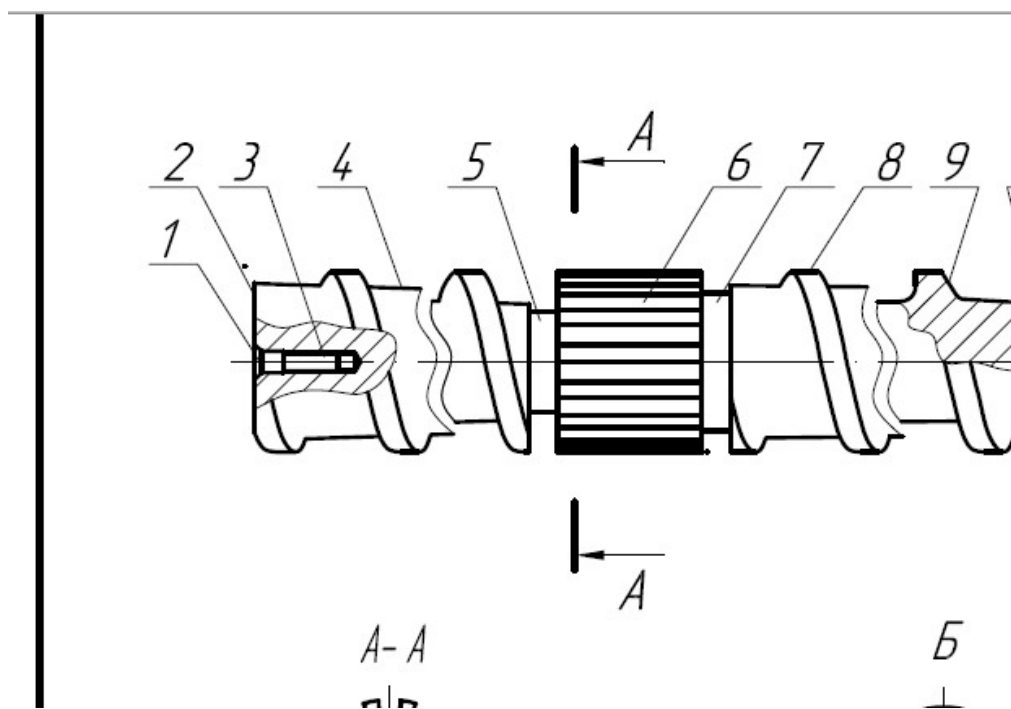


Рисунок 4.2 – Оброблювані поверхні деталі

Деталь "Черв'як" – формується із зовнішніх циліндричних поверхонь, гелікоїдної нарізної (спіральної) частини, внутрішнього квадрата, центрувальних отворів, обмежених торцевими поверхнями. Черв'ячні вали такої конструкції використовують як робочі органи в екструзійних машинах з переробки полімерів. В процесі експлуатації деталь знаходиться під дією крутного моменту, що передається від привода машини та значних знакозмінних навантажень. Передача крутного моменту забезпечується завдяки хвостовій частини "Черв'яка", що з'єднується з приводним валом по поверхні 16 (квадратне заглиблення в хвостовій частині вала).

Базування черв'ячного вала в корпусі екструдера забезпечується зовнішнім діаметром гвинтової та циліндричної поверхонь 8, 12. Радіальне биття поверхонь 4, 6, 8 не повинно перевищувати 0,03 мм.

Кут спинки гвинтової поверхні спіралі не більше 30 градусів. Радіуси перехідних ділянок між кінцевою поверхнею 4 і гвинтовою поверхнею 8 прийняти не менше 7 мм. Технологічні параметри поверхонь деталі (рис.4.2) зведені в таблицю 4.2.

Технологічні параметри поверхонь деталі

| № п/п | Назва поверхні | Номинальний розмір, мм | Точність (квалітет), IT | Шорсткість, Ra, мкм | Інші технічні умови |
|-------|------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | Центр. отв. | | h14 | 3,2 | База А |
| 2 | Торець | Ø125 | h14 | 6,3 | |
| 3 | Різь | M14x1,5 | 7H | 3,2 | |
| 4 | Конічна поверхня | | h12 | 1,6 | |
| 5 | Канавка | Ø80,5 | h8 | 6,3 | |
| 6 | Пази 15 шт | Ø125 | P9 | 3,2 | |
| 7 | Канавка | Ø106 | h8 | 6,3 | |
| 8 | Зовн поверхня спіралі | Ø125 | h7 | 0.32 | |
| 9 | Перехідний радіус | R7 | | 3,2 | |
| 10 | Перехідний радіус | R10 | | 3,2 | |
| 11 | Спинка спіралі | 30° | -0,1 | 0,8 | |
| 12 | Циліндрична поверхня | Ø125 | h8, ±0,05) | 3,2 | |
| 13 | Торець | Ø125 | H14 | 6,3 | |
| 14 | Центр. отв | 60° | | 3,2 | База А |
| 15 | Торець внутрішнього квадрата | | | | |
| 16 | Квадрат | 75H8x75H8 | | 6,3 | |

Технічне креслення деталі «Черв'як екструдера» наведено в додатку А.

4.3 Проектування верстатного пристрою

4.3.1 Вибір схеми базування та настановчих елементів

Вибираємо схему базування [6] для оброблення торців, центрування отворів, фрезерування внутрішнього квадрату 75x75H7 та отвору Ø12,5мм (M14x1,5) з торців. За такої схеми базування, заготовка встановлюється на зовнішню циліндричну поверхню Ø130 мм з упором в торець. Схема базування заготовки наведена на рис. 4.3.

Циліндрична поверхня лишає заготовку 4-х степенів вільності. Для забезпечення базування встановлюємо плоский упор до лівого торця деталі і ліквідуємо ще одну степінь вільності.

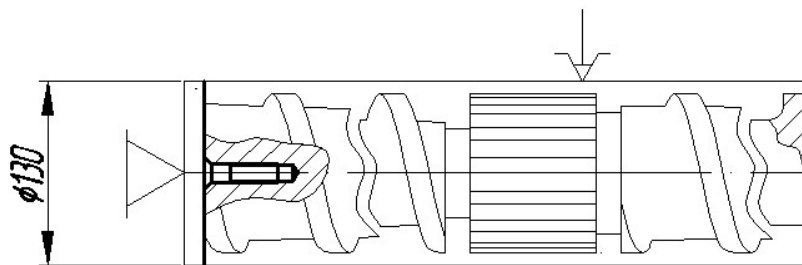


Рисунок 4.3 Схема базування заготовки черв'яка

Заготовка базується по зовнішній циліндричній поверхні $\text{Ø}130$ мм в установочних призмах з кутом $2\alpha = 90^\circ$, а по торцю циліндричним упором, що має плоску поверхню.

Пристрій для обробки торця заготовки складається з базової прямокутної пластини розмірами $1600 \times 400 \times 60$ мм із Т – подібними пазами шириною 20мм. На площині плити за допомогою настановчих пазових болтів в пазах встановлюються та закріплюються дві призми, та упор. Для затиску заготовки використовується плоский прихват, який може переміщатися вздовж шпильки і фіксується гайкою. При закручуванні гайки, плоский затиск опирається на деталь та здійснює затиск. При відкручуванні гайки, деталь звільняється, плоский затиск повертається у початкове положення під дією циліндричної пружини.

4.3.2. Розрахунок пристрою на точність

При обробці центральних отворів з торця, а також фрезеруванні квадрата 75×75 мм використовуємо пристрій, що дозволяє провести обробку центральних отворів та внутрішнього квадрата з одного установка, з мінімальною похибкою розташування поверхонь. Особливою умовою є досягнення точності розташування центральних отворів відносно осі заготовки та квадрата.

