

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
Інженерно-хімічний факультет
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____Олександр Сокольський

«_____» _____2025 р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів»

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: Агрегат для виробництва рукавної плівки з модернізацією екструдера

Студент (-ка) IV к, групи ЛП-12

(шифр групи)

Цветков Артем Євгенійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник проекту: PhD, асистент Витвицький В.М.

(вчена ступінь, звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультанти з питань

МОДЕРНІЗАЦІЇ: д.т.н., проф. Щербина В.Ю.

ТЕХ. МАШ.: ст. викл. Борщик С.О.

ОХОРОНИ ПРАЦІ: ст. викл. Ковтун А.І.

РЕЦЕНЗЕНТ

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент (-ка) Цветков Артем

Київ 2025 рік

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудуванняЗ

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – *133 Галузеве машинобудування*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Цвєтков Артем Євгенійович

1. Тема проекту «Агрегат для виробництва рукавної плівки з модернізацією екструдера», керівник проекту PhD, Витвицький Віктор Миронович , затверджені наказом по університету від «20. 05» 2025 р. № 1653-С
2. Термін подання студентом проекту 15.06.2025 р.
3. Вихідні дані до проекту Черв'ячний екструдер, діаметр $D=90$ відношення довжини до діаметру $L/D=35$, загальна довжина 3345 мм, плівка рукавна ПЕНГ
4. Зміст пояснювальної записки:
 - 1.Призначення і галузь застосування черв'яка, 2.Опис базової конструкції, її основних частин та принципу дії черв'яка, 3.Літературний та патентний огляд стану питання, обґрунтування запропонованої модернізації черв'яка, 4.Розрахунки, 5.Розрахунки модернізації у програмі ANSYS, 6.Охорона праці, 7.Технологія машинобудування, Висновки, Література, Додатки
5. Перелік графічного матеріалу : 1. Технолічна лінія для виробництва куравної плівки (A1); 2. Агрегат для виробництва рукавної плівки з модернізацією екструдера (A1); 3. Деталювання (A1): Черв'як базовий (A2), Фланець(A3), Гільза (A3); 4. Черв'як модернізований (A1); 5. Плакат з моделюванням модернізованого черв'яка SolidWorks (A1);6. Плакат з результатами базового черв'яка

ANSYS (A1); 7. Плакат з результатами модернізованого черв'яка ANSYS (A1)

3. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
МОДЕРНІЗАЦІЇ	проф. Щербина В.Ю.		
ТЕХ. МАШИНОБУД.	ст. викл. Борщик С.О.		
ОХОРОНА ПРАЦІ	ст. викл. Ковтун А.І.		

4. Дата видачі завдання 19.05.2025.....

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ. Технологічна лінія з використанням машини. Технічні характеристики машини.	01.04.2025 – 05.04.2025	
2	Аналіз існуючих конструкцій екструдерів	06.04.2025 – 12.04.2025	
3	Вибір базової конструкції та обґрунтування	13.04.2025 – 17.04.2025	
4	Розрахунок конструктивних параметрів шнека	18.04.2025 – 24.04.2025	
5	Модернізація конструкції. Обґрунтування змін	25.04.2025 – 30.04.2025	
6	Розрахунок модернізованого вузла	01.05.2025 – 08.05.2025	
7	Побудова 3D-моделі вузлів у SolidWorks	09.05.2025 – 14.05.2025	
8	Аналіз напружень і деформацій у ANSYS	15.05.2025 – 21.05.2025	
9	Оформлення текстової частини пояснювальної записки	22.05.2025 – 28.05.2025	
10	Оформлення графічної частини (креслення)	29.05.2025 – 04.06.2025	
11	Остаточна перевірка, редагування та підготовка до захисту	05.06.2025 – 10.06.2025	

Студент

Артем ЦВЕТКОВ

Керівник проекту

Віктор ВИТВИЦЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт бакалавра на тему: «Агрегат для виробництва рукавної плівки з модернізацією екструдера».

Виконавець – студ. групи ЛП-12 Цвєтков Артем Євгенійович, керівник – PhD, асистент Витвицький В.М.

Дипломний проєкт включає текстову та графічну частини. Текстова частина складається з 7 розділів і 4 додатків. Загальний обсяг: 86 сторінок, 30 ілюстрацій, 7 таблиці, 17 джерел посилань. Графічна частина містить 7 аркушів креслень А1 (3*А1, А2, 2*а3 і 3 плакати).

У проєкті розглянуто конструкцію одночерв'ячного екструдера для виробництва поліетиленової рукавної плівки. Запропоновано модернізацію конструкції черв'яка екструдера шляхом поступового зменшення ширини витка по довжині. Така зміна дозволяє знизити зворотний потік розплаву, стабілізувати подачу полімеру та забезпечити кращу рівномірність товщини плівки.

Виконано параметричні розрахунки базової конструкції, визначено механічні характеристики, проведено розрахунки на міцність, деформації та тепловий аналіз у середовищі ANSYS. Отримані результати показали покращення технічних показників і підтвердили доцільність модернізації.

Окрему увагу приділено охороні праці під час роботи з екструдером. Розглянуто ризики при експлуатації обладнання, наведено рекомендації щодо їх уникнення. Також у розділі технології машинобудування подано методику виготовлення фланця корпусу та пристосування для обробки деталі.

За результатами дипломного проєкту підготовлено доповідь для участі у всеукраїнській конференції і надруковано тези доповіді.

Ключові слова: ЧЕРВ'ЯК, НАКІНЕЧНИК, ЕКСТРУДЕР, РОЗРАХУНКИ, АГРЕГАТ, ПЛІВКА, МОДЕРНІЗАЦІЯ.

ABSTRACT

Bachelor's thesis project on the topic: "Unit for the production of tubular film with the modernization of the extruder".

Performer - student of the LP-12 group Tsvetkov Artem Evgenievich, head - PhD, assistant Vytvytsky V.M.

The thesis project includes a text and graphic part. The text part consists of 7 sections and 4 appendices. Total volume: 86 pages, 30 illustrations, 7 tables, 17 reference sources. The graphic part contains 7 drawings (4 A1 format and 3 posters).

The project considers the design of a single-worm extruder for the production of polyethylene tubular film. It is proposed to modernize the design of the extruder worm by gradually reducing the width of the turn along the length. Such a change allows you to reduce the reverse flow of the melt, stabilize the polymer supply and ensure better uniformity of the film thickness.

Parametric calculations of the basic and modernized design were performed, mechanical characteristics were determined, calculations for strength, deformations and thermal analysis were performed in the ANSYS environment. The results obtained showed an improvement in technical indicators and confirmed the feasibility of modernization.

Special attention was paid to labor protection when working with the extruder. Risks during equipment operation were considered, recommendations for their avoidance were given. Also, the technological section presents a method for manufacturing the housing flange and a device for processing the part.

Based on the results of the diploma project, a report was prepared for participation in the All-Ukrainian conference.

Keywords: WORM, TIP, EXTRUDER, CALCULATIONS, UNIT, FILM, MODERNIZATION.

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

D – діаметр черв'яка, мм

d – діаметр отвору або каналу, мм

e – ширина витка, мм

F – площа поперечного перерізу, мм²

G – маса черв'яка, кг

h_1 – глибина нарізки в зоні завантаження, мм

h_2 – глибина нарізки в зоні компресії, мм

h_3 – глибина нарізки в зоні дозування, мм

I – момент інерції, мм⁴

L – довжина черв'яка, мм

M – згинальний момент, Н·м

$M_{кр}$ – крутний момент, Н·м

N – потужність, кВт

p – тиск, Па

q – тепловий потік, Вт/м²

Q – продуктивність екструдера, кг/год

t – крок гвинтової нарізки, мм

T – температура, К

v – об'ємна витрата, см³/с

W – момент опору, мм³

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)

δ – зазор між корпусом і витком, мм

η – коефіцієнт продуктивності

σ – нормальне напруження, МПа

$\sigma_{екв}$ – еквівалентне напруження (за Мізесом), МПа

τ – дотичне напруження, МПа

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ, ЯКИЙ ПРОЕКТУЄТЬСЯ.....	10
2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА РУКАВНОЇ ПЛІВКИ.....	12
3 ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН, ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ	13
4 ЛІТЕРАТУРНИЙ ТА ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ.....	15
4.1 Огляд існуючих рішень.....	15
4.2 Обґрунтування запропонованої модернізації.....	21
5 Розрахунки	23
5.1 Параметричні розрахунки.....	23
5.2 Розрахунки черв'яка на міцність	39
5.3 Тепловий розрахунок	45
5.4 Числові розрахунки.....	47
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....	55
6.1 Забруднення повітря робочої зони.....	55
6.2 Електробезпека.....	56
6.3 Пожежна безпека.....	57
6.4 Виробничий шум.....	58
6.5 Промислове освітлення.....	58
6.6 Небезпека впливу рухомих і обертових частин машини.....	59
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	61
7.1 Технологія виготовлення деталі.....	61
7.2 Опис та призначення деталі.....	61

					ЛП12.14 7246.01-70 ПЗ								
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.	Цвєтков				Агрегат для виробництва рукавної плівки з модернізацією екструдера				Літ.	Арк.	Акрушів		
Перевір.	Витвицький										7	86	
Керівник.									КПІ ім. Ігоря Сікорського				
Н. Контр.													
Затверд.	Сокольський												

7.3 Вибір заготовки для виготовлення деталі.....	62
7.4 Технологічний процес виготовлення деталі.....	64
7.5 Вибір та розробка пристосування для певної операції.....	64
7.6 Вибір пристосування, опис конструкції та принцип дії.....	65
7.7 Технологічний процес виготовлення деталі.....	65
7.7 Висновок розділу.....	72
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	73
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	75
ДОДАТКИ.....	76

					ЛП12.14 7246.01-70 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Рукавна плівка з поліетилену низького тиску (ПЕНГ) широко використовується у багатьох галузях промисловості завдяки своїм унікальним властивостям. Основними сферами її застосування є:

-Пакувальна промисловість: виготовлення мішків, пакетів, термоусадкової плівки для пакування харчових і промислових товарів.

-Сільське господарство: використовується для мульчування ґрунтів, створення тепличних покриттів, захисту врожаїв.

Будівництво: застосовується як ізоляційний матеріал для гідроізоляції, захисту будівельних конструкцій від вологи.

-Технічне виробництво: виготовлення електроізоляційних матеріалів, оболонок для кабелів.

Виготовлення такої плівки здійснюється методом екструзії за допомогою спеціалізованого обладнання — екструдера. Основним завданням цього дипломного проєкту є розробка агрегату для виробництва рукавної плівки з модернізацією екструдера з метою підвищення ефективності процесу та покращення якості готової продукції.

У дипломному проєкті проведено комплексне дослідження конструкції екструдера для виробництва рукавної плівки з поліетилену низького тиску (ПЕНГ). Описано основні вузли та системи машини, проаналізовано їх конструкційні особливості та взаємодію в процесі екструзії. Виконано кінематичні, міцнісні та теплові розрахунки черв'яка, визначено основні експлуатаційні параметри та режими роботи екструдера. Оцінено вплив високих температур на окремі вузли машини, зокрема фланцеві з'єднання та формуючу головку, що забезпечують герметичність і якість готової продукції. Крім того, розглянуто технологічні процеси виготовлення та експлуатації екструдера, а також обґрунтовано вибір матеріалів для ключових вузлів з урахуванням вимог міцності та довговічності. У проєкті також проведено патентний огляд для пошуку конструктивних рішень, що дозволяють підвищити ефективність і надійність роботи обладнання.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ, ЯКИЙ ПРОЕКТУЄТЬСЯ

Сучасні установки для виготовлення рукавної плівки додатково оснащуються автоматичними системами притискання тягнучих валків приймального пристрою, пристроями для обрізання країв або розрізання рукава на два окремих плівкових полотна, які в такому випадку намотуються в окремі рулони на намотувачі подвійної дії. Також такі установки комплектуються приладами для автоматичного контролю ширини і товщини плівки з можливістю безперервного або періодичного запису цих параметрів, а також пристроями для зняття статичного електричного заряду.

Технологічна лінія з даним екструдером (рис. 1.1) призначена для виготовлення рукавної поліетиленової плівки з поліетилену низького тиску (ПЕНГ).

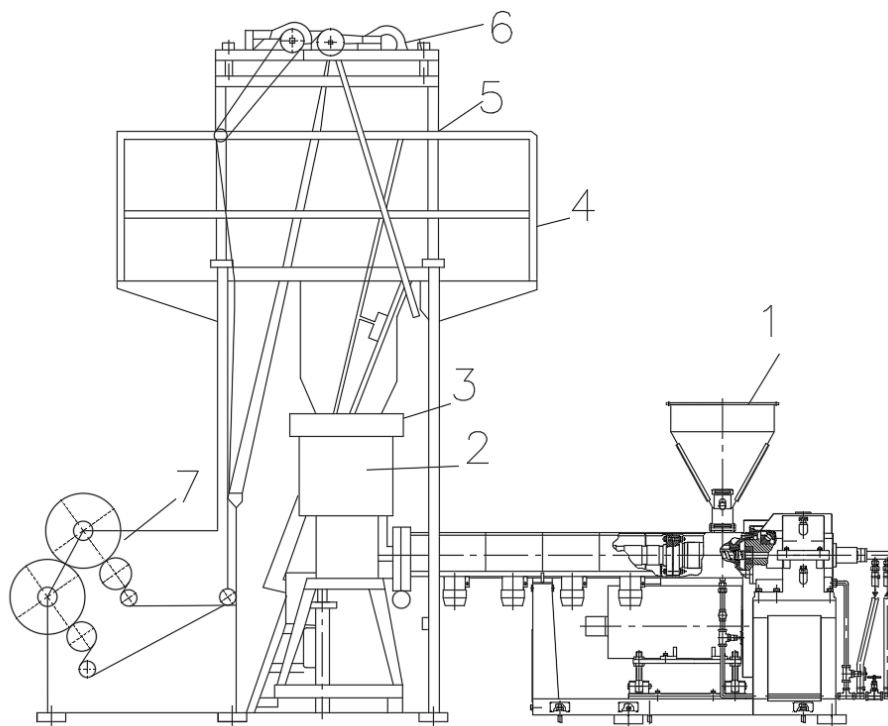


Рисунок 1.1 – Технологічна лінія для виготовлення рукавної плівки з ПЕНГ:

1 – екструдер з завантажувальним бункером; 2 – формувальна головка; 3 – система повітряного охолодження; 4 – монтажна естакада; 5 – складаний пристрій («щоки»); 6 – приймальний пристрій; 7 – пристрій для намотування рулонів

Сировина у вигляді поліетиленових гранул подається в завантажувальний бункер екструдера 1, де відбувається її плавлення та подальша екструзія через формувальну головку 2. На виході формується рукавна плівка, яка охолоджується за допомогою системи повітряного охолодження 3. Далі плівковий рукав рухається вгору по монтажній естакаді 4.

На етапі складання плівка проходить через складаний пристрій («щоби») 5, де вона складається у плоске подвійне полотно. Далі полотно спрямовується до приймального пристрою 6, який забезпечує рівномірне натягування плівки та подачу її до пристрою намотування 7. Готова плівка намотується у рулони, які надалі використовуються для пакування різноманітної продукції

2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА РУКАВНОЇ ПЛІВКИ

Базовою машиною для виробництва рукавної плівки є одночерв'ячний екструдер моделі 90×35. Основні технічні характеристики машини (табл 2.1).

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики машини

№	Параметр	Значення
1	Діаметр шнека	90 мм
2	Довжина шнека	3150 мм
3	Частота обертання	150 об/хв
4	Продуктивність	451 кг/год
5	Привід	Електродвигун
6	Потужність електродвигуна	100 кВт
7	Система обігріву	Електронагрівники
8	Система охолодження	Повітряне, з регульованими вентиляторами
9	Система управління	Автоматизована (температура, тиск)
10	Перероблюваний матеріал	Поліетилен низького тиску (ПЕНГ)

Подальша робота була проведена з урахуванням всіх параметрів.

3 ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ

Екструдер для виробництва рукавної плівки (рис. 3.1) складається з кількох основних вузлів, які забезпечують ефективну та безпечну роботу обладнання.[1] Основними конструктивними елементами є корпус, черв'як, система обігріву, система охолодження, редуктор, електродвигун та пульт керування.

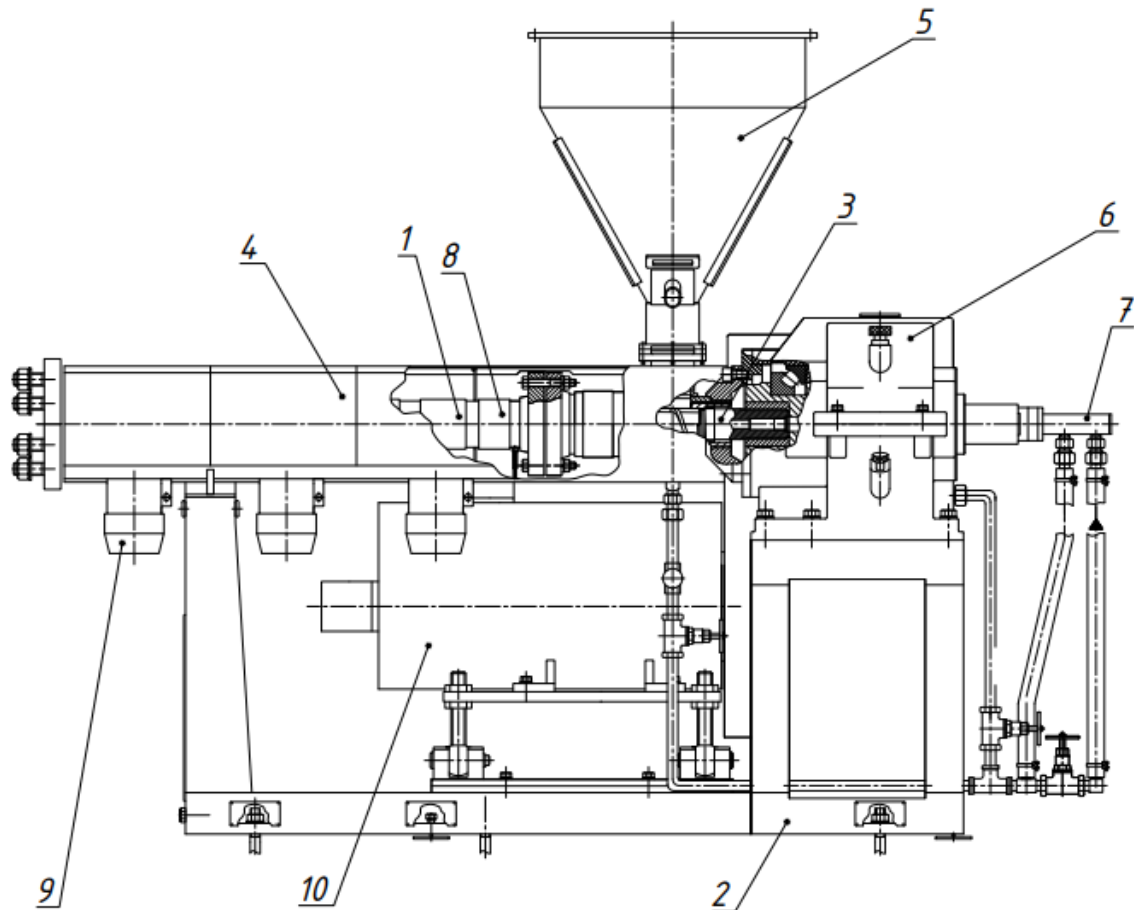


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд екструдера для виробництва рукавної плівки

1-циліндр екструдера, 2 – рама, 3 – черв'як, 4 – кожух, 5 – завантажувальний бункер, 6 – редуктор, 7 – охолоджувальний пристрій, 8 – індукційні нагрівники, 9 – вентилятор, 10 – електродвигун

Завантажувальний бункер 5 встановлюється у верхній частині екструдера, через який полімерна сировина подається в робочу зону. Черв'як 3, що знаходиться всередині корпуса, приводиться в обертальний рух за допомогою

електродвигуна через редуктор і муфту. Він транспортує полімерний матеріал вздовж робочого каналу, де під дією високих температур здійснюється його розплавлення.

Корпус екструдера оснащений електронагрівальними елементами, які забезпечують необхідний тепловий режим для переробки полімерів. Охолодження здійснюється системою подачі охолоджувальної рідини, а також вентиляторним блоком, що запобігає перегріванню корпусу.

На виході екструдера встановлена формуюча головка, що надає виробу необхідну форму. Усі вузли агрегату змонтовані на станині, яка забезпечує їх надійну фіксацію та стабільну роботу. Керування екструдером здійснюється за допомогою пульта керування, що дозволяє точно регулювати параметри процесу та контролювати стан обладнання.

4 ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД З ВИБОРОМ ВАРІАНТА МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕКСТРУДЕРА

4.1 Огляд існуючих рішень

Метою літературно-патентного огляду є аналіз існуючих конструктивних рішень для вдосконалення роботи черв'яка екструдера. Було виконано аналіз патентної документації з різних напрямків модернізації — охолодження, геометрії витка, стабілізації потоку та поліпшення змішувального ефекту. На основі цього огляду обрано один із варіантів, який буде використано для подальшої реалізації в конструкції одночерв'ячного екструдера.

Джерело [2] описує конструкцію охолоджуваного черв'яка екструдера з внутрішніми шліцами (патент UA137428U).

Конструкція спрямована на усунення проблеми перегріву центральної частини черв'яка під час роботи екструдера. Перегрів може призводити до термічного руйнування полімерної маси, зниження стабільності технологічного процесу та зменшення якості готової продукції. Запропоноване рішення передбачає внутрішнє охолодження черв'яка, що дозволяє ефективно відводити тепло від його сердечника без впливу на зовнішню робочу поверхню.

Суть технічного рішення(рис 4.1) полягає у виконанні в середині валу черв'яка поздовжніх шліців, які формують систему каналів для циркуляції охолоджуючої рідини. Рідина подається через ввідний патрубок, проходить по каналах уздовж осі валу і виводиться через відповідний отвір. Таким чином забезпечується охолодження внутрішньої частини черв'яка, не порушуючи теплового режиму на його поверхні.