Для забезпечення заданої точності оброблення у пристрої має виконуватись умова:

$$\varepsilon_{\text{доп.}} \geq \varepsilon_y, \quad (4.1)$$

є ε_y – похибка встановлення заготовки в пристрій; $\varepsilon_{\text{доп.}}$ – допустима сумарна похибка оброблення:

$$\varepsilon_{\text{доп.}} = T - k \cdot \omega; \quad (4.2)$$

де T – допуск на розмір по довжині розміщення отвору, $T = 200$ мкм;
 ω – точність оброблення, що забезпечує горизонтально-розточувальний верстат мод. 2А635, $\omega = 0,01$ мм; k – коефіцієнт поправки на точність оброблення, $k = 1,0 \dots 1,1$ [11]. Приймаємо $k = 1,1$.

$$\text{Тоді: } \varepsilon_{\text{доп.}} = 200 - 1,1 \cdot 10 = 189 \text{ мкм}$$

Обробка отвору $\varnothing 12,5$ (М14х1,5) виконується на глибину 70 мм. Якщо технологічна та вимірювальна бази співпадають, то $\varepsilon_y = \varepsilon_{\delta} = 0$;

Тоді $\varepsilon_{\text{доп.}} \geq \varepsilon_y$ ($189 > 0$), умова виконується, а точність обробки забезпечується.

4.3.3. Розрахунок сили затиску пристрою

Схема сил, що діють на заготовку при затиску, відображена на рис. 4.4.

При свердлуванні отвору $\varnothing 12,5$ мм на заготовку діють: момент різання M_P ; сила різання осьова P_o , момент сил тертя M_{T1} між циліндричною поверхнею заготовки та опорною поверхнею плоского затиску; моменти сил тертя M_{T2} , що виникають на бокових поверхнях призм між циліндричною поверхнею заготовки та опорними поверхнями призм.

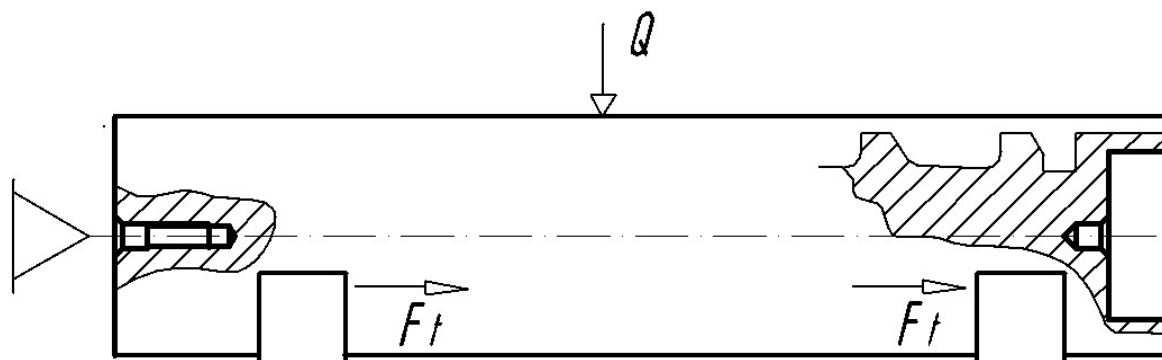


Рисунок 4.4 – Схема прикладання сил затиску

Під дією суми всіх сил та моментів заготовка повинна знаходитись у положенні рівноваги:

$$M_{T1} + M_{T2} \geq kM_p, \quad (4.3)$$

де M_{T1} – момент тертя, що виникає на циліндричній поверхні заготовки, який розраховується за формулою:

$$M_{T1} = F_{T1} \cdot \frac{D}{2}, \quad (4.4)$$

де D – діаметр заготовки, $D=130$ мм; F_{T1} – сила тертя, що виникає між циліндричною поверхнею заготовки та плоскою поверхнею затиску, Н м:

$$F_{T1} = (Q + P_o) \cdot f_1; \quad (4.5)$$

$f_1=0.1$ – коефіцієнт тертя, що діє на поверхні затиску; P_o – сила різання, що виникає вздовж вісі, при свердлуванні $P_o = 346,5$ Н, тоді:

$$M_{T1} = (Q + P_o) \cdot f_1 \cdot \frac{D}{2}, \quad (4.6)$$

M_{T2} – момент тертя на поверхнях призми, знаходимо за формулою:

$$M_{T2} = 4F_{T2} \cdot \frac{D}{2}, \quad (4.7)$$

де F_{T2} – сила тертя, що діє на опорній поверхні призми,

$$F_{T2} = f_2 \left(\frac{Q + P_o}{2} \cdot \frac{\cos \alpha / 2}{2} \right), \quad (4.8)$$

$f_2 = 0.1$ – коефіцієнт тертя на опорній поверхні призми, [13].

Тоді:

$$M_{T2} = 4 \left(f_2 \cdot \frac{Q + P_o}{2} \cdot \frac{\cos \alpha / 2}{2} \right) \cdot \frac{D_1}{2}, \quad (4.9)$$

k – коефіцієнт запасу, [13], с.266

Коефіцієнт запасу визначається із формули:

$$k = k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6, \quad (4.10)$$

де k_0 – гарантований коефіцієнт запасу, $k_0 = 1,5$; k_1 – коефіцієнт стану технологічної бази, $k_1 = 1,0$ [13]; k_2 – коефіцієнт, що враховує збільшення сили різання від спрацювання ріжучого інструменту, $k_2 = 1,0$ [13]; k_3 – коефіцієнт, враховує умови обробки; $k_3 = 1,00$ [13], с.267; k_4 – коефіцієнт, що враховує похибку затискного пристрою, $k_4 = 1,0$ [13], с.268; k_5 – коефіцієнт, що враховує зручність положення рукояток керування упристрою; $k_5 = 1,0$ [13], с.268 k_6 – коефіцієнт, що залежить від моментів, які повертають заготовку відносно опор, $k_6 = 1,2$ [13],

$$k = 1,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,05 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,2 = 1,8.$$

M_p – момент різання при свердлуванні отвору $\varnothing 12,5$ мм, $M_p = 5,85$ Н м.

$$(Q + P_o) \cdot f_1 \cdot \frac{D}{2} + 4 \left(f_2 \cdot \frac{Q + P_o}{2} \cdot \frac{\cos \alpha / 2}{2} \right) \cdot \frac{D_1}{2} \geq k M_p \quad (4.11)$$

Зусилля затиску Q :

$$Q = \frac{(2kM_p / D - P_o)(f_1 + 2f_2 \cdot \cos \alpha / 2)}{(f_1 + 2f_2 \cdot \cos \alpha / 2)} = \quad (4.12)$$

$$\frac{(2 \cdot 1,8 \cdot 5,85) / 0,013 - 346,5 \cdot (0,1 + 2 \cdot 0,1 \cdot \cos 45^\circ)}{0,13 \cdot (0,1 + 2 \cdot 0,1 \cdot \cos 45^\circ)} = 1438 \text{ Н.}$$

Зусилля затиску W утворюється плоским затиском, який переміщується вниз по циліндричній поверхні шпильки при загвинчуванні гайки. Схема механізму затиску показана на рисунку 4.5.

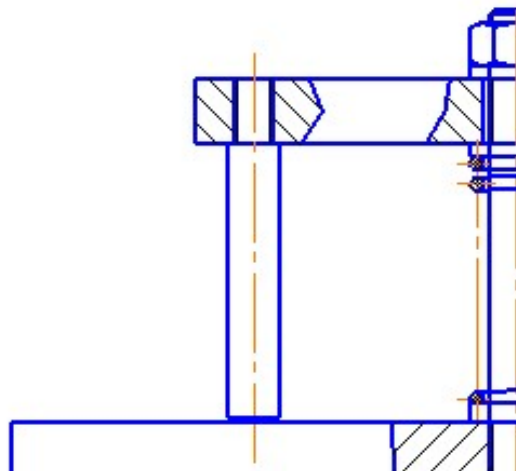


Рисунок 4.5 – Схема механізму затиску

Крутний момент, що виникає на гайці, розраховується за формулою:

$$M = (W \cdot \frac{l_1 + l_2}{l_2} + q) \cdot \frac{d_{cp}}{2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}), \quad (4.13)$$

де l_2, l_1 – плечі важеля, приймаємо $l_1 = 90$ мм, $l_2 = 90$ мм; $\alpha = 20^\circ$;

q – зусилля зворотної пружини, що повертає плоский затиск у початкове положення, приймаємо $q = 200$ Н; d_{cp} – середній діаметр різьби, $d_{cp} = 20$ мм;

α – кут підйому різьби, $\alpha = 2^\circ 56'$; φ_{np} – кут тертя в різьбі, $\operatorname{tg} \varphi_{np}$ коефіцієнт тертя приведений для профілю метричної різьби, $\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{np}) = 0,1521$ [12];

$Q = W = 1438$ Н.

Тоді:

$$M = (1438 \cdot \frac{90 + 90}{90} + 100) \cdot \frac{20}{2} \cdot 0,1521 = 4526 \text{ Н мм.} \quad (4.14)$$

При стандартній довжині гайкового ключа $L = 250$ мм, зусилля, яке прикладатися до ключа:

$$P = \frac{M}{L} = \frac{4526}{250} = 18,1 \text{ Н} \quad (4.15)$$

4.3.4 Розрахунок елементів пристрою на міцність

Одним з елементів пристрою, який необхідно перевірити на міцність це різьбове з'єднання шпильки.

Умова міцності різьби:

$$\frac{\pi d_1^2}{4} [\sigma_p] = W, \quad (4.16)$$

де d_1 – діаметр різьби внутрішній, $d_1 = 20$ мм; $[\sigma_p]$ – допустиме напруження на розтяг, $[\sigma_p] = 95$ МПа.

$$d_{1\text{розр}} = \sqrt{\frac{4W}{\pi[\sigma_p]}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1438}{3,14 \cdot 95 \cdot 10^6}} = 0,0043 \text{ м.} \quad (4.17)$$

$d_{1\text{розр}} < d_1$ – умова міцності забезпечується.

4.4 Проектування контрольно-вимірювального пристрою

4.4.1 Вибір схеми вимірювання

Згідно технічних вимог до деталі «Черв'як» контролюється радіальне биття циліндричної поверхні $\varnothing 125h7$ відносно бази А – не більше 0,03 мм.

Для контролю відхилення радіального биття вибираємо схему вимірювання, наведену на рис. 4.6.

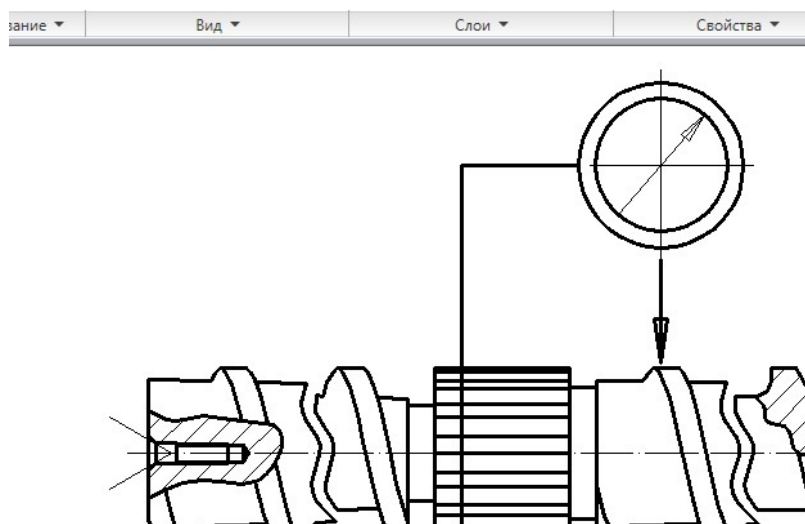


Рисунок 4.6 – Схема контролю радіального биття

Для контролю відхилення радіального биття деталей встановлюється в центра пристрою. До контрольованої поверхні підводиться наконечник індикатора, який закріплюється на стійці. Попередньо індикатор встановлюється на «0». При повороті деталі навколо власної вісі на 360^0 відхилення стрілки індикатора відображає фактичне радіальне биття Δ .

4.4.2 Розрахунок пристрою на точність

Точність контролю радіального биття буде забезпечуватись при виконанні умови: $\varepsilon_{\text{доп}} \geq \varepsilon_{\text{розн.}}$,

де $\varepsilon_{\text{доп}}$ – похибка контролю допустима, $\varepsilon_{\text{доп}} = 0,01$ мм; $\varepsilon_{\text{розн.}}$ – розрахункова похибка контролю, яка визначається за формулою:

$$\varepsilon_{\text{розн.}} = \sqrt{\varepsilon_{\delta}^2 + \varepsilon_{\text{виг}}^2 + \varepsilon_{\text{нр}}^2 + \varepsilon_{\text{зн}}^2}, \quad (4.18)$$

де ε_{δ} – похибка базування деталі, $\varepsilon_{\delta} = 0$; $\varepsilon_{\text{виг}}$ – похибка точності виготовлення пристрою, $\varepsilon_{\text{виг}} = 0,001$ мм; $\varepsilon_{\text{нр}}$ – похибка точності вимірювання пристрою,

$$\varepsilon_{\text{нр}} = \frac{\Delta_i}{2}, \quad (4.19)$$

де Δ_i – ціна поділки індикатора, $\Delta_i = 0,002$ мм;

$$\varepsilon_{\text{нр}} = \frac{0,002}{2} = 0,001 \text{ мм.}$$

$\varepsilon_{\text{зн}}$ – похибка від спрацювання пристрою, $\varepsilon_{\text{зн}} = 0,002$ мм.

$$\varepsilon_{\text{розн.}} = \sqrt{0,005^2 + 0,001^2 + 0,002^2} = 0,0054 \text{ мм}$$

Умова $\varepsilon_{\text{доп}} \geq \varepsilon_{\text{розн.}}$, $(0,01 \geq 0,0054)$ виконується, точність контролю забезпечується.

4.5 Особливості конструювання екструзійних головок

Екструзійні головки складаються із вхідних, розподілювальних каналів та формувальних ділянок (рис. 4.5).

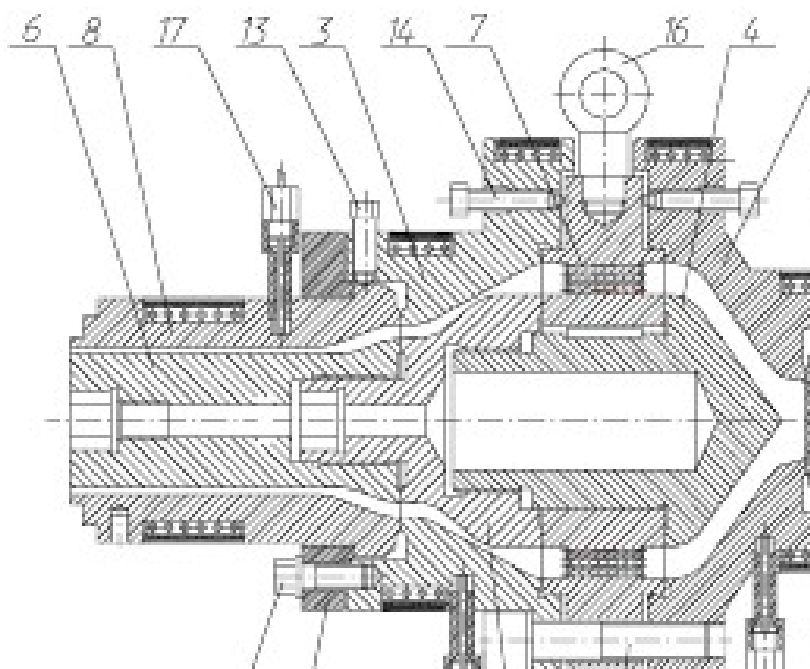


Рисунок 4.5 – Схема конструкції екструзійної головки для ПВХ матеріалів

1 – фланець; 2,3 – частини роз'ємного корпусу; 4 – камера; 5,6 – проміжні елементи; 7 – тримач; 8 – матриця; 9 кульце 10 фільтр; 11 втулка; 12, 14, 15 кріпильні болти; 13 регулювальний болт; 16 рим-болт; 17 термопара; 18 нагрівники

Форма та розміри виробу при екструзійній переробці формуються мундштуком (формуюча матриця). Мундштуки виконують швидкозмінними, що дозволяє швидко переналагоджуватись на інший типорозмір виробу.

На вході в головку встановлюють решітку з пакетом фільтруючих сіток для фільтрування розплаву і створення потрібного перепаду тиску. Мундштук виготовляють з вхідним каналом постійної геометрії для стабілізації течії розплаву полімеру.