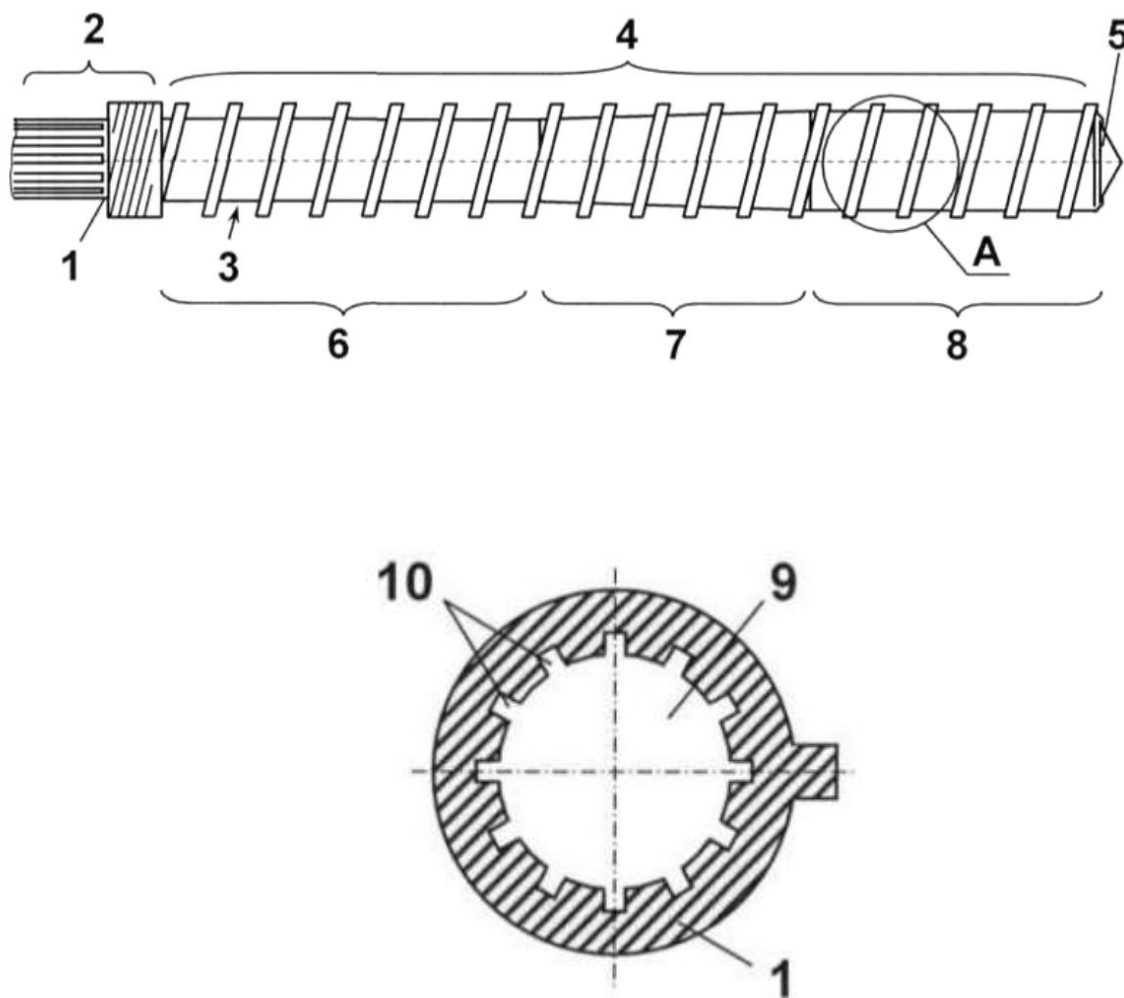


Рисунок 4.1 – Охолоджуваний черв'як з внутрішніми шліцами (патент UA137428U)

1 – вал черв'яка 2 – ввідний патрубок охолоджуючої рідини 3 – зона ущільнення 4 – гвинтова нарізка 5 – вивідний отвір 6 – завантажувальна зона 7 – зона плавлення 8 – дозувальна зона 9 – центральний канал 10 – поздовжні шліци

Це рішення(рис 4.2) дозволяє досягти рівномірного охолодження сердечника черв'яка, зменшити температурні коливання в робочій зоні, покращити стабільність процесу екструзії та підвищити якість переробки термочутливих полімерів.

Джерело [3] описує конструкцію черв'яка екструдера з додатковим витком для розподілу потоку полімерної маси.

Конструкція спрямована на усунення проблеми нерівномірного розподілу розплаву полімеру по поперечному перерізу каналу екструдера, що може спричинити застійні зони, коливання тиску та зниження якості готової продукції. Запропоноване рішення передбачає використання додаткового витка, який формує декілька паралельних потоків розплаву для їх рівномірнішого розподілу.

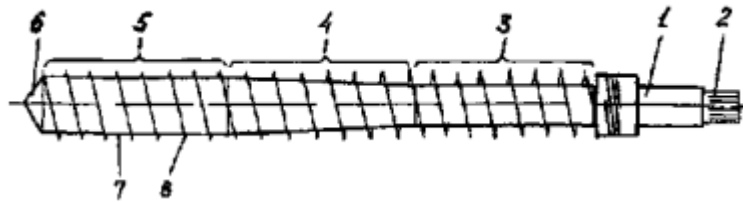


Рисунок 4.2 – Черв'як з додатковим витком для розподілу потоку

1 – вал черв'яка 2 – привідна частина 3 – зона ущільнення 4 – основна гвинтова нарізка 5 – додатковий виток 6 – завантажувальна зон 7 – зона плавлення 8 – дозувальна зона

Суть технічного рішення полягає у введенні в конструкцію черв'яка спеціального додаткового витка (5), розташованого в центральній частині гвинтової нарізки (4). Цей виток поділяє основний потік полімерної маси на кілька паралельних частин, що транспортуються далі вздовж каналу. Внаслідок цього зменшуються гідродинамічні коливання та покращується заповнення формувальної головки.

Це рішення дозволяє знизити нерівномірність потоку розплаву, уникнути застійних зон у робочому каналі, підвищити однорідність структури продукції та забезпечити стабільну роботу екструдера при переробці різних полімерів.

Джерело [4] описує конструкцію черв'яка(рис 4.3) екструдера з опуклими гребенями, оснащеними поздовжніми виступами.

Конструкція спрямована на покращення транспортування та інтенсивнішого перемішування полімерної маси в зоні дозування. Традиційні гвинтові гребені часто не забезпечують достатнього зчеплення з матеріалом, що

призводить до застою та зниження ефективності процесу. Запропонована конструкція усуває ці недоліки завдяки спеціальній геометрії гребенів.

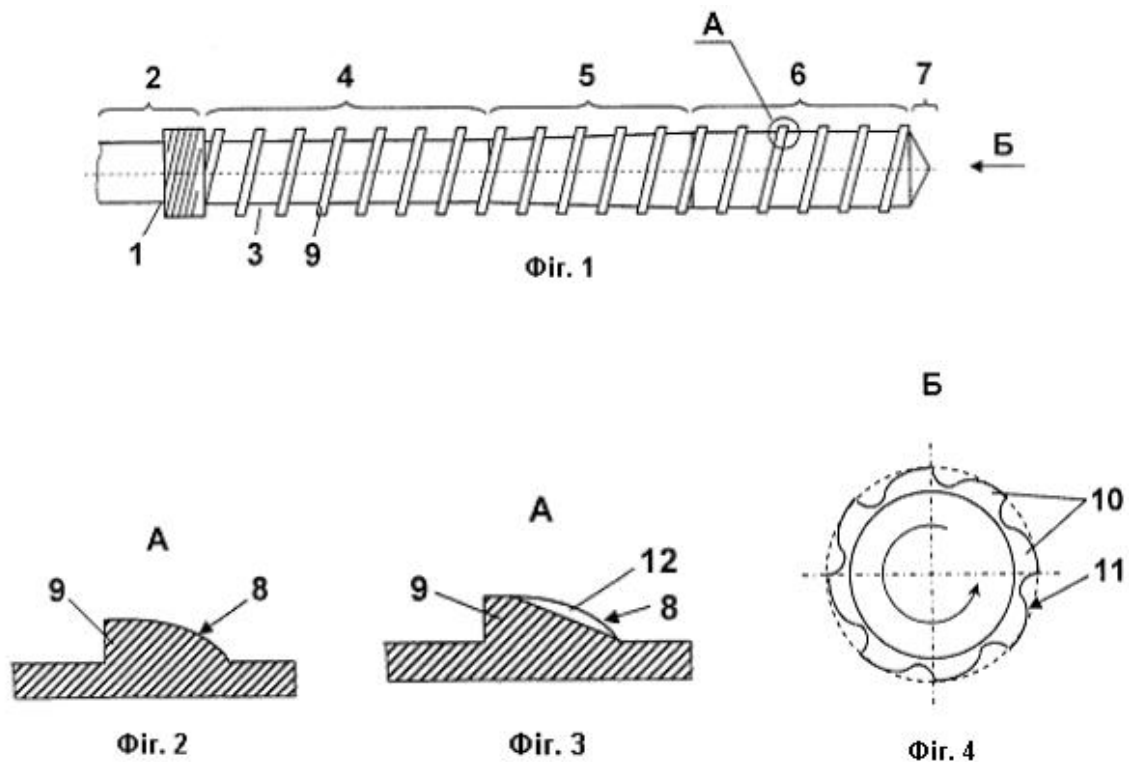


Рисунок 4.3 – Опуклий гребінь з поздовжніми виступами

- 1 – вал черв'яка 2 – привідна частина 3 – зона ущільнення
 4 – гвинтова нарізка 5 – зона дозування 6 – плавильна зона 7 – формувальний отвір
 8 – опуклий гребінь 9 – робоча поверхня гвинтової нарізки
 10 – поздовжній виступ 11 – напрямок обертання 12 – скошена грань виступу

Суть технічного рішення полягає у формуванні на робочій поверхні гвинтової нарізки (9) опуклих гребенів (8), які оснащуються поздовжніми виступами (10) зі скошеними гранями (12) у напрямку обертання (11). Це створює додаткове зчеплення з полімерною масою та сприяє її перемішуванню при просуванні вздовж черв'яка. У деяких варіантах на скошених гранях можуть бути виконані додаткові поперечні пази.

Це рішення дозволяє підвищити ефективність транспортування матеріалу по каналу екструдера, покращити змішувальний ефект, уникнути застійних зон у зоні дозування та забезпечити більш стабільну якість переробки.

Джерело [5] описує конструкцію черв'яка екструдера(рис 4.4), у якого вал складається з послідовно розміщених втулок, зовнішні поверхні яких розташовані під кутом до осі валу.

Конструкція спрямована на підвищення універсальності черв'яка для переробки різних типів полімерів з різною в'язкістю та термічними властивостями. Традиційні суцільні вали обмежені за можливістю локального налаштування геометрії міжвиткового простору. Запропоноване рішення дозволяє легко модифікувати геометрію каналу за рахунок конфігурації втулок.

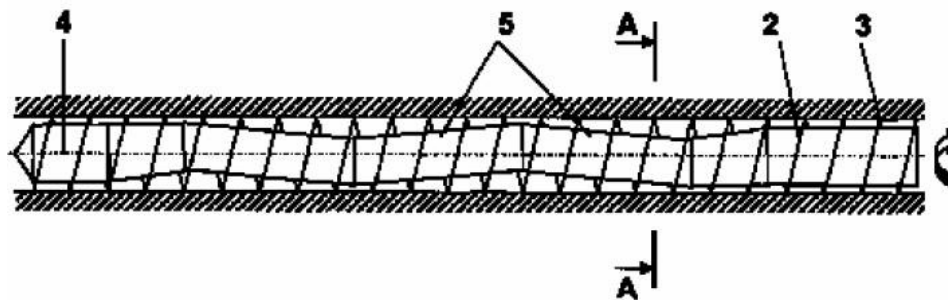


Рисунок 4.4 – Черв'як, у якого вал складається з послідовних втулок, які мають кут до осі валу

2 – вісь обертання 3 – внутрішній канал 4 – корпус екструдера 5 – втулки з нахилом

Суть технічного рішення полягає у тому, що вал черв'яка не є монолітним, а утворений з окремих втулок (5), які встановлюються одна за одною. Зовнішня поверхня кожної втулки розміщується під заданим кутом до осі обертання (2), тоді як внутрішні отвори залишаються співвісними (3). Це дозволяє створювати змінну геометрію міжвиткового простору, не змінюючи конструкцію всього валу.

Це рішення дозволяє оперативно змінювати робочі характеристики черв'яка шляхом підбору відповідних втулок, оптимізувати транспортування матеріалу залежно від його властивостей, а також спростити виготовлення та обслуговування черв'яка за рахунок розбірної конструкції.

Джерело [6] описує конструкцію двошнекового екструдера(рис 4.5) з потовщеним ребром витка для покращення транспортування і стабілізації потоку полімерного розплаву.

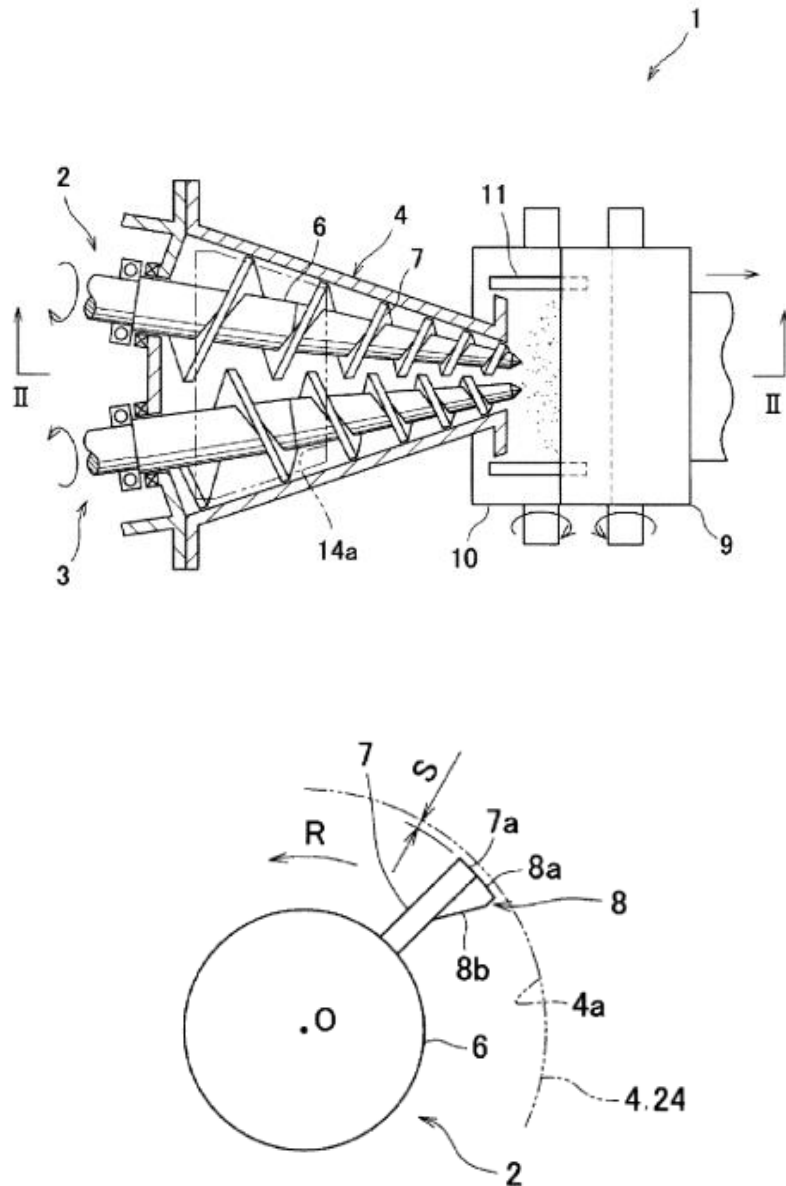


Рисунок 4.5 – Потовщене ребро витка

- 1 – двошнековий екструдер 2 – шнек першого каналу 3 – шнек другого каналу
 4 – гвинтовий виток 5 – зона з потовщеним витком 6 – осі обертання
 7 – потовщене ребро витка 8 – міжвитковий простір (щілина) 10, 11 – вихідні
 зони 12 – клиноподібне потовщення 13 – вигнуте потовщення R – напрям
 обертання S, T, W – зони розподілу потоку в перетині

Конструкція спрямована на усунення зворотного потоку розплавленого полімеру в міжвитковому просторі та вирівнювання тиску вздовж гвинтової лінії. У традиційних шнеках частина матеріалу може повертатися назад у напрямку, протилежному подачі, що знижує ефективність транспортування, порушує стабільність тиску та викликає нерівномірність переробки. Запропоноване рішення усуває ці проблеми шляхом зміни геометрії витка.

Суть технічного рішення полягає у збільшенні висоти ребра витка (7) у визначеній зоні шнека, в результаті чого потовщене ребро частково заповнює міжвитковий простір (8). Це дозволяє обмежити об'єм мертвих зон, зменшити зворотний потік і підтримувати стабільний тиск у гвинтовому каналі. У патенті також розглядаються альтернативні форми потовщення — клиноподібне (12) і вигнуте (13), які впливають на характер течії розплаву.

Це рішення дозволяє досягти стабільного тиску по довжині шнека, покращити транспортування матеріалу, знизити турбулентність і пульсації потоку, а також підвищити якість змішування полімеру в зоні переробки.

4.2 Обґрунтування вибору модернізації черв'яка екструдера

Було обрано джерело [6] на основі технічного рішення, запропонованого в патенті, що передбачає потовщення витка черв'яка з метою зменшення зворотного потоку розплаву, зниження об'єму мертвих зон та стабілізації тиску вздовж робочого каналу. Дане рішення було адаптовано до конструкції одночерв'ячного екструдера, який застосовується для виготовлення рукавної плівки, з урахуванням особливостей такого процесу.

У класичній конструкції одночерв'ячного екструдера вал має постійну гвинтову нарізку, яка виконує функції подачі, плавлення та транспортування полімерного матеріалу. Проте при переробці термочутливих полімерів або при виготовленні тонкостінних виробів, зокрема рукавної плівки, виникають труднощі, пов'язані з нестабільним тиском, нерівномірністю подачі та зворотним потоком розплаву, що негативно впливає на однорідність товщини плівки.

Дане винахідницьке рішення (рис.4.6)[5] було модернізовано таким чином, що потовщення реалізовано не як зміна висоти ребра витка (як у двошнековому варіанті), а як потовщення початкового профілю черв'яка на ділянці подачі матеріалу. У цій зоні діаметр черв'яка плавно збільшується, що створює підвищений опір на початковій стадії транспортування. Далі потовщення переходить у звичайну гвинтову нарізку.

Така конструкція забезпечує підвищений тиск і стабільну подачу полімеру на початковому етапі екструзії, що особливо важливо при роботі з тонкими плівками. Крім того, завдяки плавному переходу між ділянками змінного діаметра, відсутні різкі перепади швидкості чи навантаження, що дозволяє уникнути пульсацій потоку.

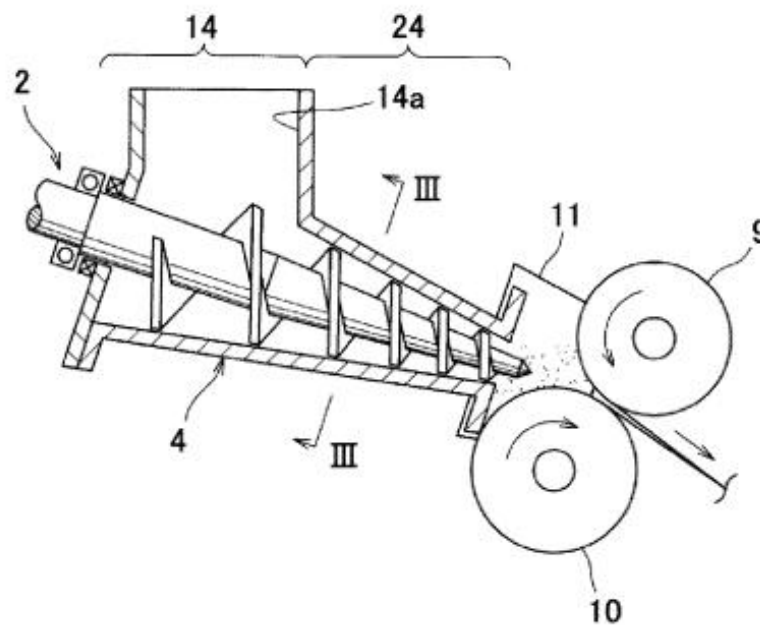


Рисунок 4.6 – Ізометричний вигляд двошнекового екструдера з потовщеним ребром витка для зменшення зворотного потоку

2 – шнек 4 – гвинтовий виток 10 – приймальні ролики 11 – зона формування виробу
14 – корпус екструдера 14a – напрямна частина корпусу 24 – вихідна частина корпусу 9 – напрямок подачі розплаву

Адаптація технічного рішення з патенту до одночерв'ячного екструдера забезпечила зниження зворотного потоку, стабілізацію тиску та покращення рівномірності подачі розплаву. Реалізоване потовщення на початку черв'яка сприяє точнішому контролю подачі матеріалу, що важливо для стабільної товщини рукавної плівки. Рішення підвищує якість продукції та ефективність екструзії.

5 РОЗРАХУНКИ

5.1 Параметричні розрахунки

Черв'як є основним вузлом черв'ячної машини і призначений для транспортування полімерного матеріалу від завантажувальної воронки до формуючої головки, а також для пластикації гранул, ретельного перемішування розплаву і набору необхідного тиску для видавлювання з головки [1].

Діаметр черв'яка є одним з основних параметрів, що характеризують продуктивність черв'ячної машини.

Нижче розглянуто розрахунок екструдера з черв'яком діаметром $D = 90$ мм і відношенням довжини робочої частини до його діаметра $L/D = 35$.

Інші параметри черв'яка вибираються в залежності від матеріалу, що переробляється. У даному випадку матеріалом, що переробляється, є полівінілхлорид і базові параметри черв'яка обчислюються виходячи із залежностей, представлених нижче [2-3].

Крок гвинтової лінії черв'яка

$$t = (0,8 \dots 1,2) \cdot D = 1 \cdot 90 = 90 \text{ мм.}$$

Кут підйому гвинтової лінії

$$\varphi = \arctg\left(\frac{t}{\pi \cdot D}\right) = \arctg\left(\frac{90}{3,14 \cdot 90}\right) = 17,67^\circ.$$

Товщина гребеня черв'яка

$$e = (0,06 \dots 0,12) \cdot D = 0,11 \cdot 90 = 9,9 \text{ мм.}$$

Приймаємо $e=10$ мм

при цьому менші значення приймаються для діаметрів черв'яка більше 125 мм, більші – для діаметрів менше 125 мм.

Зазор між черв'яком і гільзою:

$$\delta = (0,002 \dots 0,003) \cdot D = 0,0024 \cdot 90 = 0,22 \text{ мм,}$$

при цьому менші значення приймаються для більших величин діаметрів черв'яків.

Глибина гвинтового каналу в зоні завантаження

$$h_1 = (0,12 \dots 0,16) \cdot D = 0,126 \cdot 90 = 11,3 \text{ мм.}$$

Глибина гвинтового каналу в зоні дозування складає

$$h_3 = 0,5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4 \cdot h_1}{i} \cdot (D - h_1)} \right] =$$

$$= 0,5 \left[90 - \sqrt{90^2 - \frac{4 \cdot 11,34}{3,7} \cdot (90 - 11,34)} \right] = 2,8 \text{ мм},$$

де $i = 3,7$ – ступінь стиску ПЕНГ (обрати за табл. 1.1).