Розраховують головки гідравлічним методом (ефективної в'язкості). Спрощений метод ефективної в'язкості, заснований на допущенні подібності

в'язкості на кожній геометрично постійній ділянці каналу, залежно від розрахованої швидкості зсуву на стінці для ньютонівської рідини.

Розрахунок даним методом проводять поетапно:

- 1) канали розбиваються на ділянки з постійною геометрією.
- 2) для кожної ділянки вибирають коефіцієнт геометричної форми K_i (табл. 4.3).
- 3) визначають продуктивність на кожній ділянці спільно з характеристикою екструдера ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$Q = \frac{K \alpha n}{K + \beta + \gamma}, \quad (4.20)$$

де α – коефіцієнт прямого потоку, м^3 ; β – коефіцієнт зворотного потоку, м^3 ; γ – коефіцієнт потоку витоків, м^3 ; K – сумарний коефіцієнт геометричної форми головки, що складається з відповідних коефіцієнтів для кожної геометрично сталої ділянки:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{1}{K} + \frac{1}{K} + \dots}, \quad (4.21)$$

Для z паралельно розташованих каналів, наприклад каналів решітки,

$$K_i = z K_{i1}, \quad (4.22)$$

- 4) Визначення швидкості зсуву на стінці $\dot{\gamma}_i$ для кожної ділянки (табл. 4.3).
Для z паралельно розташованих каналів

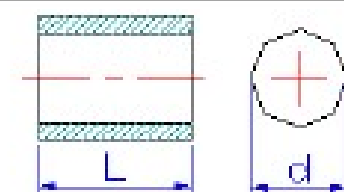
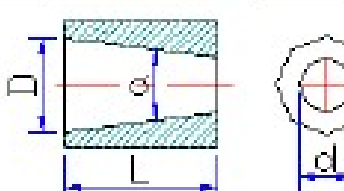
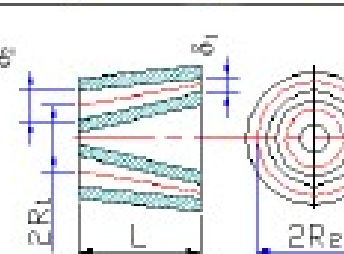
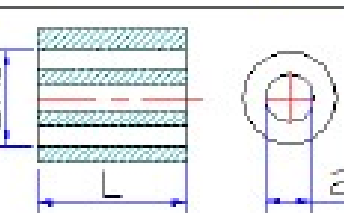
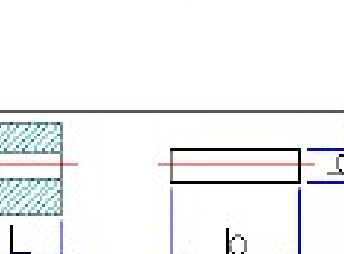
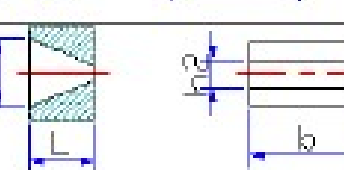

$$\dot{\gamma}_i = \dot{\gamma}_{i1} / z, \quad (4.23)$$

- 5) Для кожної ділянки каналу головки за кривою течії визначають ефективну в'язкість $\mu_{\text{ефі}}$ ($\text{Па}\cdot\text{с}$).

- 6) Визначення перепаду тиску на кожній ділянці з урахуванням в'язкості як функції швидкості зсуву на стінці $\dot{\gamma}$ і температури.

Таблиця 4.3.

Коефіцієнти геометричної форми та швидкості зсуву для ділянок каналів

| Тип каналу | Ескіз | $K, \text{ м}^3$ | |
|---|---|---|------------------|
| Круглий циліндричний |  | $\frac{\pi d^4}{128L}$ | |
| Круглий конічний з великим діаметром на вході |  | $\frac{3\pi D^3 d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)}$ | |
| Конічний кільцевий з конічної щілиною ¹ |  | $\frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6L\omega}$ | $\overline{\pi}$ |
| Круглий кільцевий |  | $\frac{\pi}{8L} \left[R_2^4 - R_1^4 - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \right]$ | $\overline{\pi}$ |
| Плоский щілинний |  | $\frac{bh^3}{12L}$ | |
| Щілинний клиноподібний |  | $\frac{bh_1^2 h_2^2}{6L(h_1 + h_2)}$ | |
| Циліндричний з ловіпльним |  | — | |

Короткі ділянки, такі як скруглення й фаски не розраховують, оскільки їх гідравлічний опір незначний (рис. 4.6).

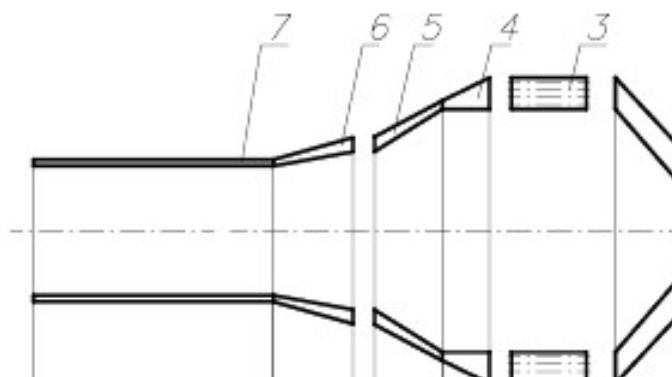


Рисунок 4.6– Схема розбивки каналу головки на ділянки
1,3 решітки; 2,4,5,6 конічні кільцеві ділянки; 7 циліндрична ділянка

Перепад тиску на ділянці, Па

$$\Delta P_i = \frac{Q \mu_{\text{еф}}}{K}, \quad (4.24)$$

де $\mu_{\text{еф}i}$ – ефективна в'язкість на кожній ділянці каналу, Па·с.

Сумарний перепад тиску в головці, Па

$$\Delta P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + 1 \quad (4.25)$$

Висновки до четвертого розділу

На основі аналізу та отриманих результатів досліджень запропоновано екструзійну машину для вторинної переробки ПВХ. Завдяки робочим органам машини, розробленим з урахуванням особливостей процесу переробки ПВХ відходів досягнуто підвищення продуктивності, енергоефективності та якості продукту переробки. Керування та підтримки режимів процесу переробки забезпечується системою автоматизованого керування.

Розроблено конструкцію «Черв'яка екструдера» із диспергуючими елементами, що забезпечує процес гомогенізації на високому рівні.

Запропоновано верстатні та контрольні пристрої для забезпечення технологічного процесу виготовлення деталі «Черв'як екструдера».

5 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Аналіз та оцінка технологічності конструкції деталі «Черв'як екструдера»

При обґрунтованому виборі варіанта технологічного процесу, та технологічного забезпечення, а також правильній підготовці виробництва продукція буде виготовлятися якісною з мінімальними трудовими та матеріальними витратами.

Деталь «Черв'як екструдера» можна вважати технологічною оскільки відноситься до класу валів і має сукупність поверхонь, які можуть бути використані в якості технологічних баз, а їх обробка не вимагає складних спеціально розроблених пристосувань. Деталь відноситься до валів малої жорсткості, оскільки відношення довжини до діаметра $l/d = 1800/125 = 14,4$.

Матеріал деталі – сталь 40ХН ДСТУ 7806: 2015 відноситься до класу нормальної оброблюваності матеріалу ($K_{v\text{ тв. спл}} = 0,6$, $K_{v\text{ шв. ст}} = 0,4$).

Деталь «Черв'як екструдера» складається зі стандартних та уніфікованих конструктивних елементів і містить циліндричну ступінчасту форму, складену з поверхонь обертання різних діаметрів. Має шлицеву фасонну частину і поверхню архімедової спіралі.

Більшість оброблюваних поверхонь деталі мають оптимальну ступінь точності та шорсткості.

Для механічної обробки всіх поверхонь, окрім фасонної гвинтової поверхні застосовуються стандартні ріжучі інструменти.

Зовнішній контур деталі має циліндричну конфігурацію, що забезпечує вільний доступ ріжучого інструмента під час оброблення. Є можливість застосування верстатів з ЧПК та ефективного технологічного обладнання, а також використовувати універсальне технологічне оснащення (люнет).

Контроль поверхонь можна проводити як прямими так і відносними методами вимірювання.