Діаметр вала черв'яка під завантажувальною воронкою

$$d_1 = D - 2h_1 = 90 - 2 \cdot 11,3 = 67,3 \text{ мм}$$

Діаметр вала черв'яка в зоні дозування

$$d_3 = D - 2h_3 = 90 - 2 \cdot 2,8 = 82,5 \text{ мм}$$

Довжина робочої частини черв'яка розраховується, виходячи із заданого співвідношення L/D

$$L_{\text{роб}} = 35 \cdot D = 35 \cdot 90 = 3150 \text{ мм.}$$

Довжина зони завантаження $L_{\text{зав}}$ становить $(4...6) \cdot D$ або $(0,25...0,35) \cdot L_{\text{роб}}$

$$L_{\text{зав}} = 0,3 \cdot 3150 = 945 \text{ мм.}$$

Приймаємо $L_{\text{зав}} = 945 \text{ мм.}$

Довжина зони стиснення $L_{\text{ст}}$ для більшості полімерів становить $(7...13) \cdot D$ або $(0,2...0,35) \cdot L_{\text{роб}}$

$$L_{\text{ст}} = 0,2 \cdot 3150 = 630 \text{ мм.}$$

Приймаємо $L_{\text{ст}} = 630 \text{ мм.}$

Довжина зони дозування $L_{\text{доз}}$ значною мірою визначає якість підготування розплаву і відношення L/D зростає переважно за її рахунок та за рахунок довжини додаткових зон і елементів. Зазвичай цю величину обирають у межах $(0,4...0,6) \cdot L_{\text{роб}}$. Також допустимим є розрахунок таким чином

$$L_{\text{доз}} = L_{\text{роб}} - L_{\text{зав}} - L_{\text{ст}}.$$

Довжина зони дозування

$$L_{\text{доз}} = 3150 - 945 - 630 = 1575 \text{ мм.}$$

Довжина опори і евольвентного зачеплення приймаємо $L_{\text{ев}} = 150 \text{ мм.}$

Довжина відбійної частини

$$L_{\text{відб}} = (0,1 \dots 0,5) \cdot D = 0,5 \cdot 90 = 45 \text{ мм.}$$

Загальна довжина черв'яка

$$L = L_{\text{роб}} + L_{\text{ев}} + L_{\text{відб}} = 3150 + 150 + 45 = 3345 \text{ мм.}$$

Глибина гвинтового каналу на початку зони стиснення

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} (L - L_{\text{ст}}) = 11,3 - \frac{11,3 - 2,8}{3345} \cdot (3345 - 630) = 4,4 \text{ мм.}$$

Діаметр вала черв'яка на початку зони стиснення

$$d_2 = D - 2h_2 = 90 - 2 \cdot 4,4 = 81,2 \text{ мм.}$$

Отримані розміри нанести на схему, приклад виконання якої наведено на рис. 5.1.

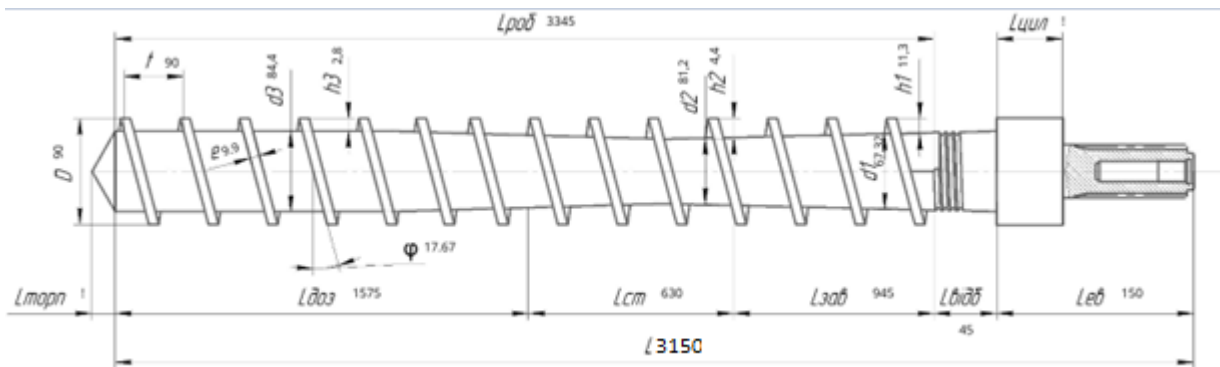


Рисунок 5.1 – Схема черв'яка

Черв'яки виконують з високоякісних сталей, наприклад, 40Х, 40ХН2МА, 38ХМЮА та їхніх аналогів (з границею текучості $\sigma_t = 750\text{--}850 \text{ МПа}$), які піддають азотуванню до HRA 70–74. Після азотування черв'яки шліфують.

Критична частота обертання черв'яка в зоні завантаження може бути визначена по такому співвідношенню (с^{-1})

$$n_{кр} = \frac{42,2}{60\sqrt{D}} = \frac{42,2}{60\sqrt{0,09}} = 2,3 \text{ с}^{-1},$$

де D – діаметр черв'яка, м.

У зонах стиснення та дозування допустиму частоту обертання черв'яків значно зменшують, для дотримання граничної температури нагріву матеріалів.

Робоча частота обертання черв'яка:

$$n_p = (0,2 \dots 0,7) \cdot n_{кр} = 0,435 \cdot 2,3 = 1 \text{ с}^{-1},$$

при цьому нижчі значення коефіцієнтів приймають для малих діаметрів черв'яків, вищі – для великих.

Додатково цей підрозділ було виконано за допомогою програми написаній за допомогою мови програмування 'C++'[8] , додаток В. Результати показані нижче.

Output:

```
t = 90.00 мм
φ = 17.66 град
e = 10.00 мм
δ = 0.22 мм
h1 = 11.34 мм
h3 = 2.76 мм
d1 = 67.32 мм
d3 = 84.47 мм
Lроб = 3150.00 мм
Lзав = 945.00 мм
Lст = 630.00 мм
Лдоз = 1575.00 мм
Leв = 150.00 мм
Lвідб = 45.00 мм
Lзаг = 3345.00 мм
h2 = 4.38 мм
d2 = 81.24 мм
пкр = 2.34 об/с
пр = 1.02 об/с
```

Результати також збережено у файл "results.txt"

5.1.2 Розрахунок коефіцієнта геометричної форми екструзійної головки

Канал головки (рис. 5.2) розбивається на ряд послідовних ділянок простої геометрії, для кожного з яких визначається коефіцієнт геометричної форми K_i , м³ або мм³, а потім сумарне значення для всієї головки[1]

$$K_{\text{заг}} = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5}}$$

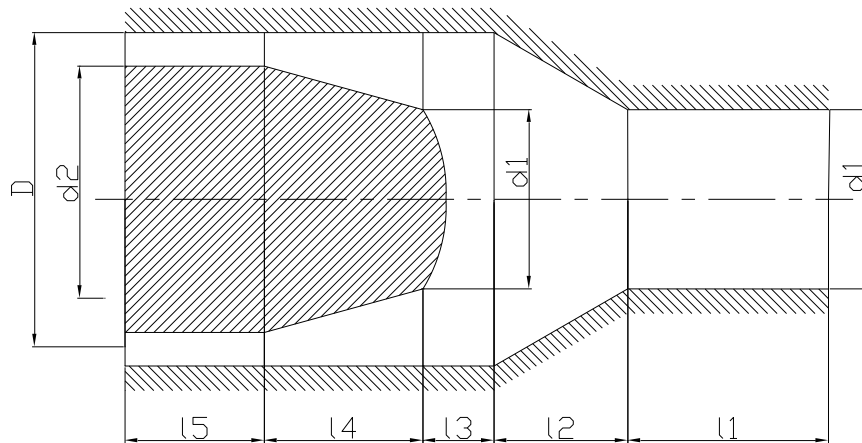


Рисунок 5.2 – Схема головки

Таблиця 5.1 – Перерахунок D_q і L_q/D_q 90*35

d_1 , мм	d_2 , мм	D , мм	l_1 , мм	l_2 , мм	l_3 , мм	l_4 , мм	l_5 , мм
D_q *1,1	d_1 *1,2	d_1 *1,3	L_q/D_q * 9	L_q/D_q *1,4	L_q/D_q *2,5	L_q/D_q *0,8	L_q/D_q *1,5
99	119	129	315	49	88	28	53

Ділянка 1: Круглий циліндровий (рис. 5.3)

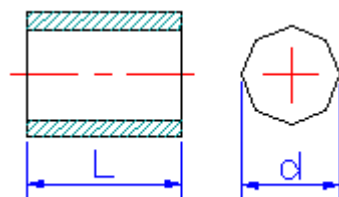


Рисунок 5.3 – Перша ділянка головки

$$K_{i1} = \frac{\pi d^4}{128L} = \frac{3.14 \cdot 99^4}{128 \cdot 315} = 7485 \text{ мм}^3$$

Ділянка 2: Круглий конічний з великим діаметром на вході(рис. 5.4)

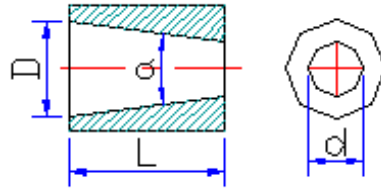


Рисунок 5.4 - Друга ділянка головки

$$K_{i2} = \frac{3\pi D^3 \cdot d^3}{128L(D^2 + Dd + d^2)} = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 129^3 \cdot 99}{128 \cdot 49 \cdot (129^2 + 129 \cdot 99 + 99^2)} = 79481 \text{ мм}^3$$

Ділянка 3: Круглий циліндровий(рис. 5.5)

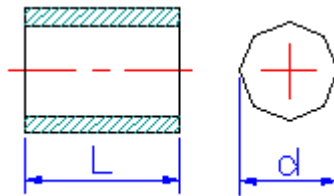


Рисунок 5.5 - Третя ділянка головки

$$K_{i3} = \frac{\pi d^4}{128L} = \frac{3,14 \cdot 129^4}{128 \cdot 88} = 76519 \text{ мм}^3$$

Ділянка 4: Конічний кільцевий з конічної щілиною (рис. 5.6)

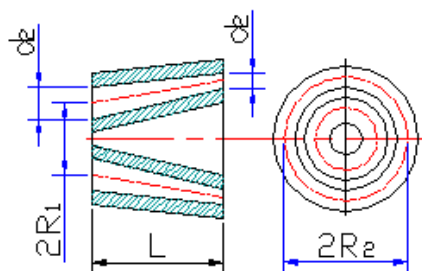


Рисунок 5.6 - Четверта ділянка головки

$$\delta_1 = \frac{D-d_1}{2} = \frac{129-99}{2} = 15 \text{ мм}$$

$$\delta_2 = \frac{D-d_2}{2} = \frac{129-119}{2} = 5 \text{ мм}$$

$$R_1 = \frac{d_1+\delta_1}{2} = \frac{(15+99)}{2} = 57 \text{ мм}$$

$$R_2 = \frac{d_2+\delta_2}{2} = \frac{5+119}{2} = 62 \text{ мм}$$

$$\omega = \frac{2.3(R_1 - R_2)^2}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)^2} \lg \frac{R_1\delta_2}{R_2\delta_1} - \frac{(R_1 - R_2)(\delta_1 - \delta_2)}{(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)\delta_1\delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2\delta_1^2\delta_2^2}$$

$$\omega = \frac{2,3(57 - 62)^2}{(57 * 5 - 62 * 15)^2} \lg \frac{57 * 5}{62 * 15} - \frac{(57 - 62) * (15 - 5)}{(57 * 5 - 62 * 15) * 15 * 5} - \frac{15^2 - 5^2}{2 * 15^2 * 5^2}$$

$$= -0,0189$$

$$K_{i4} = \frac{\pi(R_1\delta_2 - R_2\delta_1)}{6L\omega} = \frac{3,14*(57*5 - 62*15)}{6*53*0.0189} = 635.65 \text{ мм}^3$$

Ділянка 5: Кільцевий (рис. 5.7)

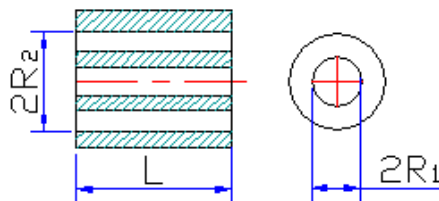


Рисунок 5.7 – П'ята ділянка головки

$$K_{i5} = \frac{\pi(R_2+R_1)(R_2-R_1)^3}{12L} = \frac{3,14*\left(\frac{129}{2}+\frac{119}{2}\right)\left(\frac{129}{2}-\frac{119}{2}\right)^3}{12*53} = 69.8 \text{ мм}^3$$

$$K_{\text{заг}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{i1}} + \frac{1}{K_{i2}} + \frac{1}{K_{i3}} + \frac{1}{K_{i4}} + \frac{1}{K_{i5}}} = \frac{1}{\frac{1}{7481} + \frac{1}{79441} + \frac{1}{76918} + \frac{1}{538,95} + \frac{1}{76,52}}$$

$$= 62.3 \text{ мм}^3$$

Отже після проведення розрахунку було визначено $K_{\text{заг}} = 62.3 \text{ мм}^3$

5.1.3 Розрахунок продуктивності черв'ячної машини

Визначальний вплив на продуктивність черв'ячної машини має зона дозування черв'яка. Ефективність зони дозування значною мірою залежить від геометричних параметрів самого черв'яка. Продуктивність черв'ячного екструдера в цілому залежить не тільки від геометричних розмірів шнека і числа його оборотів, а й значною мірою від конструкції формуючої голівки.

На основі гідродинамічного підходу до аналізу взаємодії робочих органів з матеріалом, що переробляється, в зоні дозування екструдера прийнято розглядати три складові потоку руху розплаву:

1) прямий потік, тобто потік розплаву, що рухається міжвитковим простором у напрямку від зони завантаження до зони дозування вздовж осі черв'яка; виникає внаслідок обертання черв'яка відносно циліндра;

2) зворотній потік, тобто потік розплаву, що рухається у протилежному напрямку, що викликано перепадом тиску P по довжині шнека;

3) потік витoku, що рухається у зазорі між зовнішньою поверхнею витків черв'яка та внутрішньою поверхнею матеріального циліндра у напрямку від зони дозування.

Подібний поділ на три потоки в каналі шнека слід вважати умовним, так як протитечії практично не існує, а має місце деяке обмеження прямого потоку, що виникає в результаті опору головки.

Об'ємна секундна продуктивність черв'ячної машини для переробки полімерів, в залежності від опору головки і конструкції зони дозування розраховується наступним чином

$$Q = \frac{\alpha \cdot K_{\text{заг}} \cdot n_p}{K_{\text{заг}} + \beta + \gamma} \left(\frac{\text{мм}^3}{\text{с}} \right) = \frac{1153.5 * 66.3 * 1}{66.3 + 0.037 + 0.00122} = 3277 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}}$$

де n_p – робоча швидкість обертання черв'яка,

$K_{\text{заг}}$ – загальний коефіцієнт геометричної форми головки,

α – коефіцієнт прямого потоку,

β – коефіцієнт зворотного потоку,

γ – коефіцієнт потоку витоку.

Значення коефіцієнтів прямого потоку α , зворотного потоку β та потоку витоку γ для черв'яка зі змінною глибиною нарізки визначаються таким чином:

$$\alpha = \frac{\pi^3(t-\lambda e)c}{a+t^2b},$$

$$\beta = \frac{\pi t(t-\lambda e)}{12L_{\text{доз}}(a+t^2b)},$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 D \delta^3 t^2}{10eL_{\text{доз}}\sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}},$$

$$\alpha = \frac{3,14^3 * (90 - 1 * 9,9) * 292}{20,25 + 90^2 * 0,000274} = 32226 \text{ мм}^3$$

$$\beta = \frac{3,14 * 90 * (90 - 1 * 9,9)}{12 * 1575 * (32226 + 90^2 * 0,000274)} = 0.053 \text{ мм}^3$$

$$\gamma = \frac{3,14^2 * 90 * 0.15^3 * 90^2}{10 * 9,9 * 1575 * \sqrt{3,14^2 * 90^2 + 90^2}} = 0.001552 \text{ мм}^3$$

де c , a , b – коефіцієнти, що характеризують шнек зі змінною глибиною нарізки:

$$c = 1 - \frac{6,9D}{2(h_2 - h_3)} \lg\left(\frac{h_2}{h_3}\right) + \frac{D^2}{2h_2h_3} = 1 - \frac{6,9 * 90}{2 * (4,4 - 2,8)} \lg\left(\frac{4,4}{2,8}\right) + \frac{90^2}{2 * 4,4 * 2,8} = 292$$

$$a = \frac{\pi^2}{h_2h_3} \left(\frac{D(h_2 + h_3)}{2h_2h_3} - 1 \right) = \frac{3,14^2}{4,4 * 2,8} * \left(\frac{90 * (4,4 + 2,8)}{2 * 4,4 * 2,8} - 1 \right) = 20,25 \text{ мм}^{-4}$$

$$b = \frac{2,3}{(h_2 - h_3)D^3} \lg\left(\frac{h_2(D + d_3)}{h_3(D + d_1)}\right) + \frac{2h_2h_3 + (h_2 + h_3)D}{2D^2h_2^2h_3^2} =$$

$$= \frac{2,3}{(4,4 - 2,8) * 90^3} * \lg\left(\frac{4,4(90 + 84,4)}{2,8 * (90 + 67,32)}\right) + \frac{2 * 4,4 * 2,8 + (4,4 + 2,8) * 90}{2 * 90^2 * 4,4^2 * 2,8^2} = 0,000274 \text{ мм}^{-4}$$

де t – крок гвинтової лінії (нарізки) черв'яка,

λ – число заходів гвинтової нарізки (приймаємо $\lambda = 1$),

e – товщина гребеня нарізки черв'яка,

$L_{\text{доз}}$ – довжина зони дозування,

D – зовнішній діаметр черв'яка,

δ – висота зазору між черв'яком та корпусом,

h_2 – глибина гвинтового каналу на початку зони стиснення,

h_3 – глибина каналу в зоні дозування,

d_3 – діаметр вала черв'яка в зоні дозування,

d_1 – діаметр вала черв'яка під завантажувальною воронкою.

Вагова продуктивність розраховується, знаючи об'ємну продуктивність

$$\Pi = Q \cdot \rho, [\text{кг/год}]$$

$$Q = 3277 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}} = 0.118 \frac{\text{м}}{\text{год}}$$

$$\rho = 827 + (145 - 140) * \frac{818.4 - 827.6}{160 - 140} = 825 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\Pi = 0.118 * 825 = 97.37 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

де ρ – густина розплаву полімеру при температурі переробки t , °C (на виході з екструдера).

$$\rho = 827 + (145 - 140) * \frac{818.4 - 827.6}{160 - 140} = 825 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

4 Розрахунок перепаду тиску в екструзійній головці

$$Q = 3277 \frac{\text{мм}^3}{\text{с}}$$

Розрахунок перепаду тиску в екструзійній головці виконується таким чином:

- 1) розраховується швидкість зсуву $\dot{\gamma}_i$ для простих ділянок головки, аналогічно до знаходження коефіцієнтів геометричної форми головки K_i (формули див. табл. до розрахунку коеф. геометричної форми);

Ділянка 1: Круглий циліндровий

$$\dot{\gamma}_{i1} = \frac{32Q}{\pi d^3} (\text{с}^{-1}) = \frac{32 * 3277}{3.14 * 99^3} = 0,344 \text{ с}^{-1}$$

$$\Delta P_{i1} = \frac{Q \cdot \mu_i}{K_i} = \frac{3277 * 2 * 10^4}{7.485 * 10^3} = 8.757 * 10^4 \text{ Па}$$

Ділянка 2: Круглий конічний з великим діаметром на вході

$$\dot{\gamma}_{i2} = \frac{256Q}{\pi(D^3 + d^3)} = \frac{256 * 3277}{\pi * (129^3 + 99^3)} = 0.861 \text{ с}^{-1}$$

$$\Delta P_{i2} = \frac{Q \cdot \mu_i}{K_i} = \frac{3277 * 1.4 * 10^4}{8.478 * 10^5} = 5.547 * 10^3 \text{ Па}$$

Ділянка 3: Круглий циліндровий

$$\dot{\gamma}_{i3} = \frac{32Q}{\pi d^3} = \frac{32 * 3277}{\pi * 129^3} = 0.157 \text{ с}^{-1}$$

$$\Delta P_{i3} = \frac{Q \cdot \mu_i}{K_i} = \frac{3277 * 3 * 10^4}{76519} = 1.285 * 10^4 \text{ Па}$$

Ділянка 4: Конічний кільцевий з кінцею щілиною

$$\dot{\gamma}_{i4} = \frac{22.32 \cdot Q}{\pi \cdot (R_1 + R_2)(\delta_2 + \delta_1)^2} = \frac{22.32 \cdot 3277}{\pi \cdot (57 + 62)(5 + 15)^2} = 4.892 \text{ с}^{-1}$$

$$\Delta P_{i4} = \frac{Q \cdot \mu_i}{K_i} = \frac{3277 * 7 * 10^3}{635.6} = 3.609 * 10^5 \text{ Па}$$

Ділянка 5: Кільцевий

$$\dot{\gamma}_{i5} = \frac{5,58 \cdot Q}{\pi \cdot (R_1 + R_2) \cdot (R_2 - R_1)^2} = \frac{5,58 \cdot 3277}{\pi \cdot (64.5 + 59.5) \cdot (64.5 - 59.5)^2}$$

$$= 19.981 \text{ с}^{-1}$$

$$\Delta P_{i5} = \frac{Q \cdot \mu_i}{K_i} = \frac{3277 \cdot 3.5 \cdot 10^3}{69.8} = 1.643 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$\Delta P = \Delta P_{i1} + \Delta P_{i2} + \Delta P_{i3} + \Delta P_{i4} + \Delta P_{i5}$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= 8.757 \cdot 10^4 + 5.547 \cdot 10^3 + 1.285 \cdot 10^4 + 3.609 \cdot 10^5 + 1.643 \cdot 10^6 \\ &= 2.11 \cdot 10^6 \text{ Па} \end{aligned}$$

Отже $\Delta P = 2.11 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

5.1.4 Потужність привода екструдера

Знання споживаної черв'ячною машиною потужності необхідне для розрахунку енергетичних витрат на виробництво виробів. При усталеному режимі екструзії, величина споживаної потужності є показником стабільності процесу. Зазвичай контроль ведуть за потужністю, яка споживається приводом.