Найвищі вимоги до точності форми та розташування поверхонь, а також їх шорсткості висуваються до зовнішніх циліндричних поверхонь ($\text{Ø}125\text{h}6$), зовнішньої щіцевої поверхні ($\text{Ø}125_{-0,011}$). Параметр шорсткості має бути забезпечений на рівні $Ra\ 0,32$ мкм.

5.1.1 Кількісна оцінка технологічності конструкції

Технологічність конструкції оцінюють кількісною характеристикою за допомогою системних показників, які розраховують наступним чином:

а) коефіцієнт використання матеріалу:

$$K_m = \frac{M_d}{M_z}, \quad (5.1)$$

де M_d – маса деталі, $M_d = 102$ кг; $M_z = 186$ кг – маса заготовки:

$$K_m = \frac{101}{186} = 0,55$$

Зважаючи на коефіцієнт використання матеріалу деталь і заготовку можна вважати технологічними.

б) коефіцієнт точності обробки:

$$K_{mч} = 1 - \frac{1}{T_{cp}}, \quad (5.2)$$

де T_{cp} середній коефіцієнт точності обробки деталі:

$$T_{cp} = \frac{\sum T_i \cdot n_i}{\sum n_i}, \quad (5.3)$$

де T_i квалітет точності оброблення i -ї поверхні деталі; n_i - число поверхонь з однаковою точністю.

$$T_{cp} = \frac{14 \times 2 + 12 \times 11 + 10 \times 3 + 8 \times 2 + 6 \times 2}{20} = 9,5;$$

$$K_{mч} = 1 - \frac{1}{9,5} = 0,894.$$

в) коефіцієнт шорсткості:

$$K_u = \frac{1}{\overline{R_a}}, \quad (5.4)$$

де $\overline{R_a}$ середня шорсткість поверхонь деталі, що обробляються,

$$\overline{R_a} = \frac{\sum R_{ai} \cdot n_i}{\sum n_i} \quad (5.5)$$

де R_{ai} шорсткість i -ї обробленої поверхні деталі, мкм; n_i число оброблених поверхонь з однаковою шорсткістю.

$$\overline{R_a} = \frac{0,8 \times 4 + 0,4 \times 3 + 3,2 \times 13}{20} = 2,42$$

$$K_u = \frac{1}{2,42} = 0,413.$$

Отже якісний та кількісний аналіз технологічності конструкції показує, що деталь «Черв'як екструдера» є технологічною і має розвинені базові поверхні.

5.2. Аналіз типу виробництва та існуючого технологічного процесу

Розроблюваний в магістерській роботі технологічний процес орієнтований на одиничне та дрібносерійне виробництво.

Дрібносерійне та одиничне виробництво характеризується досить великою номенклатурою виробів та малою сталістю їх випуску.

Організація праці в дрібносерійному виробництві відрізняється високою спеціалізацією, за кожним робочим місцем закріплюється виконання декількох певних операцій.

Технологічне оснащення при одиничному та дрібносерійному виробництві в основному універсальне та з ЧПК, велике поширення має універсально-збірне, переналагоджуване та спеціальне технологічне оснащення.

На першому етапі розроблення технологічного процесу тип виробництва може бути визначений за масою деталі та обсягом випуску продукції (табл.1.4).

Таблиця 5.1

Залежність типу виробництва від об'єму випуску та маси деталі [1]

| Маса деталі, кг | Тип виробництва | | | | |
|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|--------|
| | Одиничне | Дрібносерійне | Середньoserійне | Крупносерійне | Масове |
| <1,0 | <10 | 10-2000 | 1500-100000 | 75000-200000 | 200000 |
| 1,0-2,5 | <10 | 10-1000 | 1000-50000 | 50000-100000 | 100000 |
| 2,5-5,0 | <10 | 10-500 | 500-35000 | 35000-75000 | 75000 |
| 5,0-10 | <10 | 10-300 | 300-25000 | 25000-50000 | 50000 |
| >10 | <10 | 10-200 | 200-10000 | 10000-25000 | 25000 |

При масі деталі $m = 101$ кг та програмі випуску $N = 1...20$ шт. визначаємо, що в кращому випадку тип виробництва – дрібносерійний.

Існуючий технологічний маршрут оброблення деталі «Шнек екструдера 137.450-0287», що використовується на підприємстві, наведено в таблиці. 5.2.

Обробка центральних отворів та внутрішнього квадрату забезпечується на горизонтально-розточному верстаті моделі 2А635. Чорнова обробка циліндричних поверхонь відбувається методом поздовжнього точіння на токарно-гвинторізному верстаті мод.16К20. Для формоутворення гвинтової поверхні та поздовжніх пазів використовується поздовжньо-фрезерний верстат моделі 6М612Ф11 з поворотною головкою. Для шліфування поверхні використовується круглошліфувальний верстат мод. 3У12АФ11.

Таблиця 5.2

Технологічний процес обробки деталі «Шнек екструдера 137.450-016»

| № операції | Назва технологічної операції | Модель устаткування |
|------------|------------------------------|---------------------|
| 005 | Горизонтально-розточна | 2А635 |
| 010 | Токарно-гвинторізна | 16К20 |
| 015 | Тормічна (поліпшення) | |
| 020 | Токарно-гвинторізна | 16К20 |
| 025 | Продольно-фрезерна | 6М612Ф11 |
| 030 | Термічна (Цементация) | |
| 035 | Круглошліфувальна | 3У12АФ11 |
| 040 | Контрольна | |

Технологічний процес забезпечує якісні показники обробки деталі, але не дозволяє отримати елементи гомогенізації фасованої форми.

5.3 Вибір заготовки та обґрунтування способу її отримання

Під час вибору кращого варіанта заготовки для технологічного процесу механічної обробки деталі необхідно враховувати її розміри та конструкцію, технічні вимоги та обсяг випуску.

Розміри заготовки із прокату призначаються з урахуванням припуску на обробку ділянки найбільшого діаметра, а також припуску на обробку торців. Для заданого діаметра 125мм рекомендований діаметр гарячекатаного прокату звичайної точності становить 130 мм ДСТУ 7806: 2015, [4].

Довжину заготовки приймаємо 1812 мм, з урахуванням загального припуску на обробку торців – 12 мм.

Для виготовлення деталі «Черв'як екструдера» в якості заготовки можливо використати поковку отриману гарячим об'ємним штампуванням. В такому випадку форма заготовки була б максимально наближена до форми деталі, але в умовах одиничного виробництва виготовляти штампове устаткування недоцільно. Приймаємо метод отримання заготовки із прокату, що забезпечить мінімальну собівартість деталі.

5.3.1 Техніко-економічний розрахунок собівартості заготовки отриманої із прокату

Заготовка із круглого прокату ДСТУ 7806: 2015.

Діаметр прокату визначаємо згідно [4]. Приймаємо:

$$D_{заг.} = D_{дет} + 2z_0, \quad D_{заг.} = 125 + 2 \times 2,5 = 130 \text{ мм}, \quad (5.6)$$

де z_0 – припуск на механічну обробку зовнішнього діаметра, $z_0 = 2,5$ мм [4].

Довжина заготовки:

$$L_{заг.} = L_{дет} + 2z_0, \quad (5.7)$$

де z_0 – припуск на механічну обробку торця, $z_0 = 6,0$ мм.

$$L_{заг.} = 1800 + 2 \times 6,0 = 1812 \text{ мм}$$

Ескіз заготовки із прокату наведено на рис. 5.1.

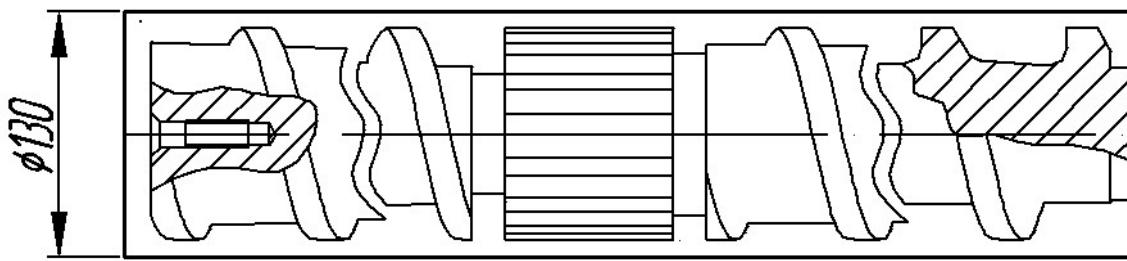


Рисунок 5.1 – Ескіз заготовки із круглого прокату

Знаходимо вагу заготовки:

$$Q = V \cdot \rho, \quad (5.8)$$

де V – об'єм заготовки, $V = \frac{\pi \cdot D_{заг}^2}{4} \cdot L_{заг}$; ρ – питома вага сталі, $\rho = 7,86 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$$Q = \frac{3,14}{4} \cdot 0,013^2 \cdot 1,810 \cdot 7,86 \cdot 10^3 = 186 \text{ кг};$$

Коефіцієнт використання матеріалу:

$$K_M = \frac{q}{Q}, \quad (5.9)$$

де q – вага деталі, $q = 101$ кг; Q – вага заготовки, $Q = 186$ кг

$$K_M = \frac{101}{186} = 0,55.$$

Собівартість заготовки з прокату визначається за формулою:

$$S_{заг} = M + \sum C_{о.з.}, \quad (5.10)$$

де M – затрати на матеріал заготовки, грн; $\sum C_{о.з.}$ – технологічна собівартість заготівельних операцій

$$M = Q \cdot S - (Q - q) \frac{S_{омх}}{1000}, \quad (5.11)$$

де Q – маса заготовки, кг; $Q = 186$ кг; S – ціна 1 т матеріалу, $S = 56000$ грн.; q – маса деталі, кг; $q = 101$ кг; $S_{омх}$ – вартість 1 т стружки; $S_{омх} = 2800$ грн./т.

$$M = 186 \cdot 56 - (186 - 101) \cdot 2,8 = 10178 \text{ грн.}$$

Собівартість заготівельних технологічних операцій:

$$C_{o.z.} = \frac{C_{n.z.} \cdot T_{шт-к}}{60}, \quad (5.12)$$

де $C_{n.z.}$ – затрати приведені на робочому місці, охоплюють: розрізання заготовки – 400 грн./год.[3].

$T_{шт-к}$ – штучно-калькуляційний час на отримання заготовки:

$$T_{шт-к} = D / S_{хв}, \text{ хв.}, \quad (5.13)$$

де D – діаметр заготовки, $D = 130$ мм, $S_{хв}$ – хвилинна подача $S_{хв} = 26$ мм/хв

$$T_{шт-к} = 130 / 26 = 5 \text{ хв.}$$

$$C_{n.z.} = 400 \text{ грн./год.}, \quad C_{o.z.} = \frac{400 \cdot 5}{60} = 34 \text{ грн.}$$

Собівартість заготовки із прокату: $S_{заг} = 10178 + 34 = 10212$ грн..

5.4 Вибір технологічних баз

Призначення баз при механічній обробці деталі «черв'як екструдера» здійснюється виходячи з аналізу креслення деталі та технічних вимог, виду та класу точності заготовки, а також умов роботи деталі в машині.

При виборі технологічних баз слід дотримуватись основних принципів:

- принцип суміщення баз – за технологічні бази приймаємо конструкторські, що визначають положення деталі у виробі;

- принцип сталості баз – при механічній обробці для всіх операцій використовуємо одні бази.

- вибрані бази мають забезпечувати надійність встановлення та закріплення заготовки.

Для вибору технологічних баз, що необхідні для механічної обробки деталі «Черв'як екструдера» користуємося рекомендаціями з базування деталей класу «Вали та осі», що наведені у [1], оскільки деталь складається з поверхонь обертання.

Призначаємо бази для першої операції так щоб забезпечити правильність взаємного розташування оброблених поверхонь деталі до необроблених.

Підготовку технологічних баз здійснюємо так щоб забезпечити мінімальні та рівномірні припуски.

Для першої операції приймаємо за чорнову базу необроблену зовнішню циліндричну поверхню заготовки.

Схема базування заготовки при чорновій операції наведена на рис. 5.2.

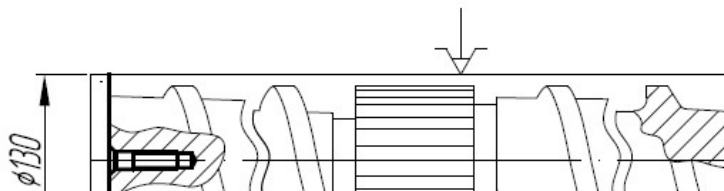


Рисунок 5.2 – Схема базування деталі на першій операції

Бази для чистових операцій назначаємо з умови забезпечення максимальної точності кінцевих розмірів та взаємного розміщення поверхонь.

Зовнішні циліндричні поверхні $\text{Ø}125h6 (-_{0,052})$ мм вважаються найбільш точними поверхнями деталі.

Під час оброблення даних поверхонь заготовка базується в центрах. Схема базування показана на рис. 5.3.

Бази для проміжних операцій призначаємо виходячи з умов забезпечення технічних вимог по точності розміщення цих поверхонь та якості їх обробки.

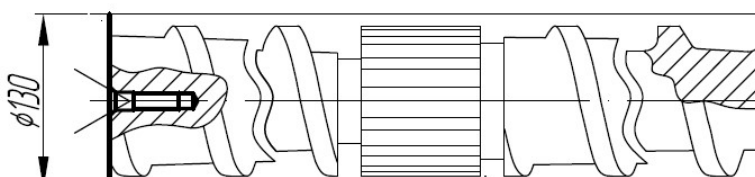


Рис. 5.3 – Схема базування заготовки на чистових операціях

На проміжних операціях обробки поверхонь деталі за базу приймаємо центральні отвори та зовнішні оброблені начисто циліндричні поверхні ($\text{Ø} 125 h6$), зокрема для підтримання в люнеті.

5.5 Вибір варіанта технологічного маршруту

Проектний технологічний маршрут на основі (базового) здійснюється шляхом зміни і доповнення існуючого технологічного маршруту. Для цього розділяють технологічний процес на операції, що виконуються в порядку зростання точності, тобто від чорнових до чистових.

При розробці технологічного процесу керуємося наступними принципами [10]:

- в першу чергу обробляють базові поверхні, які будуть виконувати функцію для базування заготовки при подальшій обробці;
- в наступну чергу обробляють поверхні з найбільшим припуском;
- третім етапом обробляють поверхні, зняття металу з яких не чинить впливу на жорсткість заготовки;
- далі обробляють поверхні, обробка яких пов'язана з точністю і допусками відносного розташування інших поверхонь;

В процесі чорнової обробки знімаємо основну масу металу і забезпечуємо взаємне розташування поверхонь. Досягнення заданої точності поверхонь деталі і точності їх взаємного розташування забезпечується на стадії чистової обробки. Оздоблювальну обробку проводимо для забезпечення необхідної точності і шорсткості поверхонь.

При розробці технологічного маршруту необхідно також враховувати вимоги до взаємного розташування поверхонь, умови експлуатації та тип виробництва (одиничне, серійне, масове).

Аналізуючи базовий технологічний процес на виготовлення шнеків з гвинтовою нарізкою та сталими геометричними параметрами шнека (зовнішні та внутрішні діаметральні розміри стабільні), тип виробництва серійне можна зробити висновки та намітити варіанти удосконалення технології виготовлення.