Потужність, споживана екструдером (N , Вт) для переробки пластичних мас, йде на переміщення матеріалу в гвинтовому каналі черв'яка (N_1) і на зріз матеріалу в зазорі між гребенем черв'яка і внутрішньою стінкою циліндра або гільзи (N_2)

$$N = (N_1 + N_2)/2 = (1.254 \cdot 10^5 + 5.259 \cdot 10^4) = 89 \text{ kW}$$

Потужність, що витрачається на переміщення матеріалу в гвинтовому каналі, для черв'яка зі змінною глибиною нарізки

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{\pi^3(t - e)LJ\mu_{\text{efl}}}{t} n_p^2 + \alpha \cdot \Delta P \cdot n_p = \\ &= \frac{\pi^3(0.09 - 0.01) \cdot 3.345 \cdot 0.221 \cdot 5.9 \cdot 10^3}{0.09} 1^2 + 3.216 \cdot 10^4 \cdot 2.11 \cdot 10^6 \cdot 1 \\ &= 1.254 \cdot 10^5 \text{ W} \end{aligned}$$

де t – грок гвинтової лінії черв'яка, м,

e – товщина гребеня черв'яка, м,

L – загальна довжина черв'яка, м,

n_p – робоча швидкість обертання черв'яка, c^{-1} ,

α – коефіцієнт прямого потоку, m^3 ,

ΔP – загальний перепад тиску в головці, Па,

J – коефіцієнт, m^2

$$J = \frac{\pi^2 D^2 - 4t^2}{\pi^2} + \frac{(D + d_3)^3 - (D + d_2)^3}{3(d_3 - d_2)} + \frac{2,3\pi^2 D^5 \lg \frac{h_2}{h_3}}{(t^2 + \pi^2 D^2)(h_2 - h_3)} =$$

$$= \frac{\pi^2 0.09^2 - 4 * 0.09^2}{\pi^2} + \frac{(0.09^2 + 0.084)^3 - (0.09^2 + 0.081)^3}{3(0.084 - 0.081)}$$

$$+ \frac{2,3\pi^2 0.09^5 \lg \frac{4.4 * 10^{-3}}{2.8 * 10^{-3}}}{(0.09^2 + \pi^2 0.09^2)(4.4 * 10^{-3} - 2.8 * 10^{-3})} = 0.221 * m^2$$

де D – діаметр черв'яка, м,

d_3 – діаметр вала черв'яка в зоні дозування, м,

d_2 – діаметр вала черв'яка на початку зони стиснення, м,

h_2 – глибина гвинтового каналу в зоні стиснення, м,

h_3 – глибина гвинтового каналу в зоні дозування, м.

Потужність, що витрачається на зріз матеріалу в зазорі між гребенем черв'яка і внутрішньою стінкою циліндра або гільзи, для черв'яка зі змінною глибиною нарізки

$$N_2 = \frac{\pi^3 D^3 e L \mu_{\text{еф}2}}{\delta t} n_p^2 = \frac{\pi^3 0.09^3 * 0.01 * 3.345 * 1.3 * 10^3}{2.16 * 10^{-4} * 0.09} 1^2 = 5.259 * 10^4 W$$

У вищенаведених формулах також фігурує ефективна в'язкість $\mu_{\text{еф}1,2}$, Па · с, що визначається за графічними залежностями для матеріалу, що використовується при виготовленні виробів (див. попередній розрахунок), залежно від швидкості зсуву $\dot{\gamma}_{1,2}$, c^{-1} , що визначається таким чином:

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{\pi^2 (D - h_{\text{сер}})(D - 2h_{\text{сер}})n}{h_{\text{сер}} \sqrt{\pi^2 (D - 2h_{\text{сер}})^2 + t^2}} = \frac{\pi^2 (0.09 - 3.6 * 10^{-3})(0.09 - 2 * 3.6 * 10^{-3})n}{3.6 * 10^{-3} \sqrt{\pi^2 (0.09 - 2 * 3.6 * 10^{-3})^2 + 0.09^2}}$$

$$= 72.667 c^{-1}$$

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{\pi^2 D^2 n}{\delta \sqrt{\pi^2 D^2 + t^2}} = \frac{\pi^2 0.09^2 * 1}{2.16 * 10^{-4} \sqrt{\pi^2 0.09^2 + 0.09^2}} = 1.272 * 10^3 * c^{-1}$$

$$\text{де } h_{\text{сер}} = \frac{(h_2 + h_3)}{2} = \frac{(4.4 \cdot 10^{-3} + 2.8 \cdot 10^{-3})}{2} = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Загальна споживана потужність $N_{\text{заг}}$ повинна бути вищою за розраховану потужність N , щоб компенсувати не враховані розрахунком втрати енергії:

- на захоплення і транспортування твердого гранульованого матеріалу в зоні завантаження;
- на просування пробки матеріалу, що складається із суміші твердого і частково розплавленого матеріалу в зоні стиснення;
- на подолання сил тертя осрової реакції в опорному підшипнику;
- на механічні втрати в приводі черв'ячного екструдера.

Перелічені втрати можуть бути враховані коефіцієнтом корисної дії черв'ячних машин, який при переробці термопластів складає $\eta = 0,4 \dots 0,6$. Тоді загальна споживана потужність

$$N_{\text{заг}} = \frac{N}{\eta} = \frac{89}{0.6} = 148 \text{ kW}$$

За знайденою загальною потужністю, обирається* двигун потужністю $N_{\text{дв}}$ для приводу екструдера (за довідковими матеріалами). Обрати асинхронний двигун з кількістю обертів близько $n_{\text{дв}} = 1500$ об/хв.

*В тексті курсової зазначити бібліографічне посилання на джерело з характеристиками двигуна.

5.2 Розрахунок на міцність

Базовий варіант розрахункової схеми черв'яка зображено на рис. 5.8.

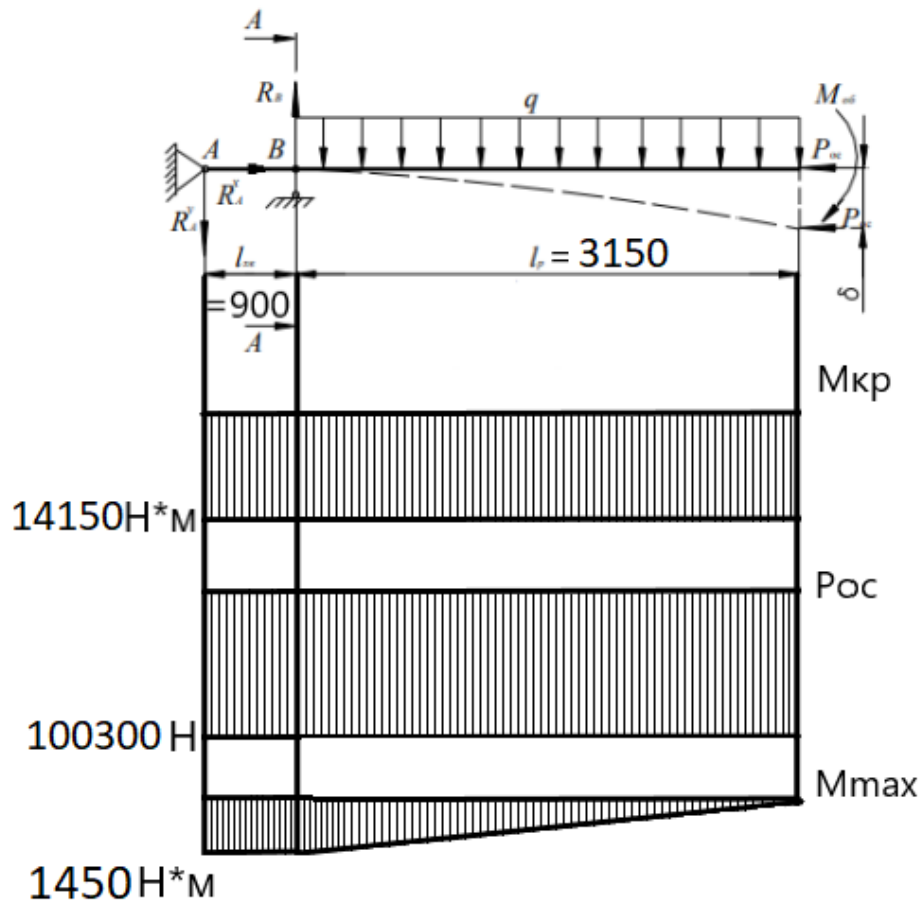


Рисунок 5.8 - Епюра напружень черв'яка

Крутний момент (Н·м) становить

$$M_{кр} = \frac{30N}{\pi n} = \frac{30 * 89000}{3.14 * 60} = 14150 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

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

Осьове зусилля

$$P_{ос} = \frac{2M_{кр}}{D} \operatorname{tg} \varphi = \frac{2 * 14150}{0.09} * \tan(17.67^\circ) = 100300 \text{ Н}$$

де D – зовнішній діаметр черв'яка, м;

$\varphi = 17.67^\circ$ – кут підйому нарізки;

де t – крок нарізки, м.

Розподілене навантаження від власної ваги черв'яка (Н/м)

$$q = \frac{9,8G}{l_p} = \frac{9,8 * 94}{3.15} = 292 \text{ Н/м}$$

де G – маса черв'яка, кг, l_p – довжина робочої частини

$$G = \frac{\pi(D - d_0)^2}{4} \rho l_p = \frac{\pi(0.09 - 0.0198)^2}{4} 7710 * 3.15 = 94$$

d_0 – діаметр каналу для охолодження, м

$$d_0 = (0,15 \dots 0,25)D = 0.2 * 0.09 = 0.0198 \text{ м}$$

$\rho = 7710 \text{ кг/м}^3$ густина сталі 38Х2МЮА [7].

Стискальне напруження в тілі черв'яка виникає від осьової сили та згинального моменту, спричиненого його вагою. Перша складова напруження рівномірна по перерізу, а друга змінюється від розтягувальної у верхній частині перерізу до стискальної в нижній. Тому величина стискального напруження має найбільше значення на нижніх волокнах і розраховується за формулою

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{p_{\text{ос}}}{F} + \frac{M_{\text{max}}}{W_x} = \frac{100300}{0,00326} + \frac{1450}{2.98 * 10^{-5}} = 79.5 \text{ Мпа}$$

де F – площа небезпечного перерізу (під завантажувальною лійкою, у місці початку нарізки, де найбільші навантаження та найменша площа, без урахування площі перерізу витків), м^2 :

$$F = \frac{\pi d_1^2}{4} (1 - \alpha^2) = \frac{3,14 * 0,0674^2}{4} * (1 - 0,2936^2) = 0,00326 \text{ м}^2$$

$$\alpha = d_0/d_1 = \frac{0.0198}{0.0674} = 0,2936$$

d_1 – діаметр осердя в зоні завантаження, м;

M_{max} – максимальний згинальний момент від власної ваги (у місці початку нарізки), Н·м:

$$M_{\text{max}} = \frac{1}{2} q l_p^2 = \frac{1}{2} * 292 * 3,15^2 = 1450 \text{ Н * м}$$

W_x – осьовий момент опору, м^3 :

$$W_x = \frac{\pi d_1^3 (1 - \alpha^4)}{32} = \frac{\pi * 0.0674^3 (1 - 0.2936^4)}{32} = 2.98 * 10^{-5} \text{ м}^3$$

Дотичні напруження

$$\tau = \frac{M_{\text{кр}}}{W_p} = \frac{1.415 * 10^4}{5.97 * 10^{-5}} = 237 \text{ МПа}$$

де W_p – полярний момент опору, м^3

$$W_p = \frac{\pi d_1^3 (1 - \alpha^4)}{16} = \frac{\pi * 0.0673^3 * (1 - 0.267^4)}{16} = 5.97 * 10^{-5}$$

Еквівалентне напруження за III теорією міцності

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma_{\text{ст}}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{79.5^2 + 4 * 237^2} = 481 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу не повинен перевищувати допустиме значення [7]

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\text{екв}}} = \frac{835}{481} \geq 1,6 = 1.7 \geq [n]$$

де допустимий коефіцієнт запасу $[n]$ зазвичай беруть рівним 1,6...2,0.

Отже коефіцієнт міцності $n=1.7$

Умова міцності виконується.

5.2.2 Розрахунок на стійкість

Оскільки черв'як витримує згинальний момент від циклічної дії власної ваги, то доцільна його перевірка на тривкість

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{(k_{\sigma})_d \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_c} = \frac{392}{3 * 51.3 + 0,25 * 0} = 2.5$$

де n_{σ} – коефіцієнт запасу міцності під час циклічного навантаження;

σ_{-1} – допустиме напруження під час циклічного навантаження:

$$\sigma_{-1} = 0,4\sigma_{\text{в}} = 0,4 * 980 = 392 \text{ МПа};$$

a – амплітуда змінення напружень (у цьому випадку вони змінюються від $+\sigma_{\text{max}}$ до $-\sigma_{\text{max}}$;

σ_{max} – найбільше напруження від дії згинального моменту:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_x} = \frac{1450}{2.98 \times 10^{-5}} = 48.7 \text{ МПа};$$

σ_c – середнє циклове напруження ($\sigma_c=0$, оскільки цикл симетричний);

ψ_{σ} – коефіцієнт, що залежить від матеріалу сталі 38Х2МЮА [7] ($\sigma_{\text{в}} = 980$ МПа $\psi_{\sigma} = 0,25$);

$(k_{\sigma})_d$ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень, який можна визначити за формулою:

$$(k_{\sigma})_d = \frac{k_{\sigma}}{\beta * \varepsilon} = \frac{2}{1 * 0,55} = 3.17$$

де k_σ – коефіцієнт концентрації напружень (для даного випадку $k_\sigma = 1,9 - 2,0$);

β – коефіцієнт, який враховує якість поверхні деталі, для полірованої поверхні черв'яка $\beta=1$;

ε – коефіцієнт, який враховує розмір перерізу деталі, для деталей з легованих сталей за наявності концентрації напружень значення ε .

Умова стійкості виконується.

5.2.3 Розрахунок жорсткості

Разом з розрахунком на міцність, черв'як перевіряється на жорсткість. Метою цього розрахунку є перевірка того, чи перебуває прогин черв'яка в межах конструкційного зазору. Здебільшого це має значення під час холостого ходу, оскільки під час роботи екструдера канали черв'яка й зазори заповнені розплавом під тиском, який запобігає прогину й тертю по корпусу.

Полярний момент інерції перерізу, м^4

$$I = \frac{\pi d_1^4}{64} (1 - \alpha^4) = \frac{3,14 * 0,0674^4}{64} (1 - 0,2936^4) = 9,97 * 10^{-6} \text{ м}^4$$

Радіус інерції, м

$$i = \sqrt{\frac{I}{F}} = \sqrt{\frac{9,97 * 10^{-6}}{0,0033}} = 0,055 \text{ м}$$

Ступінь жорсткості

$$\lambda = \frac{\mu l_p}{i} = \frac{2 * 3,15}{0,055} = 114,5$$

де μ – коефіцієнт замурування (у цьому випадку $\mu=2$).

Якщо $\lambda > 50$, то черв'як вважають не жорстким і перевіряють на найбільший прогин за формулою:

$$\begin{aligned} \delta_p &= \frac{1}{EI} \left[\frac{q}{k^2} \left(\frac{1}{k^2} + \left(\frac{1}{k^2} + \frac{l_p^2}{2} \right) \right) - \frac{1}{k} \left(\frac{q}{k^3} - A l_p \right) \cos(k l_p) - \frac{1}{k^2} \left(\frac{q l_p}{k} - A \right) \sin(k l_p) \right] = \\ &= \frac{1}{2,1 * 10^{11} * 9,97 * 10^{-6}} * \left[\frac{292}{0,219^2} * \left(\frac{1}{0,219^2} + \left(\frac{1}{0,219^2} + \frac{3150^2}{2} \right) \right) - \right. \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{0.219} * \left(\frac{292}{0.219^3} - 414.6 * 3150 \right) * \cos(0.219 * 3150) -$$

$$-\frac{1}{0.219^2} * \left(\frac{292 * 3150}{0.219} - 414.6 \right) * \sin(0.219 * 3150)] = 0,00149\text{м} = 1.5\text{мм}$$

де

$$k = \sqrt{\frac{P_{oc}}{EI}} = \sqrt{\frac{100300}{2,09 * 10^6}} = 0.219 \text{ м}^{-1}$$

$$A = \frac{q \left(l_p - \frac{1}{k} \sin(kl_p) \right)}{k \cos(kl_p)} =$$

$$= \frac{292 * (3150 - \frac{1}{0.219} * \sin(0.219 * 3150))}{0.219 * \cos(0.219 * 3150)} = 414.6 \text{ Н}$$

На початковій стадії проектного розрахунку черв'як можна вибирати з урахуванням дії крутного моменту та осьового зусилля. Після розрахунку геометричних параметрів проводиться повний розрахунок черв'яка. Для більш точного обчислення силових факторів, що діють на черв'як, враховується позацентровий характер осьового зусилля, що виникає від прогину кінця черв'яка δ_p

$$\sigma = \frac{P_{oc}}{F} \left(1 + \frac{\delta_p F}{I} d_1 \right) + \frac{M_{max}}{W_x} =$$

$$= \left(\frac{100300}{0.0033} \right) * \left(1 + \left(\frac{0.0015 * 0.0033}{9.97 * 10^{-6}} \right) * 0.0674 \right) + \left(\frac{1450}{0.00298} \right) = 80 \text{ МПа}$$

Отримане значення підставляється в залежність

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \sqrt{(80)^2 + 4 * 237^2} = \sqrt{6400 + 224676} \approx 480.8 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт запасу не повинен перевищувати допустиме значення

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{екв}} = \frac{835}{480.8} \approx 1.7 \geq 1,6$$

де допустимий коефіцієнт запасу $[n]$ зазвичай беруть рівним 1,6...2,0.

Отже коефіцієнт міцності $n=1.7$.

Умова міцності виконується.

5.2.4 Розрахунок шліцевого з'єднання

Черв'як з'єднується з приводом переважно за допомогою шліцевого з'єднання. Здебільшого використовуються шліци евольвентного профілю, оскільки вони мають більшу поверхню контакту, можуть передавати більше навантаження й довше зношуються. Центрування здебільшого здійснюють по боковій поверхні шліців з посадкою 7H/7n. Така конструкція забезпечує найбільшу точність центрування та усуває можливі люфти. Шліцеві з'єднання перевіряють на зминання за залежністю:

$$\sigma_{зм} = \frac{M_{об}}{R_c * F * z * \psi} = \frac{1.415 * 10^7}{42 * 144 * 28 * 0.75} = 111.4 \leq 120 \text{ МПа}$$

де $R_c = d_d/2 = mz/2 = \frac{3*28}{2} = 42 \text{ мм}$;

m – модуль, мм;

z - кількість зубів шліцевого з'єднання:

$$z = \frac{d_d}{m} = \frac{84}{2} = 84;$$

F – площа контакту, м²:

$$F = 0,8lm = \frac{0,8ld_d}{z} = 0.8 * 60 * 3 = 144 \text{ мм}^2;$$

ψ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантаження по поверхні шліців, береться ψ=0,7-0,8;

[σ]_{зм} – допустиме напруження на зминання, МПа; приймаємо [σ]_{зм} = 120 МПа.

Модуль і кількість зубів беруть відповідно до довідників, приймаємо m = 3.

Умова міцності виконується.

5.3 Тепловий розрахунок екструдера

Тепловий баланс екструдера визначається рівнянням:

$$E_H + E_{ш} = E_M + E_0 + E_{\pi}$$

де E_H - теплота, що надходить від зовнішніх обігрівачів, кВт;

$E_{ш}$ – теплота, що виділяється під час роботи шнека (так званий диссипативний нагрівання – внутрішня теплота тертя), кВт;

E_M – теплота, що йде з нагрітим матеріалом, кВт;

E_0 - теплота, що забирається системою охолодження (водою, повітрям та ін), кВт;

E_{π} – втрати тепла у довкілля, через кожух екструдера, кВт.

З рівняння теплового балансу можна розрахувати кількість теплоти, яку необхідно підвести до екструдера через систему обігріву.

отримуємо:

$$E_H = E_M + E_0 + E_{\pi} - E_{ш} = 39.3 + 16.32 + 0.0187 - 0.3596 = 55.28 \text{ кВт}$$

Складові рівняння балансу визначаються так:

$$E_M = G_M * c_M (t_K - t_H) = 0.027 * 2508 * (145 - 20) = 39.3 \text{ кВт}$$

де G_M – кількість матеріалу, що переробляється, кг/с;

c_M - питома теплоємність полімеру, кДж/(кг К);

t_K, t_H – кінцева та початкова температура полімеру, К.

$$G_M = \frac{Q}{3600} = \frac{97.37}{3600} = 0.027 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

де Q – масова продуктивність екструдера, кг/год.

$$E_0 = G_B * c_B (t_{B1} - t_{B2}) = 0.195 * 4186 * (40 - 20) = 16.32 \text{ кВт}$$

де c_B – питома теплоємність води, кДж/(кг. К);

t_{B1}, t_{B2} - кінцева та початкова температури води, До.

Кількість води G_B , що надходить на охолодження шнека, кг/с:

$$G_B = \rho F v = 1000 * 0.000195 * 1 = 0.195 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

де ρ – щільність води, кг/м³

F – площа поперечного перерізу, м²

v – швидкість течії води, м/с.

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0.01575)^2}{4} = 0.000195 \text{ м}^2$$

де d – діаметр трубки у тілі шнека, м.

$$E_{\pi} = F_k \alpha (t_{\pi} - t_c) = 0.946 \cdot 9.88 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 0.0187 \text{ кВт}$$

$$F_k = \pi d_k L_k =$$

$$\alpha = (9.74 + 0.07 \cdot \Delta t) \cdot 10^{-3} =$$

$$\Delta t = t_{\pi} - t_c = 25 - 20 = 5^{\circ}\text{C}$$

$$L_k = L$$

де F_k - площа зовнішньої поверхні корпусу екструдера;

α – коефіцієнт теплопередачі, кВт/(м²·К);

t_{π} – температура зовнішньої поверхні ізолюваного корпусу; °С;

t_c – температура довкілля, °С;

d_k – діаметр корпусу із ізоляцією, м;

L_k – довжина корпусу, м

$$\begin{aligned} E_{\pi} &= \left(\frac{\pi^3 D^3 \eta_1 L}{h} + \frac{QP}{\cos^2 \varphi} + \frac{\pi^2 D^2 n^2 \eta_2 e L}{\delta t g \varphi} \right) 9.8 \cdot 10^{-10} \\ &= \left(\frac{\pi^3 0.09^3 \cdot 1.1 \cdot 10^3 \cdot 3.150}{1.5 \cdot 10^{-3}} + \frac{4.6584 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^6}{\cos^2 17.77} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\pi^2 0.09^2 \cdot 1.15^2 \cdot 150 \cdot 0.0099 \cdot 3.150}{0.000216 \cdot t g 17.77} \right) 9.8 \cdot 10^{-10} = 0.3596 \text{ кВт} \end{aligned}$$

де D - Діаметр шнека;

n – частота обертання шнека, про/с;

P – тиск у циліндрі, Па;

η_1 – в'язкість розплаву полімеру у спіральному каналі шнека, Па·С;

η_2 – в'язкість розплаву полімеру в зазорі між гребенем шнека та стінкою циліндра, Па·С;

φ – кут підйому гвинтової нарізки шнека, град;

e – ширина гребеня витка.

δ – величина зазору між гребенем шнека та циліндром.

5.4 ЧИСЛОВІ РОЗРАХУНКИ

5.4.1 Постановка задачі

Для аналізу міцності конструкції черв'яка, виготовленого зі сталі 38Х2МЮА (табл 5.1), проведено кінцево-елементне моделювання в ANSYS[9] з такими умовами: температура розплаву поліетилену низького тиску (ПЕНГ) — 145 °С, а температура у зоні завантаження — 70 °С [17]. Модель черв'яка екструдера створена з використанням геометрії, що відповідає реальній конструкції за допомогою програми SolidWorks[10].

Таблиця 5.1- Основні параметри сталі 38Х2МЮА [11]

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Модуль Юнга	E	$2,00 \times 10^5$	МПа
Коефіцієнт Пуассона	γ	0,3	—
Границя текучості	σ_T	835	МПа

Для початку створюємо Steady State Thermal (рис 5.9)

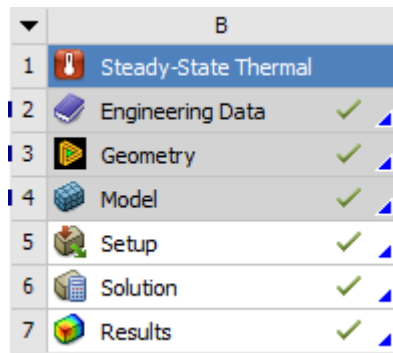


Рисунок 5.9 – Основні етапи підготовки та моделювання (Steady-State Thermal)

Геометрія моделі черв'яка представлена у вигляді тривимірної конструкції з детальною сіткою для проведення числового аналізу (рис 5.10).

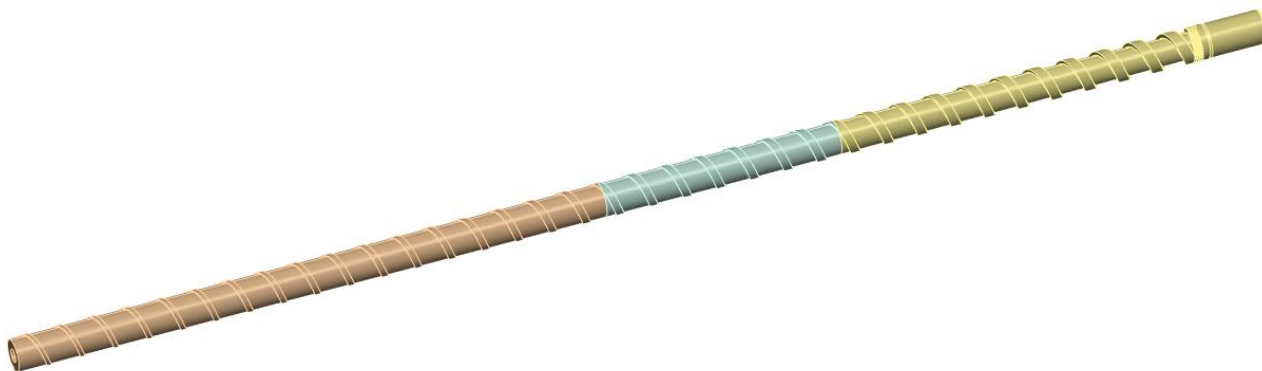


Рисунок 5.10 – Геометрія моделі черв'яка екструдера

Було створено сіткову модель із середнім розміром елементів 40 мм для забезпечення точності розрахунків(рис 5.11).

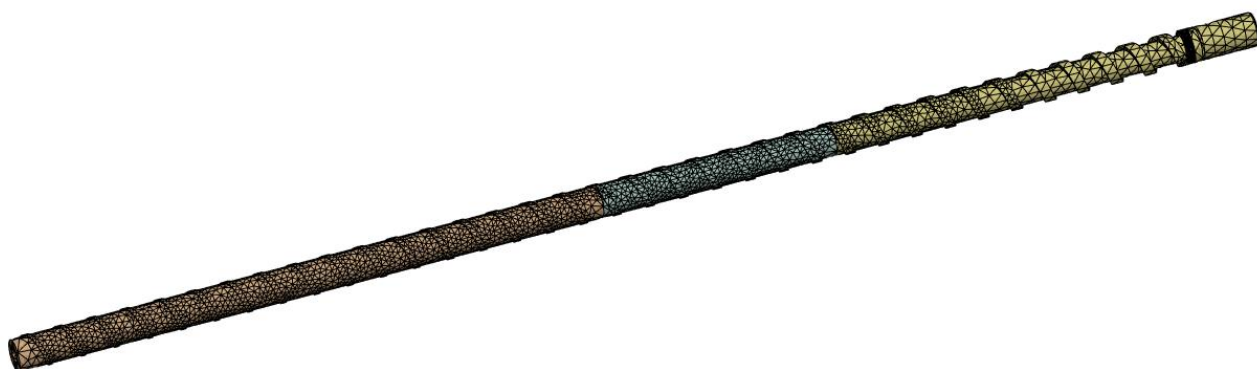


Рисунок 5.11 – Сіткова модель черв'яка екструдера

Для дослідження напруженого стану конструкції черв'яка екструдера було проведено статичний розрахунок на міцність у модулі Static Structural програмного комплексу ANSYS. Під час моделювання були враховані всі основні силові фактори(рис 5.12)., які впливають на черв'як під час експлуатації:

А – Стандартна сила тяжіння (гравітація):

Задано значення прискорення вільного падіння $9806,6 \text{ мм/с}^2$, що відповідає реальним умовам дії ваги конструкції на її тіло.

В – Жорстке закріплення (Fixed Support):

Один із торців черв'яка фіксується для імітації кріплення до корпусу екструдера. Це забезпечує відсутність переміщення та обертання в заданій області.

С – Осьове навантаження (Force):

На вільний кінець черв'яка прикладено осьову силу величиною 50000 Н. Це моделює тиск полімерного матеріалу, що створюється під час подачі та стискання розплаву у формувальну головку.

D – Крутний момент (Moment):

Застосовано крутний момент величиною 79500 Н·мм, що відповідає реальній роботі електроприводу, який обертає черв'як під час процесу екструзії.

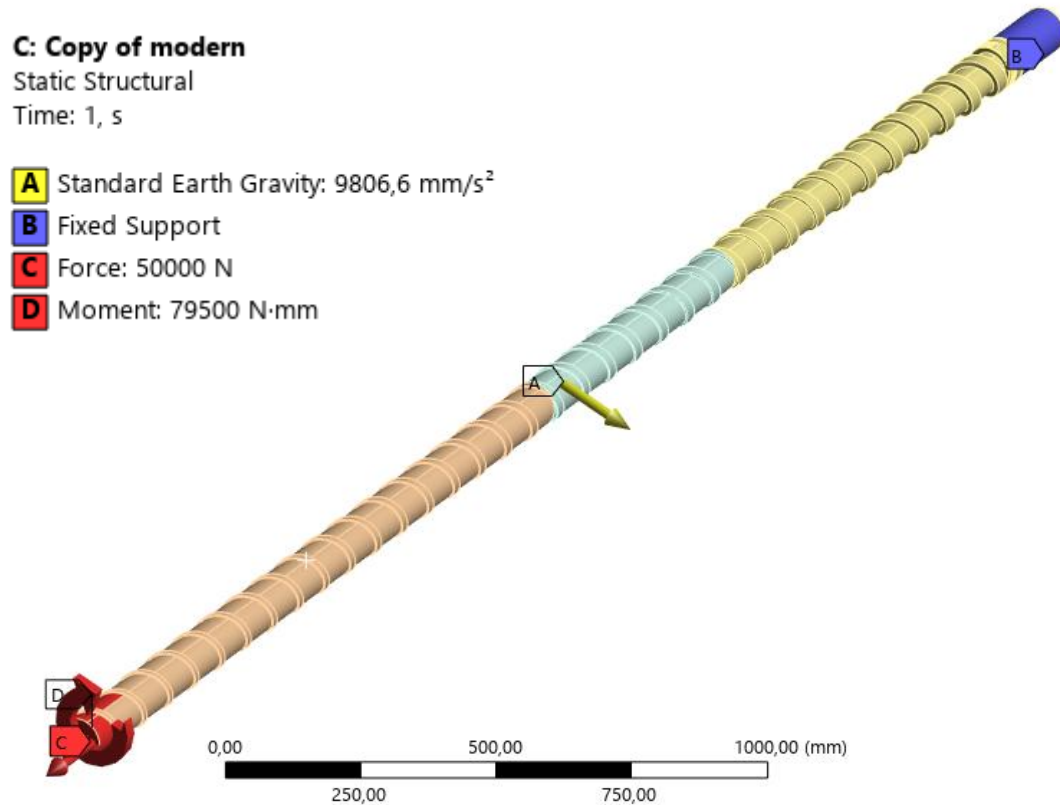


Рисунок 5.12 – Умови навантаження черв'яка екструдера

Це були всі умови які використовувались для розрахунку як базової так і модернізованої моделі черв'яка

5.4.2 Результати розрахунку базової конструкції черв'яка

Температурне поле розраховувалося для стаціонарного теплового режиму. Наведено розподіл температури по довжині черв'яка(рис 5.13).

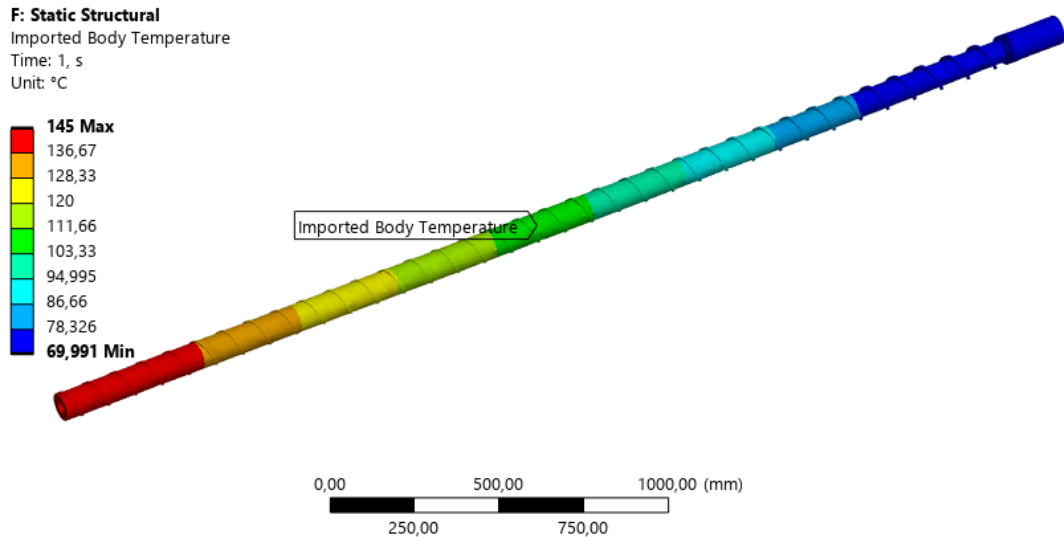


Рисунок 5.13 – Розподіл температурного поля у черв’яку екструдера, °C

З отриманих результатів видно, що максимальна температура становить 145 °C у зоні нагріву, а мінімальна — 70 °C у зоні завантаження.

Результати моделювання (рис. 5.14) показали, що максимальні еквівалентні напруження $\sigma_{\max} = 415,77$ МПа.

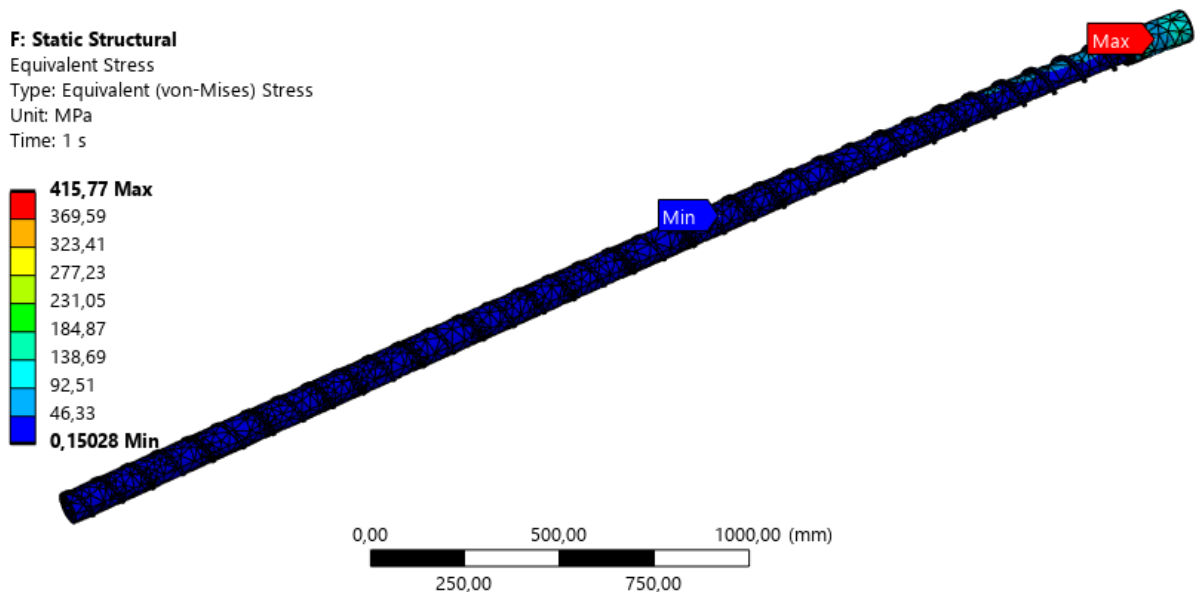


Рисунок 5.14 – максимальні еквівалентні напруження

Запас міцності конструкції в такому випадку

$$n = [\sigma_T] / \sigma_{\max} = 835 / 415,77 \approx 2$$

Результати моделювання (рис. 5.16) показали, що максимальна еквівалентна пружна деформація становить 0,0021527 мм/мм.

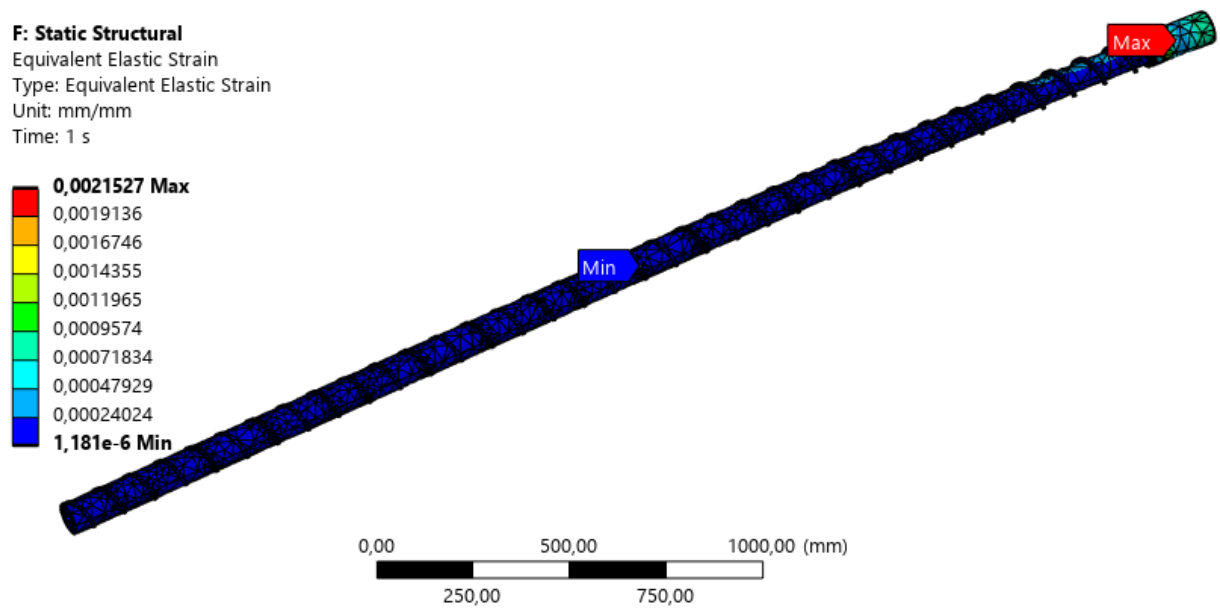


Рисунок 5.16 – Розподіл деформації (Equivalent Elastic Strain) у базовій конструкції черв'яка, мм/мм

Найбільше значення деформацій зафіксовано в зоні закріплення черв'яка.

Результати моделювання (рис. 5.17) показали, що максимальне переміщення по осі Z становить 0.23 мм.

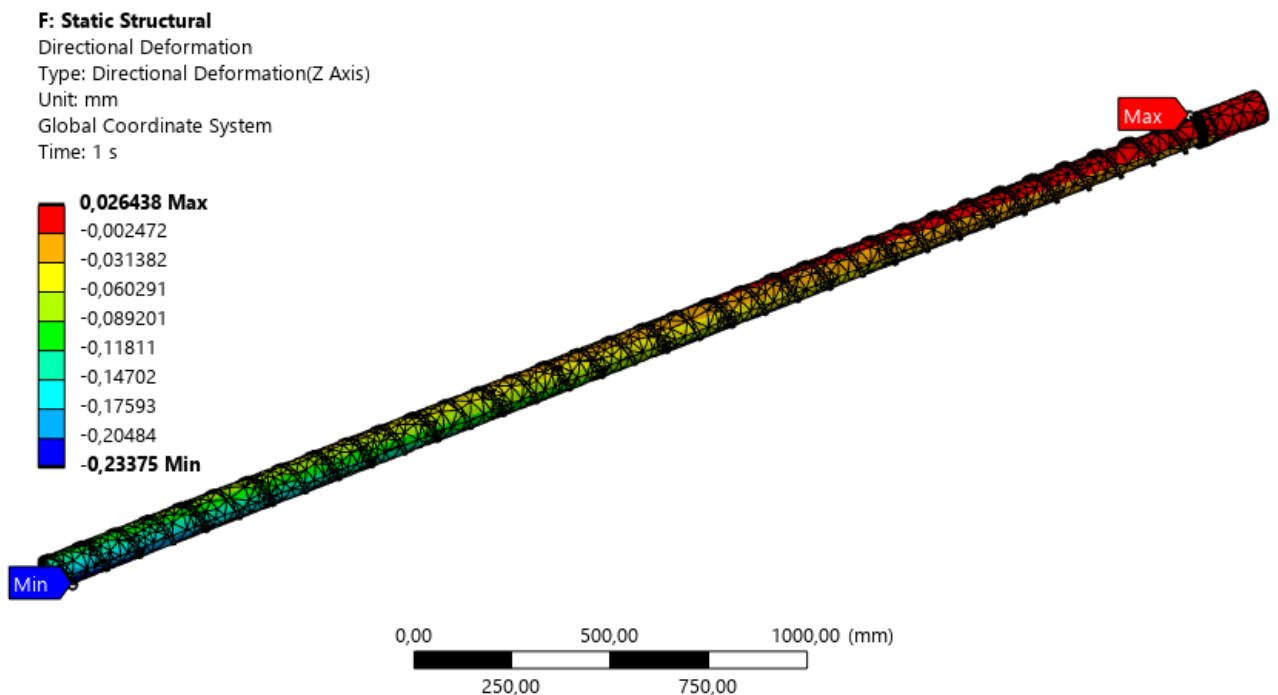


Рисунок 5.17 – Розподіл переміщення у базовій конструкції черв'яка, мм

Найбільше значення переміщення зафіксовано в кінці черв'яка

5.4.3 Результати розрахунку модернізованої конструкції черв'яка

Температурне поле розраховувалося для стаціонарного теплового режиму. Наведено розподіл температури по довжині черв'яка(рис 5.18).

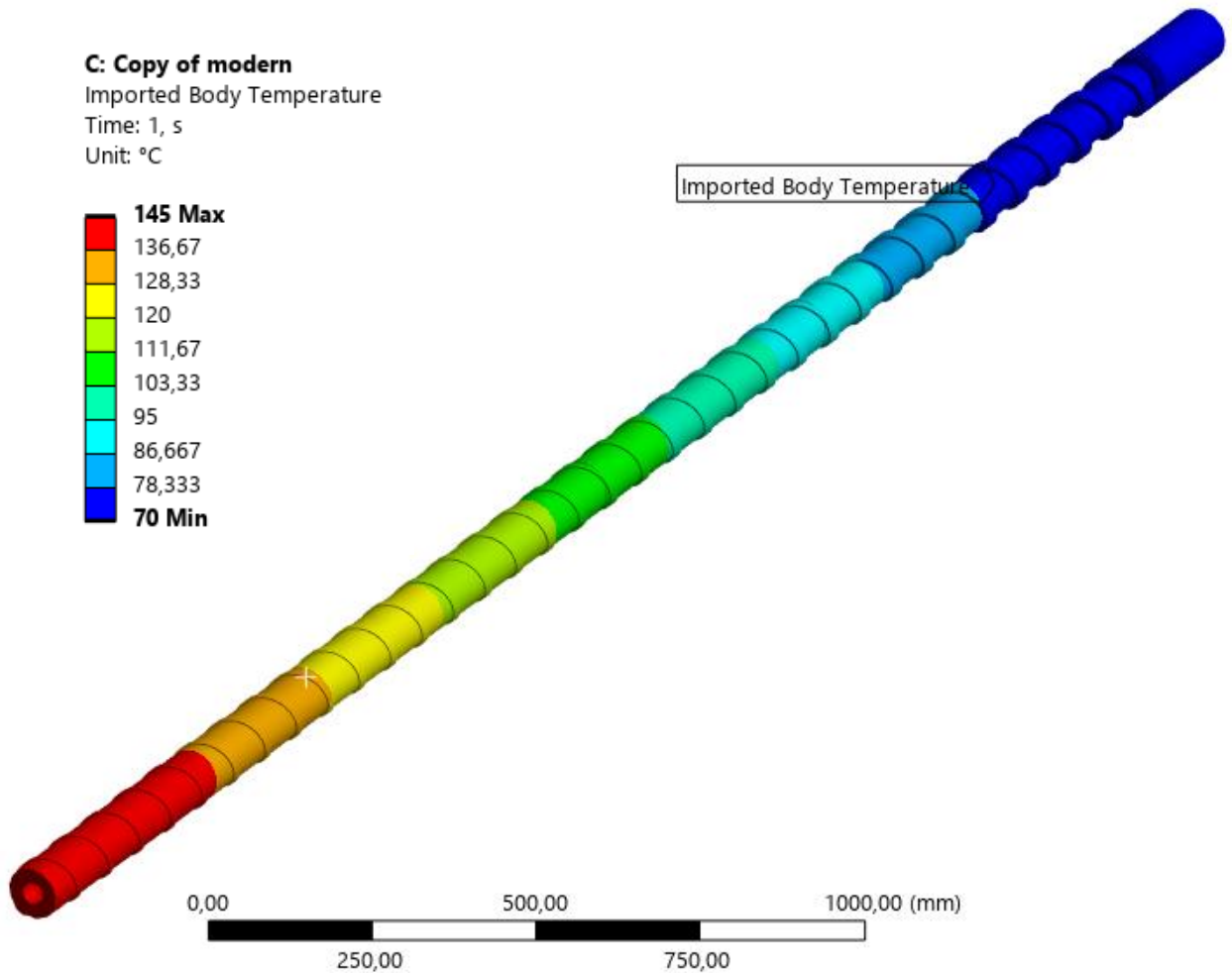


Рисунок 5.18 – Розподіл температурного поля у черв'яку екструдера, °C

З отриманих результатів видно, що максимальна температура становить 145 °C у зоні нагріву, а мінімальна — 70 °C у зоні завантаження.

Результати моделювання (рис 5.19) показали, що максимальні еквівалентні напруження в модернізованій конструкції становлять $\sigma_{\max} = 411,26$ МПа.