Для запропонованого варіанту маршруту технологічних операцій призначаємо методи обробки поверхонь «Черв'яка екструдера» та заносимо результати в табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Маршрут обробки деталі «Черв'як екструдера»

| № опер. | Назва операції | Модель верстата | Короткий зміст | Базові поверхні |
|---------|------------------------|---|--|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 005 | Горизонтально-розточна | 2A635 | Фрезерувати торець 2 Центрувати отвір 1, виконати отвір 3 Повернути пов. стіл на 180. Фрезерувати торець 13, квадрат 15, отв. 14, начисто | |
| 010 | Токарно-гвинторізна | 16K20 | Точити попередньо поверхню 8 Точити попередньо канавки поверхні 5, 7, 11. | База А |
| 015 | Термічна (поліпшення) | | | |
| 020 | Токарна з ЧПК | Токарний верстат з ЧПК CNC 620x1500 2000 Cormak | Точити поверхні 8, 9, 10,11, канавки 5, 7, начисто. | А |
| 025 | Продольно-фрезерна | M612Ф11 | Фрезерувати 15 пазів 6 начисто | А |
| 030 | Хіміко-термічна | | Азотувати поверхню | |
| 035 | Шліфувальна | Reinecker | Шліфувати поверхні 8, 9, 10,11, начисто. | А |
| 040 | Контрольна | | | |

На стадії проектування технологічної операції вирішується комплексна задача: уточнюється зміст операції, послідовність та зміст переходів; проводиться вибір засобів технологічного оснащення, а також режими різання; визначаються налагоджувальні розміри, норми часу, точність обробки та розряд виконуваних робіт; підбирається склад МОР; розробляються операційні

ескізи та схеми налагоджень.

Кожна окрема технологічна операція проектується на основі прийнятого технологічного маршруту, схеми базування і закріплення деталі в межах операції, відомостей про точність і шорсткості поверхонь до і після обробки та припусків на механічну обробку.

При уточненні змісту операції приймаються рішення, які поверхні деталі будуть оброблятися в межах конкретної операції. При розробленні порядку та змісту переходів необхідно прагнути до скорочення часу обробки за рахунок раціонального вибору засобів технологічного оснащення, числа переходів, а також поєднання основного і допоміжного часу.

Детальне розроблення операцій технологічного процесу та розрахунок технологічних параметрів наведений в додатку Б.

Висновки до п'ятого розділу

Запропоновано технологію виготовлення деталі «Черв'як екструдера» з використанням верстатів з ЧПК. На основі аналізу базових технологічних процесів запропоновано маршрут технологічного процесу з урахуванням технологічних вимог до деталі та розроблено технологічні операції для верстатів з ЧПК. Проведено аналіз технологічності конструкції деталі. Призначено припуски під механічну обробку аналітичним та табличним методами.

Розраховано режими різання на основні переходи обробки поверхонь деталі з використанням сучасних програм аналітичним і табличним методами, спроектовані технологічні операції за технологічним маршрутом.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

Закон України про охорону праці, від 15 жовтня 1992 року, є чинним для всіх підприємств незалежно від форми власності та всіх працюючих громадян країни. Даний закон спрямований на покращення рівня життя та здоров'я працівників, а також реалізує комплексні заходи щодо програми праці та соціального захисту тих, хто постраждав внаслідок нещасного випадку. Згідно до закону, визначаються нормативні документи, вимоги яких відповідають міжнародним стандартам. Підвищення безпеки та поліпшення умов праці мають важливий вплив на результати виробництва, продуктивність праці, якість та собівартість виробів.

6.1 Характеристика виробничих небезпек при роботі з ексирузійним обладнанням

Сучасна екструзійна переробка полімерних матеріалів займає провідне місце в виробничій діяльності людства тому охорона праці та навколишнього середовища є ключовим компонентом підприємств з переробки полімерів.

При експлуатації ліній з переробки полімерів як правило виникають наступні небезпечні фактори:

Забруднення повітря робочої зони (викид шкідливих речовин у повітря).

Виробничий шум та вібрація, що виникає від роботи електродвигунів, екструдерів, вентиляторів та допоміжного обладнання.

Ризик ураження електричним струмом при виході з ладу електромереж живлення та електричного обладнання.

Вплив високих температур (при нагріванні екструдера та головки).

Промислове освітлення робочої зони.

Наявність трубопроводів та рідин під тиском.

Пожежна безпека

6.1.1 Повітря робочої зони

Виробництво з переробки полімерів передбачає використання різних компонентів (хімічних речовин) і має технологічні особливості, які створюють особливі умови виробничого середовища. Додаткове виділення в атмосферне повітря проміжних продуктів через вторинні реакції є небезпечним. В повітря можуть потрапляти шкідливі речовини, такі як SO₂, SO₃, H₂S, CS₂, CO, CO₂, NH₃, сполуки Cl, F, бензапірен, вуглеводні, синтетичні поверхнево-активні речовини, канцерогени та важкі метали. Тому проводять регулярно моніторинг забруднюючих речовин у повітрі для виявлення потенційно небезпечних речовин та їх концентрацій.

Робоча зона забезпечується системою вентиляції (за ДБН В.2.5–67; 2013), яка складається з приймачів, трубопроводів, вентиляторів та очисних фільтрів. Приймачі для всмоктування випарів розташовують над завантажувальним бункером та екструзійною головкою, що запобігає потраплянню шкідливих викидів в повітряний простір цеху. Втрату повітря витяжного приймача (360 м²) компенсують вентиляторами. В робочій зоні забезпечують температуру повітря 18–23°C, відносну вологість 40–70% при швидкості руху повітря 0,3 м/с, що відповідає «Державним санітарним нормам» (ДСН 3.3.6.042–99).

Щоб зменшити ці ризики, важливо дотримуватися всіх правил техніки безпеки, регулярно проводити технічне обслуговування обладнання, надавати працівникам відповідну інструкцію та забезпечувати їх відповідними засобами індивідуального захисту.

6.1.2 Виробничий шум та вібрація

Експлуатація екструзійних машин та механізмів лінії по переробці ПВХ матеріалів може створювати значний рівень шуму та вібрації, що може впливати на здоров'я працівників та спричиняти аудітивні та неврологічні проблеми.

Під час експлуатації лінії показник шуму може наближатись до $L_{вдж} = 105$ дБА. З метою зниження рівня шуму на підприємстві слід дотримуватися певних правил при експлуатації механічного обладнання:

- застосовувати захисні прокладки та кожухи;
- регулярне змащування та перевірка на знос всіх поверхонь тертя.

Дотримання цих умов дасть можливість зменшення рівня шуму на $\Delta L = 30$ дБА.

Пульт керування лінією (біля якого перебуває оператор) розташовують на великій відстані від станини на якій змонтовано екструзійну машину, тому результуючі вібрації, що доходять до нього, не становлять небезпеки для його організму.

Максимальний рівень вібрації в робочих приміщеннях (при технічно справному обладнанні) становить 90 дБ, а частота – 4Гц за «Державним санітарним нормам виробничої загальної та локальної вібрації» (ДСН 3.3.6.039-99).

6.1.3 Електробезпека

Робочий цех, де встановлюється лінія вторинної переробки ПВХ матеріалів є сухим приміщенням з температурою повітря 18–23°C при відносній вологості 40–70%. Підлога в цеху – залізобетонна, а обладнання заземлене. Згідно з «Правилами улаштування електроустановок» (ПУЕ) [30], цех не відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою. Тип електромережі – різноманітний, із глухо заземленою нейтраллю. Напруга і частота, що використовується на лінії виробництва:

- на пульті керування: $U = 220\text{В}$, $f = 50\text{Гц}$;
- на електродвигунах: $U = 380\text{В}$, $f = 50\text{Гц}$.

З метою уникнення уражень електрострумом, необхідно дотримуватись заходів безпеки:

- ізоляція;
- захисне занулення;
- недосяжність елементів по яких проходить струм;

- розділяючі трансформатори;
- рубильники вмикання повинні знаходитися в спеціальних шафах;
- забезпечити робітників засобами індивідуальної безпеки (діелектричні рукавички та чоботи, гумові килимки).

Категорично заборонено:

- працювати на вузлах лінії, які не заземлені;
- залишати працюючу лінію без нагляду;
- проводити ремонт та розборку лінії під напругою;
- допускати у робоче середовище цеху сторонніх осіб, а також людей, що не пройшли інструктаж з питань охорони праці та техніки безпеки;

6.1.4 Вплив високих температур

Процес екструзійної переробки полімерів супроводжується виділенням тепла та пару в зоні формуючої головки, що небезпечно так як обслуговуючий персонал може отримати опіки.

Теплові втрати в приміщеннях виробничих зон можуть бути зменшені шляхом встановлення теплової ізоляції на нагрітих поверхнях технологічного устаткування та паропроводів. Температура на поверхні ізоляції повинна утримуватися на рівні не більше оптимальної температури повітря в робочій зоні на 2°C нижче.