C: Copy of modern

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1 s

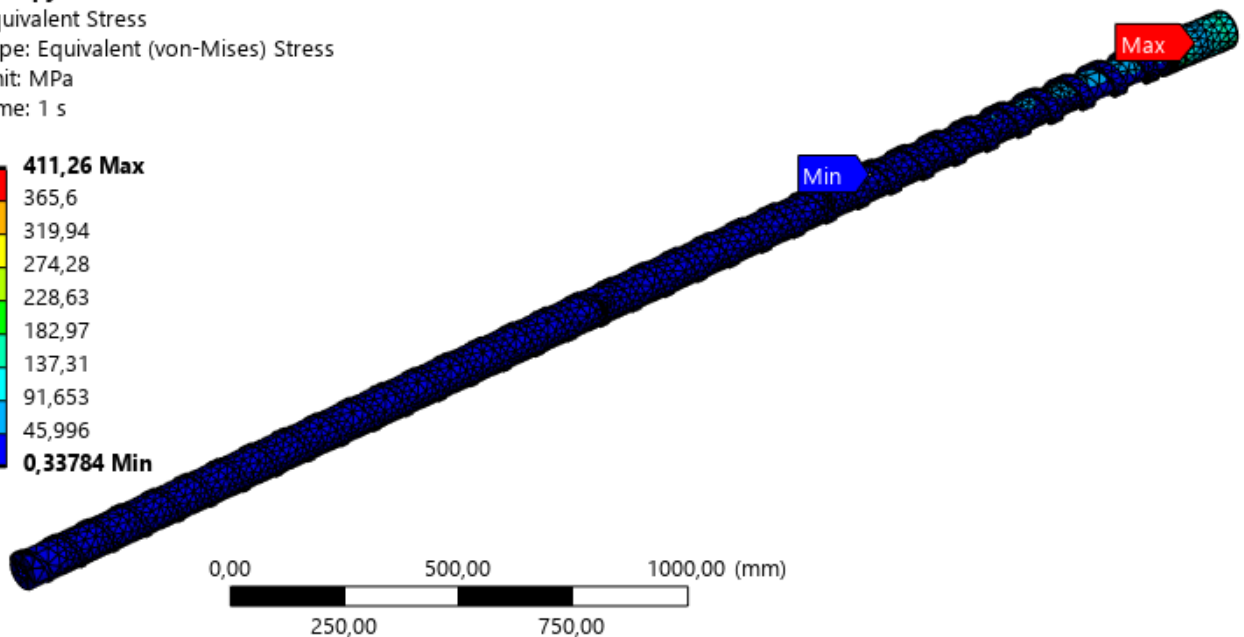
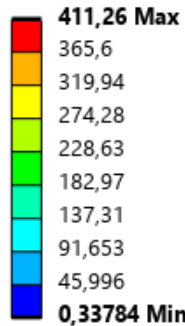


Рисунок 5.19 – Розподіл еквівалентних (von-Mises) напружень у модернізованій конструкції черв'яка, МПа

Напруження зменшились незначно ($\approx 1\%$), що свідчить про збереження міцності

Еквівалентні напруження модернізованого черв'яка(рис 5.20).

F: Static Structural

Equivalent Elastic Strain

Type: Equivalent Elastic Strain

Unit: mm/mm

Time: 1 s

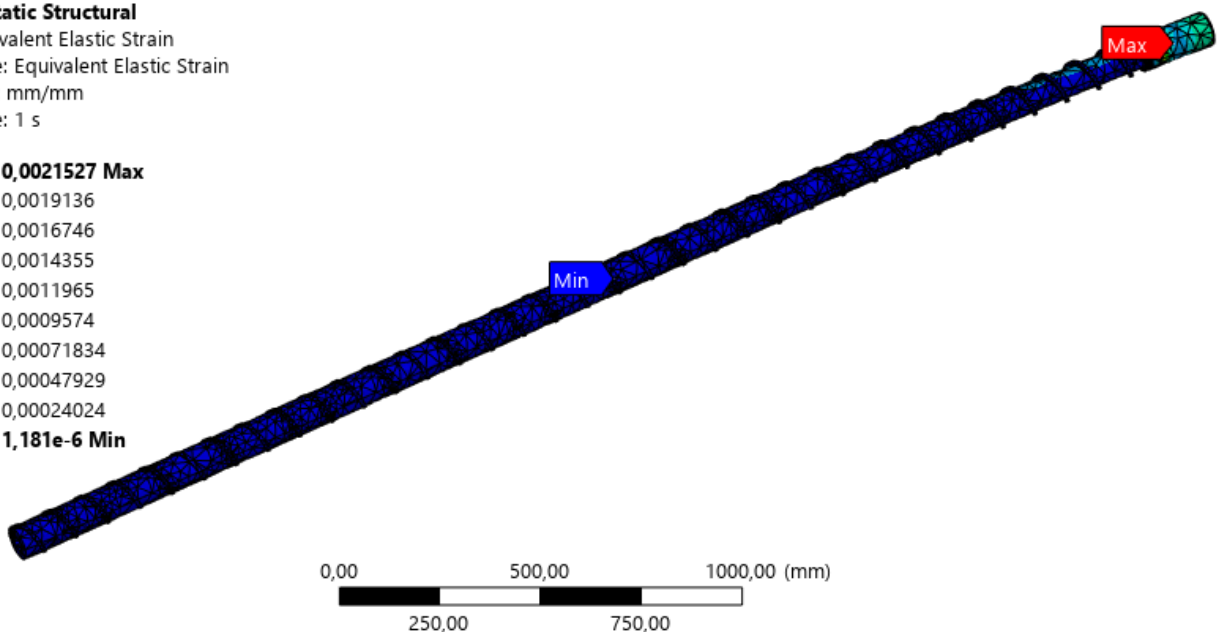
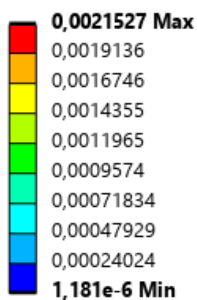


Рисунок 5.20-Еквівалентна пружна деформація (Elastic Strain)

Пружна деформація трохи зменшилася, що підтверджує стабільний еластичний режим роботи.

Результати моделювання (рис. 5.17) показали, що максимальне переміщення по осі Z становить 0.23 мм.

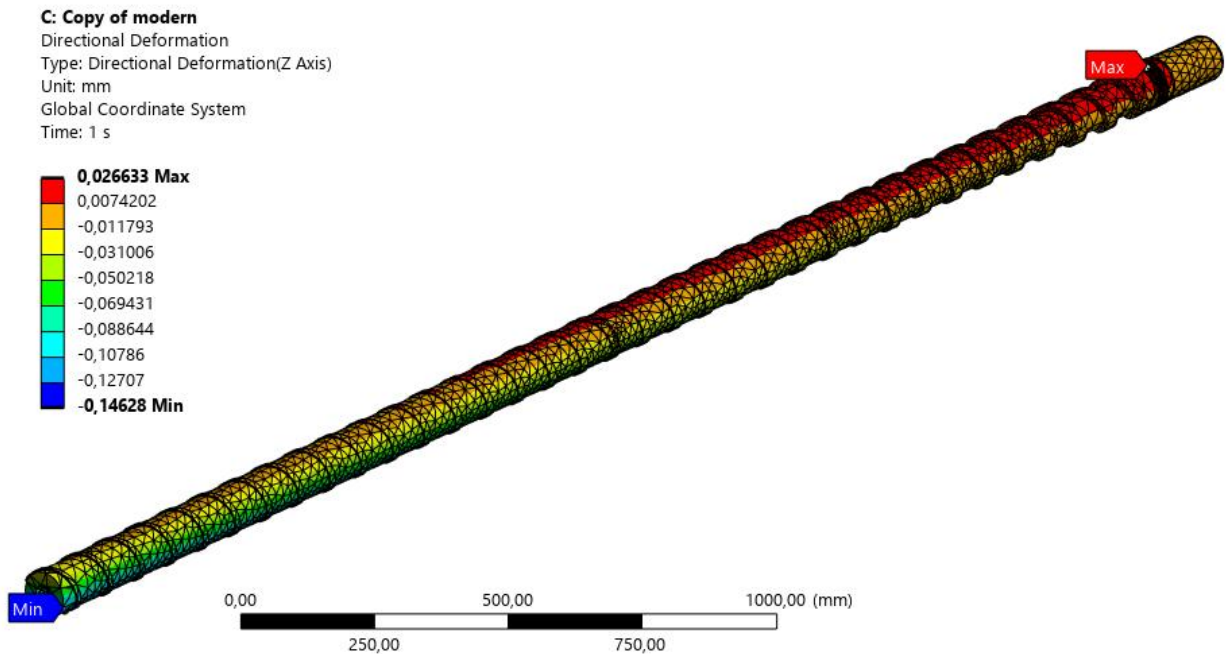


Рисунок 5.17 – Розподіл переміщення у базовій конструкції черв'яка, мм
Найбільше значення переміщення зафіксовано в кінці черв'яка

5.4.4 Висновки по результатм моделювання

У ході числового аналізу були порівняні базова та модернізована моделі черв'яка екструдера за трьома основними критеріями: еквівалентні напруження, загальна деформація та еквівалентна пружна деформація.

1. Еквівалентні напруження:

- Базова модель: $\sigma_{\max} = 415,77$ МПа
- Модернізована модель: $\sigma_{\max} = 411,26$ МПа

Напруження в модернізованій моделі зменшились незначно ($\approx 1\%$), що свідчить про збереження міцності при зміні геометрії.

2. Максимальні переміщення по осі Z:

- Базова модель: $\delta_{\max} = 0,23$ мм

- Модернізована модель: $\delta_{\max} = 0,14$ мм

Зменшення на ≈ 1.6 разів свідчить про підвищення жорсткості модернізованої конструкції.

3. Еквівалентні деформації:

- Базова модель: $\varepsilon_{\max} = 0,0021527$ мм/мм

- Модернізована модель: $\varepsilon_{\max} = 0,0021106$ мм/мм

Пружна деформація для обох моделей суттєво не відрізняється.

Основною метою модернізації було не лише збереження міцності, а й покращення гідродинамічних характеристик черв'яка. Завдяки поступовому збільшенню діаметра у зоні подачі вдалося зменшити зворотний потік розплаву, стабілізувати тиск та забезпечити рівномірність подачі полімеру. Це особливо важливо при виготовленні тонкостінної рукавної плівки, де стабільність потоку безпосередньо впливає на якість продукції.

Таким чином, модернізована конструкція забезпечує ефективніше транспортування полімеру, знижує ризики нерівномірності та гарантує довготривалу надійність роботи екструдера. Загальний висновок:

Хоча числові значення напружень і деформацій змінилися незначно, головна мета модернізації полягала не в цьому. Основна ідея — зміна геометрії черв'яка шляхом поступового збільшення діаметра в зоні подачі — була спрямована на зменшення зворотного потоку полімеру, стабілізацію тиску в каналі та покращення рівномірності подачі розплаву. Це особливо важливо при виготовленні тонкостінної рукавної плівки, де навіть незначні коливання можуть негативно впливати на якість продукції. Таким чином, модернізована конструкція демонструє не лише збереження міцності, а й технологічну перевагу в умовах реальної експлуатації.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Згідно діючого законодавства України «Про охорони праці», для обслуговуючого персоналу на підприємствах необхідно створити умови праці, які гарантують безпеку та відсутність шкідливого впливу на здоров'я. До таких умов належить ефективне використання простору виробничих приміщень і оптимальне розміщення обладнання, дотримання правил експлуатації техніки та організації технологічних процесів, а також забезпечити захисту працівників від впливу шкідливих виробничих чинників[12]. Окрім цього, обов'язковим є дотримання санітарно-гігієнічних норм і правил у робочих зонах, на місцях розміщення обладнання та безпосередньо на робочих місцях.

Розроблення комплексу заходів з охорони праці є невід'ємною вимогою під час виконання дипломного проекту, що стосується агрегата для виробництва рукавної плівки з модернізацією екструдера[13].

Приміщення, у якому розміщений агрегат, має розміри: довжина – 18 м, ширина – 9 м, висота – 6 м.

Під час експлуатації агрегата можуть виникати такі шкідливі та небезпечні виробничі фактори, як:

- повітря робочої зони;
- електробезпека;
- пожежна безпека;
- виробничий шум;
- промислове освітлення;
- вплив рухомих механізмів.

6.1. Забруднення повітря робочої зони

Робота оператора, що обслуговує агрегат, має до критеріїв легких фізичних робіт із енерговитратами близько 630 кДж/год (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99). Для забезпечення належної якості повітря у разі операторської впроваджено загальнообмінну вентиляцію з механічною витяжкою, яка забезпечує подачу та видалення повітря. Вихідне повітря очищається від пилу за допомогою скрубера. Системи вентиляції організовані так, що свіже повітря надходить у робочу зону,

а видалення повітря здійснюється з верхньої частини приміщення.

Ефективність вентиляційних пристроїв гарантує, що масова концентрація шкідливих речовин і пилу у повітрі робочої зони не перевищує гранично допустимих концентрацій, визначених Наказом МОЗ України від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».

У виробничому стані встановлені системи опалення та кондиціонування, які дозволяють підтримувати оптимальні параметри мікроклімату відповідно до ДСН 3.3.6.042-99. Завдяки впровадженним заходам у робочу зону забезпечуються такі параметри повітря:

температура повітря в холодний період становить 20–23 °С (допустима), фактично підтримується на рівнях 19–21 °С; у теплий період — 22–25 °С (допустима), фактична — 21–23 °С;

відносна вологість повітря складає 40–60%;

швидкість руху повітря — 0,2 м/с;

концентрація пилу в повітрі робочої зони не перевищує гранично допустимої концентрації (ГДК) для відповідних видів пилу згідно з Наказом МОЗ України від 14.07.2020 № 1596 (наприклад, для неорганічного пилу з вмістом кремнезему менше 70% — 6 мг/м³, фактично — 2 мг/м³).

6.2 Електробезпека

Виробниче приміщення, де розташований пункт керування агрегатом, відповідно до чинних Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) відноситься до категорії приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом. Для живлення обладнання використовується трифазна напруга 220/380 В з частотою 50 Гц та глухо-заземленою нейтраллю.

Основними причинами можливого ураження електричним струмом обслуговуючого персоналу можуть бути: випадкове включення установки, пробій струму на корпус, дотик до струмовідних частин електроустаткування, а також старіння ізоляції, що призводить до втрати її захисних властивостей. Крім того, небезпека виникає при дотику до частин установки, які можуть опинитися під напругою у разі короткого замикання.

Згідно з ПУЕ, трифазні електричні ланцюги з напругою до 1000 В вважаються трьохпровідними з глухо-заземленою нейтраллю. Для запобігання травмуванню персоналу рекомендується застосовувати такі заходи безпеки: розміщувати рубильники включення установки в спеціальних захисних шафах; прокладати силові кабелі в металевих захисних рукавах; передбачати систему захисного відключення, яка спрацьовує у разі ураження людини струмом; на панелі керування встановлювати індикатори ввімкнення, а також оснащувати вузли, що можуть опинитися під напругою, затискачами для підключення занулення.

Перевірка електричної міцності ізоляції проводиться на напрузі 200 В з частотою 50 Гц протягом однієї хвилини. Опір ізоляції має бути не меншим за 0,5 МОм.

6.3 Пожежна безпека

Основними причинами можливого загорання на виробництві є: несправність електроустаткування; струми короткого замикання та перевантаження кабелів живлення; загорання ізоляції електропроводки; а також використання відкритого вогню в неналежних місцях.

Виробничий процес виготовлення полімерної плівки належить до категорії пожежної небезпеки В згідно з класифікацією, передбаченою чинними Державними будівельними нормами (ДБН В.1.1-7-2016).

Запобігання пожежам забезпечується такими заходами:

- суворе дотримання технологічних норм і правил експлуатації обладнання;
- обмеження використання відкритого вогню на території виробництва;
- паління лише у спеціально відведених для цього місцях;
- регулярне проведення інструктажів з техніки безпеки для обслуговуючого персоналу;
- організація інформаційної роботи з питань протипожежної безпеки;
- наявність систем пожежної сигналізації, зокрема електричної пожежної - сигналізації (ЕПС), а також засобів оперативного зв'язку з пожежною службою;
- розміщення засобів пожежогасіння (пісок, пожежні ковдри, вогнегасники) у безпосередній близькості від обладнання.

Для гасіння невеликих пожеж при вимкненому або увімкненому електроустаткуванні напругою до 1000 В застосовують вуглекислотні вогнегасники типу ОУ-5 (4 штуки) та порошкові вогнегасники ОП-10 (2 штуки).

У виробничому приміщенні пожежні гідранти з рукавами довжиною до 10 метрів мають бути розташовані на відстані не більше 30 метрів один від одного. Відстань до найближчого пожежного виходу не повинна перевищувати 40 метрів. Кількість евакуаційних виходів — не менше двох, ширина дверей евакуаційного виходу — не менше 2 метрів, при цьому двері повинні відкриватися назовні.

6.4 Виробничий шум

Шум, який продовжується під час роботи машини та іншого обладнання на лінії, є постійним фактором. Основними джерелами шуму в цьому випадку є електродвигуни, обертові вали, черв'яки та інші механізми. За своєю природою цей шум має механічне та гідродинамічне походження. Відповідно до вимог ДСН 3.3.6.037-99 "Державні санітарні норми виробничого шуму", рівень шуму у виробничих приміщеннях не повинен перевищувати 80 дБА.

Для зниження шуму застосовуються методи шумопоглинання. Також внутрішні поверхні приміщень облицьовуються перфорованими покриттями та спеціальними плитами. Для досягнення максимального ефекту шумопоглинаючим матеріалом покривають не менше 60% площі внутрішніх стін. Вихлопні патрубки насосів під'єднані до герметичних каналів, які ізолюють шум вихлопу.

Двері приміщень мають звукоізоляцію не менше 30 дБА, а стіни та перекриття забезпечені звукоізоляційним облицюванням із коефіцієнтом звукопоглинання не менше 0,7, що забезпечує звукоізоляцію на рівні 50 дБА і вище.

Щоб зменшити шум від обертових елементів, важливо регулярно контролювати рівень мастила в підшипникових вузлах, що зменшує тертя і, відповідно, рівень шуму.

6.5 Промислове освітлення

Недостатній рівень освітлення на робочому місці значно підвищує ризик

травматизму та знижує продуктивність праці. У виробничому приміщенні з висотою 6 метрів, де встановлений агрегат, передбачено як природне, так і штучне освітлення.

Для штучного освітлення застосовуються лампи денного світла типу ЛДР або сучасні енергозберігаючі світильники з високою світловіддачею. Світильники мають бути надійно закріплені, зручні для обслуговування, безпечні та забезпечувати рівномірний розподіл світла по робочій зоні.

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-28:2018, нормативний рівень освітленості для робочих місць у виробничих цехах з середньою фізичною напругою праці становить 300 люкс (лк).

Приміщення, де розташований агрегат, має розміри: довжина 18 м, ширина 9 м, висота 6 м. Для забезпечення необхідного освітлення встановлено три ряди світильників типу ЛДР з лампами ЛЕ. Загальний світловий потік у кожному ряду становить приблизно 65 000 люменів. Якщо використовувати світильники з двома лампами ЛБ-40, то в одному ряду необхідно 10 світильників, а загалом у приміщенні — 30.

Фактичний рівень освітленості становить близько 315 лк, що повністю відповідає вимогам діючого ДБН і забезпечує комфортні та безпечні умови праці для персоналу.

Усі виробничі приміщення повинні бути обладнані також аварійним освітленням, яке забезпечує безпечну евакуацію і можливість контролю роботи у разі відключення основного освітлення.

6.6 Небезпека впливу рухомих і обертових частин машини

До рухомих механізмів агрегата належать: корпус машини, черв'як, мотор-редуктор, ролики, муфти та інші деталі, що обертаються. Ці елементи становлять значну небезпеку для працівників, оскільки можуть спричинити механічні травми різного ступеня тяжкості, а в окремих випадках — навіть смертельні випадки.

Для мінімізації ризиків травмування на сучасних агрегатах встановлено систему автоматичної зупинки машини при відкритті захисної панелі. Обертові

частини двигунів і муфт розміщені в нерухомих захисних кожухах, що запобігає прямому контакту з ними. Крім того, для швидкої зупинки обладнання передбачені аварійні вимикачі, розташовані у доступних місцях.

Однак, щоб підвищити рівень безпеки, працівникам обов'язково видають індивідуальні засоби захисту, серед яких:

- захисні комбінезони, що оберігають від механічних пошкоджень;
- спеціальне робоче взуття, яке відповідає вимогам безпеки та умовам виробництва;
- засоби захисту рук, наприклад, рукавички, що знижують ризик порізів і забоїв.

Відповідно до чинних нормативних документів з охорони праці та безпеки машинобудівного виробництва, такі заходи є обов'язковими для запобігання виробничим травмам.

7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДВАННЯ

7.1 Технологія виготовлення деталі

У даному розділі дипломного проєкту представлено технологічний процес виготовлення фланця, який є ключовим елементом конструкції екструдера для виробництва рукавної плівки. Фланець забезпечує з'єднання між завантажувальним бункером та корпусом екструдера.

Ця деталь експлуатується в умовах високих механічних навантажень і температур, тому до неї висуваються підвищені вимоги щодо міцності та точності виготовлення. Будь-які дефекти або відхилення від розмірів можуть призвести до порушення роботи екструдера та зниження якості готової продукції.

Як матеріал для виготовлення фланця використовується сталь 38Х2МЮА відповідно до ДСТУ 7809:2015. Ця сталь характеризується достатньою пластичністю та задовільною оброблюваністю різанням.

Заготовка фланця виготовляється методом гарячого штампування. Після цього заготовка підлягає механічній обробці на токарних і свердлильних верстатах для досягнення необхідних геометричних параметрів. Під час виконання всіх операцій особлива увага приділяється дотриманню технічних умов і забезпеченню високої якості поверхні деталі.

7.2 Опис та призначення деталі

Фланець є плоскою круглою деталлю типу «диск» з отворами для кріплення, яка служить для з'єднання окремих вузлів та забезпечує герметичність і міцність конструкції. У даному випадку фланець використовується для з'єднання завантажувальної горловини з корпусом екструдера.

У дипломному проєкті фланець виготовляється зі сталі 38Х2МЮА, що відповідає ДСТУ 7809:2015 та має такі характеристики:

- Достатня пластичність для механічної обробки

- Стійкість до термічного та механічного впливу
- Високі показники міцності

Ці властивості(табл 7.1) забезпечують надійну експлуатацію фланця в умовах підвищених температур і тиску(табл 7.2), що виникають під час роботи екструдера.

Таблиця 7.1 – Хімічний склад сталі 38Х2МЮА

С	Si	Mn	Ni	Р (не більше)	S (не більше)	Cr	Mo	V (не більше)
0.35– 0.43	0.17– 0.37	0.50– 0.80	≤0.30	≤0.035	≤0.040	0.90– 1.20	0.15– 0.25	≤0.10

Таблиця 7.2 – Механічні властивості сталі 38Х2МЮА

Механічна властивість	Значення
Границя плинності, МПа (не менше)	590
Границя міцності, МПа (не менше)	830
Мінімальне відносне подовження, %, не менше	12
Відносне звуження, %, не менше	45
Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ² (не менше)	59

Такі характеристики сталі дозволяють забезпечити потрібну міцність та довговічність фланця у складі екструдера.

7.3 Вибір заготовки для виготовлення деталі

З урахуванням технологічних властивостей матеріалу, з якого виготовлений фланець (сталь 38Х2МЮА), а також його габаритів та вимог до експлуатації, одержання заготовки здійснюється методом гарячого штампування. Цей метод дозволяє досягти необхідного класу точності та забезпечує отримання заготовки з мінімальними витратами матеріалу[14].

Для виготовлення заготовки використовується горизонтально-кувальна машина (ГКМ). Цей вибір пояснюється тим, що виготовлення заготовки не потребує високої точності штампування та дозволяє виконати операції швидко і з достатньою точністю[15].

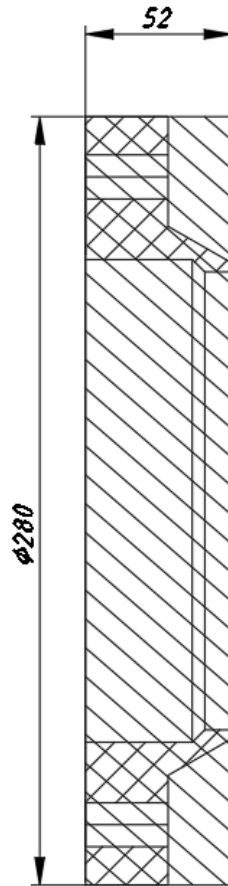


Рисунок 7.1 – Заготовка

Так як фланець відноситься до класу дисків, технологічний процес обробки заготовки передбачає такі операції:

- Чорнова та чистова обробка торця і отвору;
- Чорнова та чистова обробка другого торця, а також чорнова та чистова обробка зовнішньої поверхні при базуванні деталі по обробленим начисто внутрішній поверхні та торцях;
- Зняття фасок та свердління отворів.

Така послідовність операцій дозволяє отримати деталь із необхідними геометричними параметрами та високою якістю поверхні.

7.4. Технологічний процес виготовлення деталі

Послідовність операцій:

Операція 005. Токарно-револьверна.

Точити торець, витримуючи розмір 30; зенкерувати отвір, витримуючи розмір Ø175H9; розгорнути отвір Ø175H9; точити Ø200; зняти фаску (5×45°); розточити складну поверхню; підрізати торець точити торець витримуючи кут 30°.

Операція 010. Свердильна.

Свердлити отвори Ø16 (8 шт.) .

7.5. Вибір та розробка пристосування для певної операції

Для даної деталі використовується високопродуктивне спеціалізоване обладнання, оскільки вона відноситься до продукції середньосерійного виробництва.

Операція 005. Токарно-револьверна.

Для виконання цієї операції використовується токарно-револьверний верстат 1Г325, який має такі характеристики:

- Клас точності – Н;
- Максимальний діаметр оброблюваної деталі над станіною – 320 мм;
- Максимальна довжина деталі – 140 мм;
- Максимальний діаметр прутка – 25 мм;
- Межі частот обертання шпинделя – 80...3150 об/хв;
- Потужність головного приводу – 2,6 кВт;
- Вага верстата – 1300 кг;
- Габарити верстата:
 - Довжина – 3980 мм;
 - Ширина – 1000 мм;
 - Висота – 1555 мм.
- Операція 010. Свердильна.
- Дана операція виконується на вертикально-свердильному верстаті НС-16, який має наступні характеристики:
- Клас точності – Н;

- Максимальний діаметр свердлильного отвору – 22 мм;
- Межі частот обертання шпинделя – 550...3400 об/хв;
- Хід шпинделя – 100 мм;
- Хід траверси – 200 мм;
- Потужність головного приводу – 0,75 кВт;
- Вага верстата – 110 кг;
- Габарити верстата:
 - Довжина – 680 мм;
 - Ширина – 420 мм;
 - Висота – 735 мм.

7.6 Вибір пристосування, опис конструкції та принцип дії

Операції по свердлінню кріпильних отворів фланця будуть проводитись із застосуванням універсального кондуктора (Рис. 7.2), який оснащений швидкодіючим пневматичним діафрагменним приводом, а також трьома призватами.

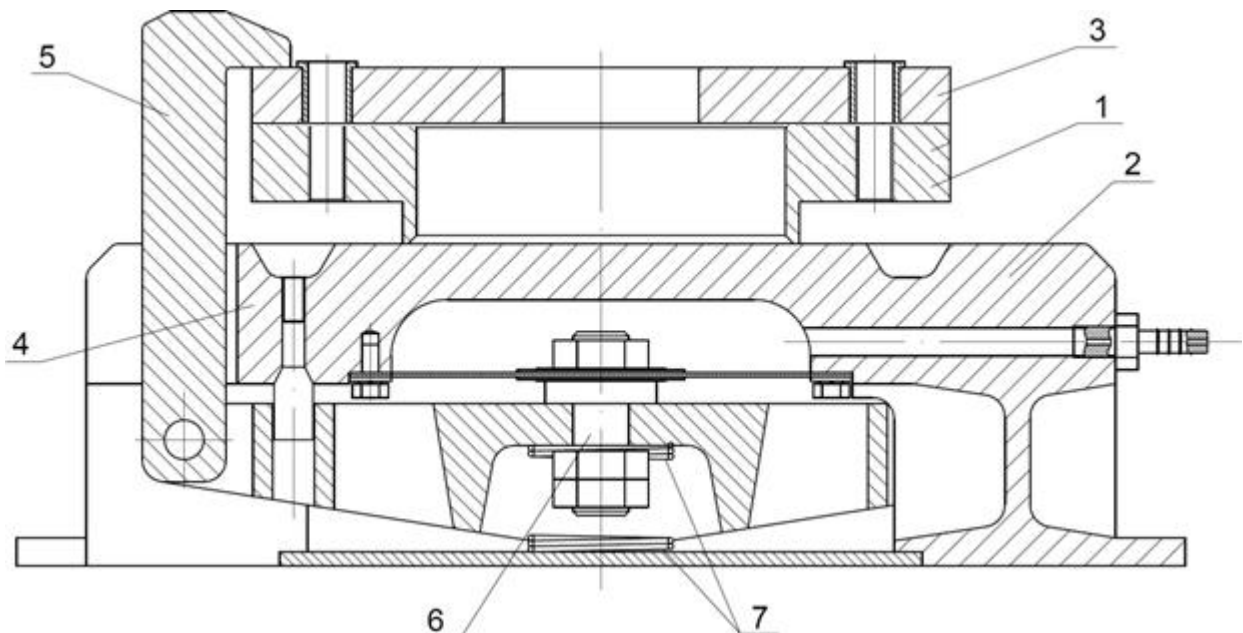


Рисунок 7.2 – Універсальний кондуктор

Кондуктор працює в такий спосіб:

Деталь 1, встановлена на корпусі 2 кондуктора, притискається до нього за допомогою пластини 3 і прихватами 5, самі прихвати прикріплені до рами 4, яка

регулюється у вертикальному напрямку штоком 6. В результаті переміщення штока 6, відбувається стиснення пружини 7. Після проведення свердління, у пневматичному приводі знижується тиск і пружини 7 підіймають шток 6 і раму 4, в результаті чого відбувається послаблення прихвату і звільнення деталі.

7.7 Технологічний процес виготовлення деталі

Розроблений технологічний процес виготовлення шківів складається з токарних та протяжних операцій. Детально описаний у МК, КЕ, ОК.

Форма 1

[illegible]

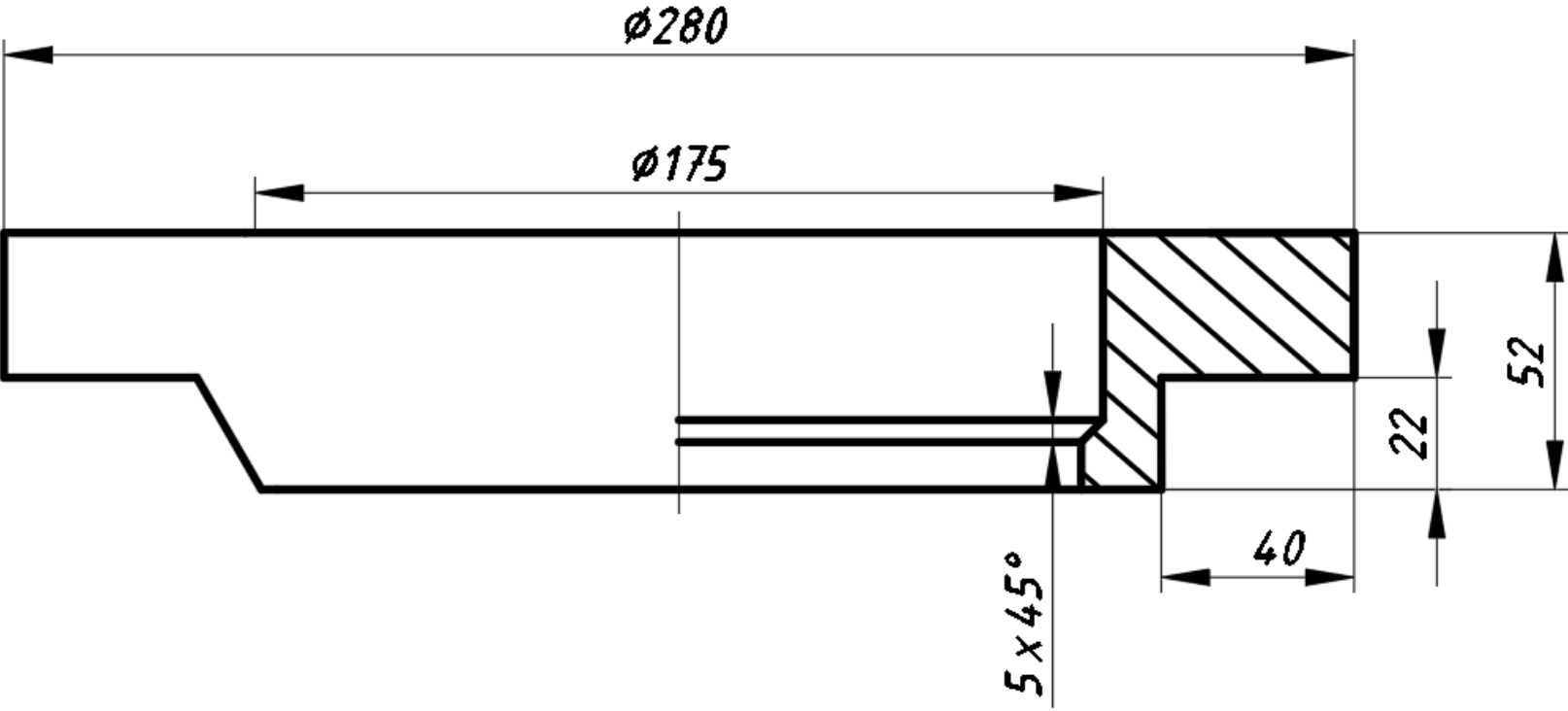
Дубл.			
Взамін.			
Підпис			

Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата

--	--	--	--	--	--	--

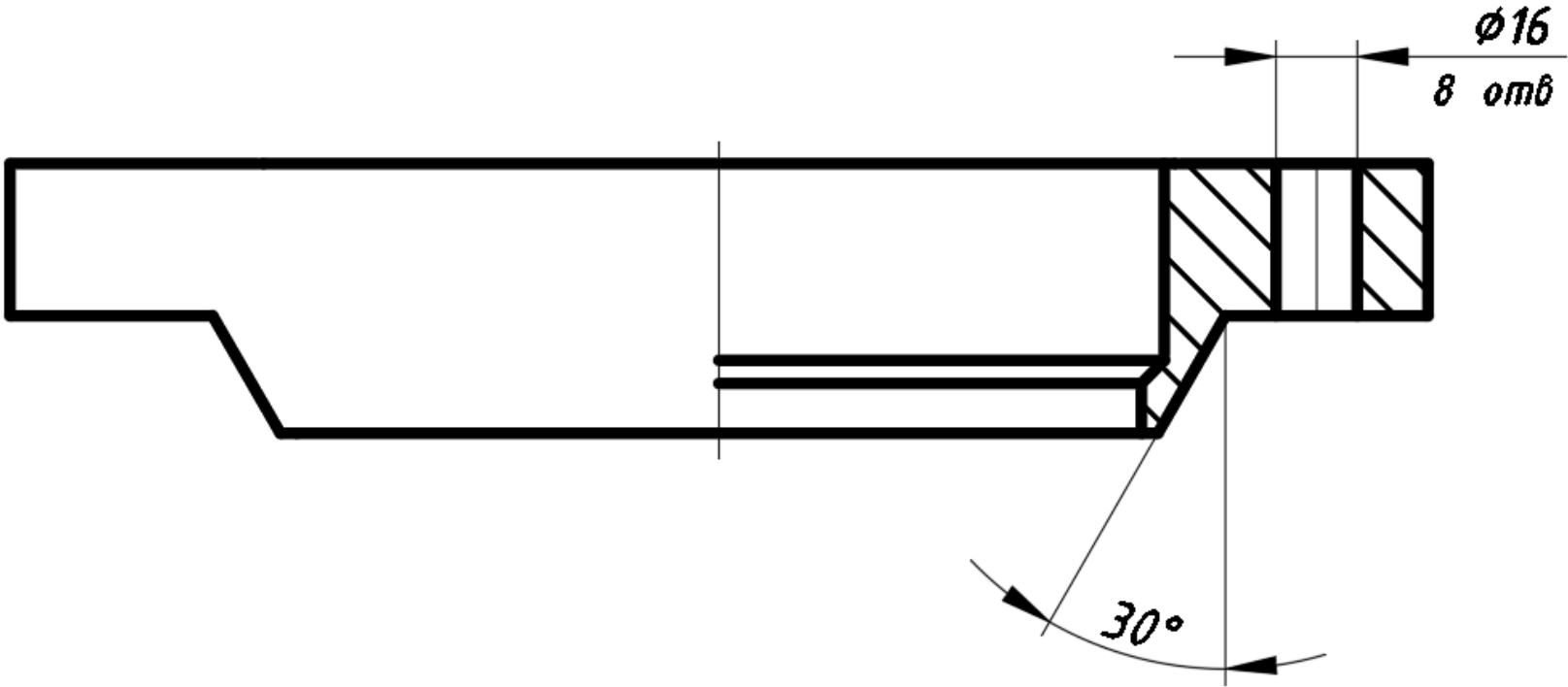
Розробив	Цветков			КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ		005
Перевірів	Борщук					

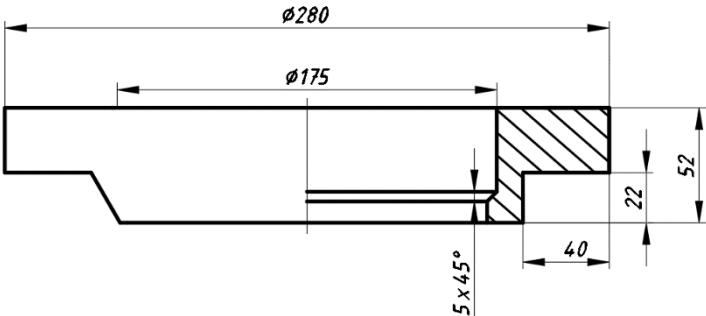
				Фланець			Н		
Н. контр.									

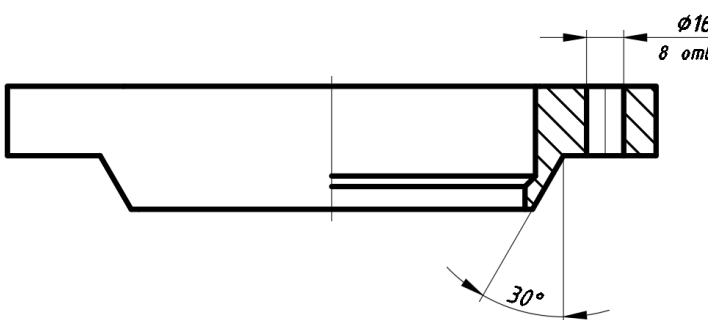


Дубл.													
Взамін.													
Підпис									Зм	Ар	№док.	Підпис	Дата

Розробив	Цветков			КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ		010			
Перевірів	Борщик								
				Фланець			Н		
Н. контр.									



Дубл.																							
Взамін.																							
Підпис																							
												Зм		Ар		№ док.		Підпис		Дата			
Розробив				Цветков												КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ							
Перевірив				Борщик																			
Н. контр.												Фланець				Н				005			
								Назва операції						Матеріал									
								Токарна						Сталь 38Х2МЮА ДСТУ 7809:2015									
								Твердість		ОВ		МД		Профіль і розміри				МЗ		Коод			
										кг		2,72						12		1			
								Обладнання, пристрій ЧПК						Позначення програми									
								Токарно-револьверний верстат 1Г325															
								То		Тд		Тп.з		Тшт.		МОР							
								Емульсія															
Р								ПН		Дабо В		L		t		i		s		n		v	
P01		1. Точити торець, витримуючи розмір 30																					
T02		2. Зенкерування отвору Ø 175Н39																					
03		3. Розвернути отвір Ø 175Н39																					
O04		4. Точити Ø 200																					
T05		5. Зняти фаску (5x45°)																					
T06		6. Розточити складну поверхню																					
P07		7. Підрізати торець																					
08																							
09																							
OK		Обробка різанням																					

Дубл.																									
Взамін.																									
Підпис												Зм				Ар		№ док.		Підпис		Дата			
Розробив				Цветков												КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ									
Перевірив				Борщик																					
Н. контр.																Фланець				Н				010	
										Назва операції						Матеріал									
										Токарна						Сталь 38Х2МЮА ДСТУ 7809:2015									
										Твердість		ОВ		МД		Профіль і розміри				МЗ		Коод			
												кг		2,72						12		1			
										Обладнання, пристрій ЧПК						Позначення програми									
										Токарно-револьверний верстат 1Г325															
										То		Тд		Тп.з		Тшт.		МОР							
										Емульсія															
Р								ПН		Дабо В		L		t		i		s		n		v			
P01		1. Свердлити отвори Ø 16 (8шт)																							
T02		2. Точити торець виторимуючи кут 30º																							
O03																									
O04																									
T05																									
T06																									
P07																									
O08																									
O09																									
OK		Обробка різанням																							

7.8 Висновки по розділу

У розділі «Технологія машинобудування» було розглянуто процес виготовлення фланця, який є важливою складовою частиною екструдера для виробництва рукавної плівки.

Визначено основні етапи технологічного процесу, підібрано відповідне обладнання для токарної обробки та свердління, а також обґрунтовано вибір матеріалу за ДСТУ 7809:2015. Описані заходи контролю якості виготовлення, що гарантують відповідність готової деталі технічним вимогам і забезпечують її надійну роботу у складі екструдера.

Наведено схему пристосування універсального кондуктора для однієї з операцій технологічного процесу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті було виконано повний розрахунок агрегату для виробництва поліетиленової рукавної плівки, що включає технічний аналіз основних параметрів, модернізацію вузла екструдера, числові розрахунки, 3D-моделювання, підбір технології виготовлення деталі екструдера та розробку заходів з охорони праці.

Основною задачею, вирішеною у дипломній роботі, стало вдосконалення одночерв'ячного екструдера за рахунок модернізації черв'яка, а саме – поступового зменшення ширини витка по його довжині. Така зміна конструкції спрямована на зменшення зворотного потоку розплаву, стабілізацію подачі полімеру до формувального вузла та покращення якості плівки. Дане рішення базується на патентному аналізі та обґрунтоване проведеними числовими розрахунками.

У рамках роботи було проведено:

Технічне обґрунтування вибору базової машини — одночерв'ячного екструдера моделі 90×35;

Розрахунок конструктивних параметрів базової моделі, включаючи продуктивність, частоту обертання, гідродинамічні втрати та необхідну потужність приводу;

Розрахунок модернізованої конструкції, зокрема — міцності черв'яка, перевірку на жорсткість, стійкість і зносостійкість з'єднань;

Тепловий розрахунок, що дозволив визначити вплив температури на процес екструзії;

Числове моделювання в ANSYS, яке підтвердило доцільність конструктивних змін, продемонструвало зменшення деформацій та покращення розподілу напружень у модернізованій моделі порівняно з базовою.

Окрім конструкторської частини, в дипломі виконано:

Патентний та літературний огляд, що підтвердив актуальність тематики;

Вибір заготовки для корпусної деталі;

Побудова маршруту технологічної обробки фланця, розробка та опис пристосування для надійної фіксації деталі при обробці;

Розробка заходів з охорони праці, з урахуванням вимог пожежної безпеки, електробезпеки, шуму, вібрації, освітлення й вентиляції виробничого приміщення.

Висновки, отримані в результаті моделювання та розрахунків, підтверджують, що запропонована модернізація не лише забезпечує стабільні показники процесу, а й сприяє зниженню ризиків нестабільного тиску й нерівномірного потоку розплаву. Це, в свою чергу, покращує якість готової плівки та підвищує надійність роботи всього агрегату.

Таким чином, дипломна робота реалізувала поставлену мету та підтвердила ефективність запропонованого технічного рішення. Отримані результати можуть бути впроваджені в серійне виробництво, а розроблена 3д модель модернізованого черв'яка — використана для подальших досліджень або розширення лінійки продукції екструзійного обладнання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мікульонок І. О. Технологія переробки полімерних матеріалів. – Київ : Либідь, 2010. – 24 с.
2. UA137428U Україна. Черв'як екструдера / І. О. Мікульонок, В. І. Сівецький ; заявл. 06.12.2018 ; опубл. 10.06.2019.
3. UA1737U Україна. Черв'як екструдера / І. О. Мікульонок ; заявл. 16.02.2004 ; опубл. 15.06.2004.
4. UA53479U Україна. Черв'як екструдера / І. О. Мікульонок, Д. М. Швед, М. П. Швед ; заявл. 31.03.2010 ; опубл. 11.10.2010.
5. UA93385U Україна. Черв'як екструдера / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський ; заявл. 02.10.2013 ; опубл. 25.03.2014.
6. EP3446850A1 ЄС. Черв'як екструдера / Coperion GmbH ; заявл. 29.06.2017 ; опубл. 27.02.2019.
7. Мікульонок І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси, Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169>.
8. C++. Довідник [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cplusplus.com>.
9. ANSYS [Електронний ресурс]. – Офіц. сайт.-<https://www.ansys.com>.
10. SolidWorks [Електронний ресурс]. – Офіц. Сайт- <https://www.solidworks.com>.
11. 1metal.com – довідник по металам та сплавам [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://1metal.com>.
12. Закон України «Про охорону праці» [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. – Офіц. вебсайт.
13. Климчук В. О., Гриньова В. М. Охорона праці в галузі : навч. посіб. – Харків : ХНАДУ, 2021. – 192 с.
14. Мікульонок І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв : підручник. – Київ : НТУУ «КПІ», 2010.
15. Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Мікульонок І. О. Проектування формувальних пристроїв обладнання для перероблення пластмас : навч. посіб. – 2-ге вид., переробл. та доповн. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А - ТАБЛИЦЯ РОЗГЛЯНУТИХ ПАТЕНТІВ

№ п/п	Предмет пошуку	№ свідоцтва, МПК, країна, автор	Сутність заявки, технічного рішення і ціль його створення
1	Черв'як екструдера	UA137428U, МПК B29C 48/40, Україна, Мікульонок І.О., Сівецький В.І.	Метою винаходу є вдосконалення системи охолодження черв'яка шляхом введення внутрішніх шліців для циркуляції охолоджувальної рідини та підвищення стабільності температурного режиму.
2	Черв'як екструдера	UA1737U, МПК B29C 48/40, Україна, Мікульонок І.О.	Метою винаходу є покращення рівномірності подачі полімерної маси за рахунок додаткового витка, що розподіляє потік матеріалу в зоні транспортування.
3	Черв'як екструдера	UA53479U, МПК B29C 48/40, Україна, Мікульонок І.О., Швед Д.М., Швед М.П.	Метою винаходу є підвищення ефективності змішування та транспортування матеріалу шляхом введення опуклих гребенів з виступами та скошеними гранями на витках черв'яка.
4	Черв'як екструдера	UA93385U, МПК B29B 17/00, Україна, Мікульонок І.О., Сокольський О.Л.	Метою винаходу є зменшення пікових навантажень та стабілізація тиску шляхом введення пружного наконечника, здатного до осового переміщення.
5	Черв'як екструдера	EP3446850A1, МПК B29C 48/38, ЄС, Corelion GmbH	Метою винаходу є стабілізація потоку розплаву та зменшення мертвих зон за рахунок потовщення ребра витка в зоні транспортування полімерної маси.