Основні принципи які повинні виконуватись при організації технологічних процесів з метою забезпечення безпеки праці включають:

- комплексну механізацію та автоматизацію з можливістю дистанційного керування (в окремих випадках);
- безперервний хід виробничих процесів;
- герметизацію устаткування та апаратури;
- теплоізоляцію устаткування та апаратури та захист робочих місць від іонізуючого випромінювання;
- забезпечення фізіологічного комфорту при облаштуванні робочих місць.

6.1.5 Пожежна безпека

На всіх сучасних підприємствах протипожежна безпека є невід'ємною частиною організації робочого процесу. Робочі приміщення, де розташовують лінію з переробки полімерів мають такі легкозаймисті речовини як:

- машинне масло;
- ганчірки, пакувальні матеріали;
- електрообладнання;
- електропроводка;
- деякі компоненти полімерної композиції.

Серед складових полімерної композиції можуть бути такі легкозаймисті матеріали як:

ацетон, метиловий спирт, ацетальдегід, формальдегід – займаються при температурі 120°C і вище;

кислоти, ефіри, перекисневі сполучення 150°C і вище.

Таким чином дільниця з переробки полімерних матеріалів відповідає наступним категоріям:

- категорія – В (за ДСТУ Б В.1.1-36:2016);
- клас зони – П-Па (за ПУЕ-2017);
- ступінь вогнестійкості – III (за ДБН В.1.1-7:2016).

Відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 температура спалаху рідин, пилу та волокон на даному виробництві 61°C. Матеріали, що використовуються на виробництві не відносяться до вибухонебезпечних.

З метою уникнення пожежі на підприємстві передбачено ряд організаційних заходів безпеки. Відповідно до норм ДБН па правил пожежної безпеки передбачено пожежні щити, вогнегасники та пожежна сигналізація.

Усі приміщення, де переробляють полімерні матеріали, повинні бути обладнані загальнообмінною механічною та природною системами вентиляції, а також газоаналізаторами повітря.

6.1.6 Промислове освітлення

Екструзійна машина та лінія переробки полімерних матеріалів розташовані в закритому приміщенні $S = 600 \text{ м}^2$ і об'ємом $V = 2000 \text{ м}^3$. Лінія працює у три зміни і контролюється двома операторами. Враховуючи безперервний режим роботи освітлення робочої зони штучне.

Характеристика зорових робіт: категорія - IV В.

Характеристика фону: фон – світлий.

Контраст між об'єктом і фоном – максимальний.

Так, в приміщенні встановлено 108 Лед ламп типу LPG 4-400, світловий потік яких сягає до 22000 лм, що забезпечує освітленість на рівні 350 люкс.

Дане приміщення відповідає «Державним будівельним нормам України». (ДБН В.2.5-28-2018).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дипломній роботі вирішена науково-технічна задача, яка полягає в розробленні конструкції екструзійної машини для вторинної переробки ПВХ матеріалів з обґрунтуванням її параметрів.

На основі отриманих наукових та практичних результатів сформовано такі висновки:

1. Аналіз технологічних можливостей методів, способів та конструкцій обладнання для вторинної переробки ПВХ відходів показав, що перспективним напрямком підвищення експлуатаційних можливостей екструзійного обладнання є створення робочих органів для данного матеріалу з обґрунтуванням їх параметрів.

2. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження конструктивно-технологічних параметрів робочих органів екструзійної машини.

3. Запропоновано конструкцію «Черв'яка» екструзійної машини з диспергуючим елементом.

4. На основі проведених досліджень та комп'ютерного моделювання запропоновано конструкцію корпусу екструдера та розроблено технологію виготовлення «Черв'яка».

5. В результаті виконання роботи запропоновано конструкцію екструзійної машини для переробки ПВХ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів : навч. посіб. / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 200 с.
2. Мікульонок І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія. – Київ : ІВЦ, Видавництво «Політехніка», 2009. – 265 с.
3. Mohr W.D., Saxton R.L., Jepsen C.H. Mixing in Laminar – Flow System.// Ind. Eng. Chem. 1957. V. 49. № 11. P. 1855 – 1856.
5. Mohr W.D., Saxton R.L., Jepsen C.H. Theory of Mixing in the Single-Screw-Extruder // Industrial and Engineering Chemistry. 1957. V. 49. № 11. P. 1857 –1862.
6. Сахаров О.С., Сівецький В.І., Сокольський О.Л., Мікульонок І.О. Моделювання задач гідропружності в процесах формування полімерних виробів. — К.: НТУУ ”КПІ”, 2009 . — 106 с.
7. Щербина В.Ю., Сівецький В.І., Гондляр О.В. Механічні процеси і обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів. Підготовка сировинних матеріалів і устаткування для змішування та формування [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. – 131с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/4573>
8. Сахаров О.С., Сівецький В.І., Сокольський О.Л., Щербина В.Ю. Чисельне моделювання течії в'язкопластичних середовищ з урахуванням пружності конструктивних елементів обладнання // Науковий вісник НТУУ „КПІ”. Сер. „Механіка”. - 2008. - №55. - С. 71-82.
9. Сахаров О.С., Сівецький В.І., Сокольський О.Л. Дискретизована математична модель для розрахунку процесів пружнов'язкопластичних середовищ із змінною стисливістю при термосилових навантаженнях //Науковий вісник НТУУ „КПІ”. – 2008. – №6. – С. 74-82.
10. Rauwendaal, C.J., Osswald, T.A., Gramann, P. J., Davis, B.A., “New Dispersive Mixers for Single Screw Extruders”, SPE ANTEC, 277 – 283 (1998).
11. Saxton, R.L., U.S. Patent 3,006,029.

12. Hans G.L. Menges, U.S. Patent 3,680,844.
13. Gale Martin. Compounding with single-screw extruders // *Adv. Polym. Technol.* – 1997/ - Vol. 16, №4. – P.251 – 262.
14. LeRoy, G., U.S. Patent 3,486,192.
15. Rauwendaal, C.J., Gramann, P. J., Davis, B.A., Osswald, T.A., U.S. Patent 6,136,246.
16. Rauwendaal, C.J., Gramann, P. J., Backmixing in Screw Extruders, SPE ANTEC, Orlando (2000).
17. Сівецький В.І., Щербина В.Ю., Гондляр О.В. Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання. Лінії для виготовлення листових і профільних полімерних виробів [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2022. – 113 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45732>
18. Generalized navier boundary condition and geometric conservation law for surface tension / J.F. Gerbeau, T. Lelièvre // *computer methods in applied mechanics and engineering.* — 2009. — vol. 198, issues 5–8. — p. 644—656
19. M. Elomaa, L. Sarvaranta, E. Mikkola, R. Kallonen, A. Zitting, C.A.P. evenhoven and M. Hupa, *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, – 1997, — p 27 – 137.
20. R. Scholz, M. Beckmann and F. Schulenburg, *Proceedings of the Third European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*, Lisbon, Portugal, April 1995.
21. J-M. Bemtgen, K.R.G. Hein and A.J. Minchener, *Proceedings of APAS Clean Coal Technology Programme 1992-1994, Volume 1, Summary of Final Conference*, Lisbon, Portugal, 1994. 4. D. K. Walter, B. J. Goodman and C.E. Thomas, *AIChE Symposium Series*, 1988, 265, 82.
22. R. W. Bryers, *Incineration of Municipal and Industrial Waste: Fireside Problems and Prospects for Improvement*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, NY, USA, 1991.
23. A. J. Chandler & Associates Ltd, CoMass Environmental Inc., Rigo & Rigo Associates. The Environmental Research Group - University of New Hampshire, Wastewater Technology Centre, Waste Analysis, Sampling, Testing and Evaluation (WASTE) Program: Effect of Waste Stream Characteristics on MSW Incineration:

The Fate and Behavior of Metals. The Final Report of the.

24. Mass Burn MSW Incineration Study, Volume II, Technical Report, 1993. 10. W. Michaeli and K. Breyer, Macromolecular Symposia, 1998, 135, 83.

25. E. Weigand in Recycling and Recovery of Plastics, Eds., J. Brandrup, M. Bittner, W. Michaeli and G. Menges, Hanser, Munich, Germany, 1996, 683. 12. J.M. Barrales-Rienda, Revue Plasticos Modernes (Madrid), in press.