ДОДАТОК Б- Специфікації

[illegible]

[illegible]

ДОДАТОК Д1. ТЕКСТ ПРОГРАМИ

(програма складена на мові програмування C++)

```
#include <iostream>
#include <cmath>
#include <iomanip>
#include <fstream>
#include <vector>
#include <utility> // для std::pair

using namespace std;

// Функція для виводу результатів у потік
void printResults(ostream& stream, const vector<pair<string, double>>& results) {
    for (const auto& [name, value] : results) {
        stream << name << " = " << fixed << setprecision(2) << value;

        // Додаємо одиниці виміру
        if (name == "φ") {
            stream << " град";
        } else if (name == "нкp" || name == "np") {
            stream << " об/с";
        } else if (name != "δ") { // δ вже має одиниці в назві
            stream << " мм";
        }
        stream << "\n";
    }
}

int main() {
    // Константи
    const double D = 90.0;           // Діаметр заготовки
    const double L_D = 35.0;         // Відношення довжини до діаметра
    const double i = 3.7;            // Коефіцієнт витяжки
    const double L_ev = 150.0;        // Довжина евтектичної зони
    const double L_vidb_koef = 0.5;  // Коефіцієнт для відбивної зони

    // Крок гвинтової лінії
    double t = 1.0 * D;

    // Кут підйому гвинтової лінії
    double phi_rad = atan(t / (M_PI * D));
    double phi_deg = phi_rad * 180.0 / M_PI;

    // Товщина гребеня
```

```

double e = round(0.11 * D);

// Зазор між черв'яком і гільзою
double delta = 0.0024 * D;
// Глибини каналів
double h1 = 0.126 * D;
double h3 = 0.5 * (D - sqrt(D*D - (4.0 * h1 / i) * (D - h1)));

// Діаметри вала
double d1 = D - 2 * h1;
double d3 = D - 2 * h3;

// Довжини зон
double L_work = L_D * D;
double L_feed = 0.3 * L_work;
double L_comp = 0.2 * L_work;
double L_meter = L_work - (L_feed + L_comp);

// Додаткові довжини
double L_vidb = L_vidb_koef * D;
double L_total = L_work + L_ev + L_vidb;

// Глибина на початку зони стиснення
double h2 = h1 - (h1 - h3) / L_total * (L_total - L_comp);
double d2 = D - 2 * h2;

// Швидкості обертання
double D_in_meters = D / 1000.0;
double n_critical = 42.2 / (60 * sqrt(D_in_meters)); // об/с
double n_work = 0.435 * n_critical; // об/с

vector<pair<string, double>> results = {
    {"t", t},
    {"φ", phi_deg},
    {"e", e},
    {"δ, мм", delta},
    {"h1", h1},
    {"h3", h3},
    {"d1", d1},
    {"d3", d3},
    {"Lроб", L_work},
    {"Lзав", L_feed},
    {"Lст", L_comp},
    {"Lдоз", L_meter},
    {"Leв", L_ev},
    {"Lвідб", L_vidb},

```



```

        {"Lзаг", L_total},
        {"h2", h2},
        {"d2", d2},
        {"нкр", n_critical},
        {"np", n_work}
    };

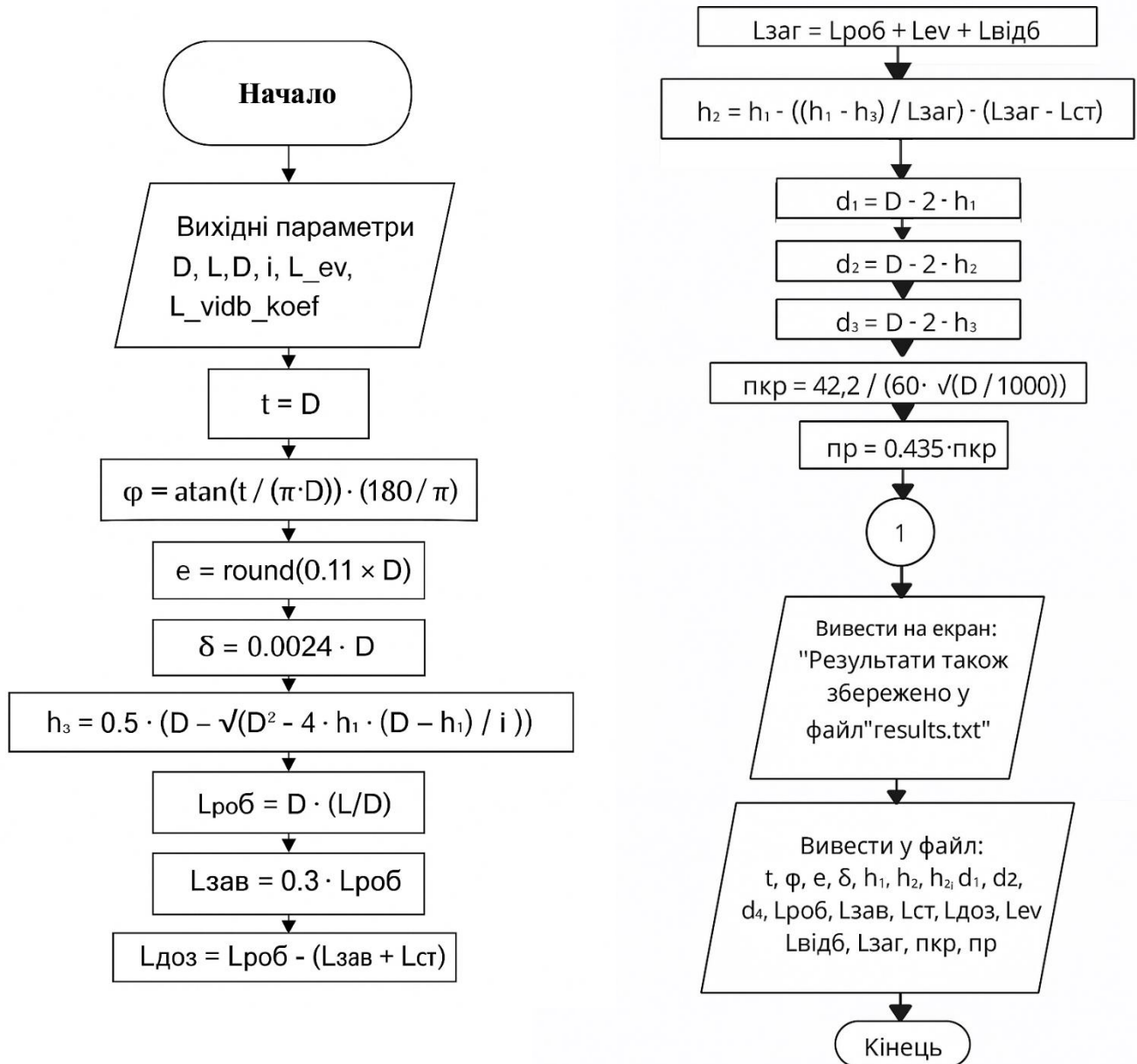
    // Вивід результатів у консоль
    printResults(cout, results);
    cout << "-----\n";
    cout << "Результати збережено у файл \"results.txt\"\n";

    // Запис результатів у файл
    ofstream fout("results.txt");
    printResults(fout, results);
    fout.close();

    return 0;
}

```

ДОДАТОК Д2. СХЕМА АЛГОРИТМУ ПРОГРАМИ



ДОДАТОК ДЗ. ТАБЛИЦЯ ІДЕНТИФІКАТОРІВ

Позначення за текстом	Позначення у програмі	Значення	Розмірність
D	D	90	мм
L/D	L_D	35	-
t	t	Розраховується	мм
φ	phi_deg	Розраховується	град
e	e	Розраховується	мм
δ	delta	Розраховується	мм
h ₁	h1	Розраховується	мм
h ₂	h2	Розраховується	мм
h ₃	h3	Розраховується	мм
d ₁	d1	Розраховується	мм
d ₂	d2	Розраховується	мм
d ₃	d3	Розраховується	мм
L _{роб}	L_work	Розраховується	мм
L _{зав}	L_feed	Розраховується	мм
L _{ст}	L_comp	Розраховується	мм
L _{доз}	L_meter	Розраховується	мм
L _{ев}	L_ev	150	мм
L _{відб}	L_vidb	Розраховується	мм
L _{заг}	L_total	Розраховується	мм
n _{кр}	n_critical	Розраховується	об/с
n _р	n_work	Розраховується	об/с

Дослідження модернізованого черв'яка одночерв'ячного екструдера

Цветков А.Є., студ., Витвицький В.М., PhD, ас., Кацюба Н.М., студ.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Під час роботи черв'ячного екструдера важливою умовою стабільності є рівномірна подача полімерного розплаву до формуючої головки. У стандартних конструкціях нерідко виникають зворотні потоки та пульсації тиску, що призводить до нестабільної товщини виробу та зниження якості продукції. Запропонована модернізація полягає у зміні геометрії витка черв'яка — поступовому зменшенні його ширини від зони завантаження до зони пластифікації. Це рішення забезпечує ефект ущільнення, знижує зворотний потік і стабілізує тиск подачі, що особливо важливо для виробництва плівки з рівномірною товщиною.

Ключові слова: модернізація, черв'як, черв'ячний екструдер, навивка.

Вступ. Екструзія є одним із провідних методів перероблення полімерних матеріалів, що дозволяє формувати вироби шляхом продавлювання розплаву через профілюючі елементи. Центральним вузлом екструзійної лінії виступає екструдер — обладнання, яке виконує функції транспортування, плавлення та формування полімерного матеріалу. Екструдери бувають одно- або двочерв'ячними, при цьому одночерв'ячні екструдери зберігають популярність завдяки простоті конструкції, надійності та енергоефективності. Вони широко застосовуються у виробництві труб, профілів, а також плівки — зокрема, рукавної [1–2].

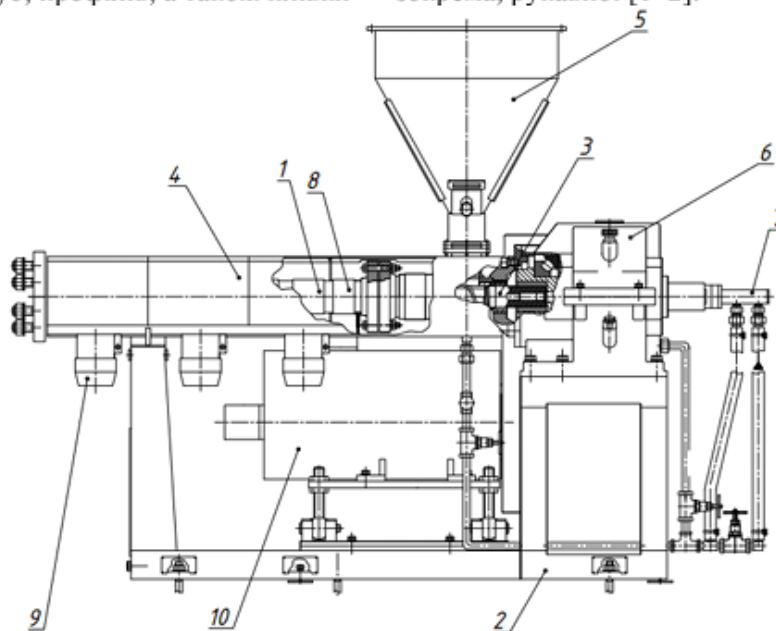


Рисунок 1 – Конструкція одно-черв'ячного екструдера:

- 1 – черв'як; 2 – редуктор; 3 – корпус; 4 – циліндр; 5 – бункер; 6 – втулка; 7 – кришка;
8 – пристрій охолодження; 9 – охолоджувач; 10 – електродвигун; 11 – рама

Одним із основних конструктивних елементів екструдера є черв'як, геометрія якого визначає ефективність подачі, ступінь ущільнення полімерного розплаву та стабільність потоку. Покращення його конструкції є ключем до підвищення продуктивності та якості виробу [3–4].

В роботі описано вдосконалену конструкцію черв'яка одночерв'ячного екструдера, яка забезпечує зниження зворотного потоку та стабілізацію подачі полімерного розплаву при екструзії плівкових матеріалів. В основу вдосконалення покладено ідею патенту EP3446850A1 [5], згідно з якою запропоновано потовщення ребра витка для стабілізації тиску.

Цю ідею адаптовано до одночерв'ячного екструдера шляхом плавного зменшення ширини витка по довжині гвинтової лінії, що створює ефект ущільнення в зоні подачі. Така форма дозволяє зменшити зворотний потік розплаву без ускладнення конструкції (рис. 2).

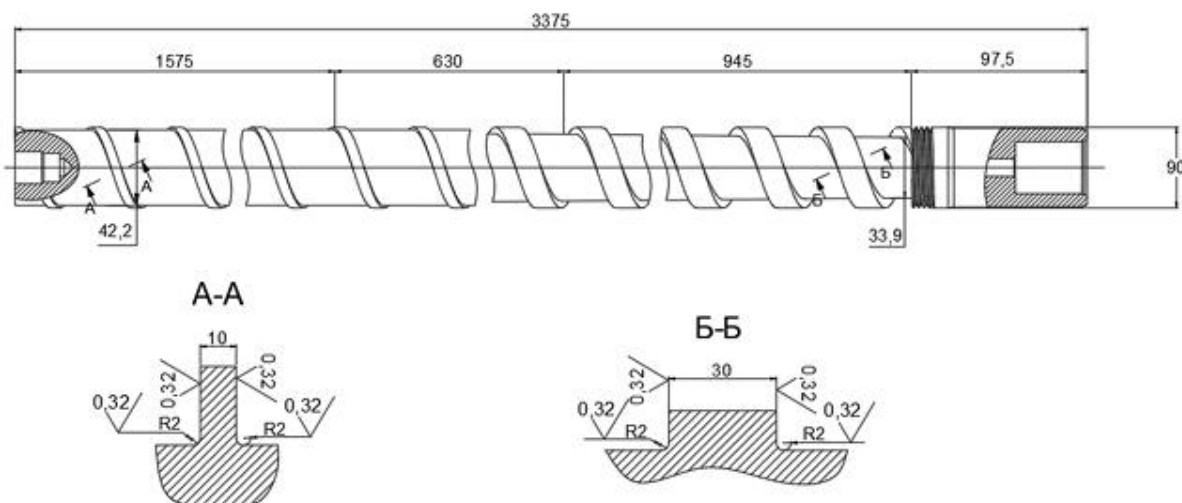


Рисунок 2 – Черв'як модернізований

Для підтвердження працездатності розробленої конструкції створено 3D-модель у програмному середовищі SolidWorks (рис. 3). З моделі видно, що на початку черв'яка профіль витка є значно ширшим, і далі він плавно звужується. Це забезпечує поступове ущільнення полімерного розплаву без різких гідродинамічних змін.

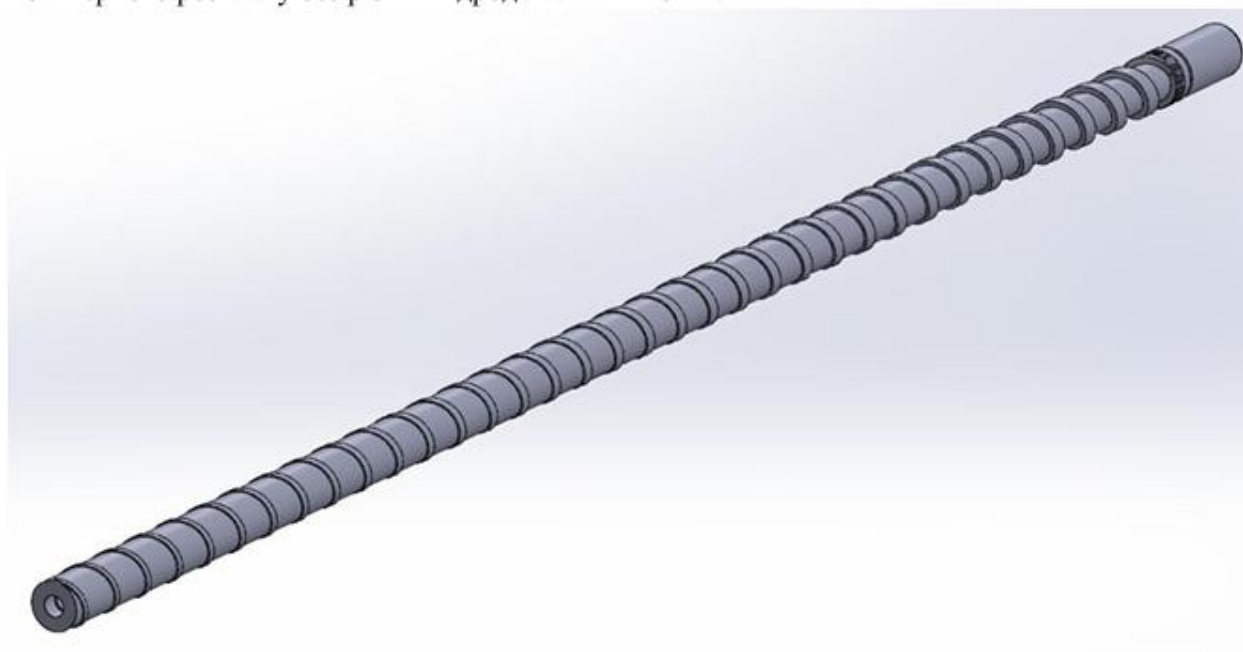


Рисунок 3 – 3D-модель черв'яка модернізованого

Для аналізу міцності конструкції проведено кінцево-елементне моделювання в ANSYS з такими умовами:

- хвостовик черв'яка жорстко закріплений;
- на накінецьник вала прикладено зусилля 50000 Н (50 кН), прикладеної у напрямку осі конструкції, що імітує собою тиск від матеріалу;

- додатково прикладено крутний момент величиною 79500 Н·мм, що відповідає реальним умовам роботи черв'яка при обертанні під час процесу екструзії;
- матеріал виконання черв'яка сталь 38Х2МЮА з границею текучості $[\sigma_T] = 835$ МПа.

Результати моделювання (рис. 4) показали, що максимальні еквівалентні напруження $\sigma_{\max} = 79,96$ МПа. Запас міцності конструкції в такому випадку

$$n = [\sigma_T] / \sigma_{\max} = 835/79,96 = 10,44$$

що вказує на високий запас міцності та допустимість застосування конструкції.

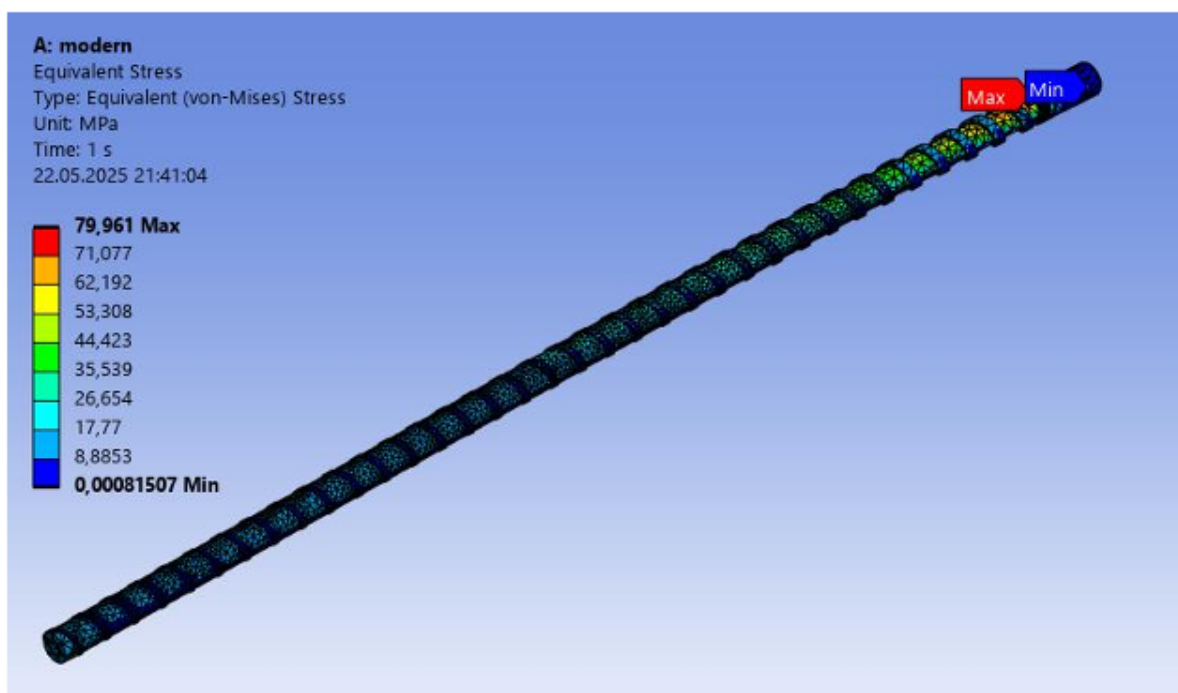


Рисунок 4 – Результати розрахунку напружень у черв'яку за Мізесом

Висновки. Запропонована модернізація черв'яка одночерв'ячного екструдера, у вигляді поступового зменшення ширини витка дозволила досягти покращеної стабільності подачі розплаву, зниження зворотного потоку, а також підвищення якості плівкової продукції. Конструкція має достатній запас міцності $n = 10,44$, що підтверджено проведеними розрахунками і може бути рекомендована для впровадження у виробництво.

Перелік посилань

1. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів: навч. посіб. / І. О. Мікульонюк та ін. – Київ: НТУУ «КПІ», 2015. – 200 с.
2. Sayyad Zahid Qamar. Extrusion of Metals, Polymers and Food Products. – IntechOpen, 2018. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.7055>.
3. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів: навч. посіб. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/68766>.
4. Мікульонюк І. О. Механічні та гідромеханічні процеси, апарати і машини хімічної технології: Практикум. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
5. EP3446850A1 – Extruder screw with thickened flight rib. European Patent Office, 2019.