

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО”
Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

До захисту допущено
Завідувач кафедри

Олександр Сокольський
«_____» _____ 2026 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою Інжиніринг пакування та пакувального обладнання
зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему: Лінія для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки
екструдера

Студент IV к, групи ЛУ-21 Гафинець Тарас Михайлович _____

(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник проекту:

к.п.н., доцент Казак І.О.

(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)

Київ 2026 рік

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології

Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – *131 Прикладна механіка*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ *Олександр Сокольський*

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Гафінцю Тарасу Михайловичу

1. Тема проекту «Лінія для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера», керівник проекту к.п.н., доц. Казак Ірина Олександрівна, затверджені наказом по університету від «17.05» 2026 р. №1317-С
2. Термін подання студентом проекту 12.06.2026 р.
3. Вихідні дані до проекту Тип екструдера — РН-45 з такими вихідними даними: об'ємна продуктивність $Q=10498 \text{ м}^3/\text{с}$; внутрішній діаметр гільзи $D1 = 45 \text{ мм}$; зовнішній діаметр гільзи $D2 = 65 \text{ мм}$; матеріал черв'яка — сталь 40ХН2МА; зовнішній діаметр корпусу $D3 = 235 \text{ мм}$; діаметр черв'яка $d=45 \text{ мм}$; частота обертання черв'яка $n=1,66 \text{ об/с}$; габаритні розміри машини $L=2270 \text{ мм}$, $S=900 \text{ мм}$, $H=935 \text{ мм}$; потужність двигуна $N=37 \text{ кВт}$.
4. Зміст пояснювальної записки
Вступ. 1 Призначення та галузь застосування екструдера 2 Технічні характеристики екструдера. 3 Опис конструкції і принцип дії екструдера. 4 Літературно-патентний огляд для вибору варіанту модернізації екструдера. 5 Розрахунки. 6 Охорона праці. 7 Технологія машинобудування. Загальні висновки. Перелік посилань. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу

Екструдер, ф. А1.

Лінія для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера ф. А1.

3D-модельовання розподільника екструзійної головки та її модернізація, ф. А1.

Числове модельовання розподільчої частини модернізації матриці у ANSYS ф. А1.

Деталювання, ф. А1.

Формуюча головка модернізована, ф.А1

Формуюча головка, ф. А.1

Матриця, ф.А2

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Ім'я, 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.		

7. Дата видачі завдання21.05.26.....

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ. Призначення, опис конструкції і принципу дії екструдера для виготовлення плівки	21.05.26 – 29.05.26	
2	Технічні характеристики екструдера для виготовлення плівки	29.05.26 – 30.05.26	
3	Опис технологічної лінії виготовлення полімерної плівки екструзійним методом з роздуванням рукава	31.05.26 – 01.06.26	
4	Літературно-патентний огляд для вибору варіанту модернізації екструдера	01.06.26 – 04.06.26	
5	Охорона праці.	05.06.26 – 10.06.26	
6	Розрахунки.		
7	Оформлення пояснювальної записки та креслень	10.06.26-12.06.26	

Студент

Тарас ГАФИНЕЦЬ

Керівник проекту

Ірина КАЗАК

РЕФЕРАТ

Виконавець дипломного проекту – студент групи ЛУ-21 Гафинець Т.М.
керівник керівник проекту – к.п.н., доцент Казак І.О.

Робота складається з пояснювальної сторінки та містить 7 розділів і додатки, обсягом записки 84 сторінок та графічну частину з 5 креслень формату А1, 1 креслення формату А2 та 2 плакатів формату А1.

Об'єктом розробки є екструдер для виготовлення полімерної рукавної плівки. Метою дослідження було опис технологічної лінії та визначено місце екструдера в технологічному процесі виробництва плівкових матеріалів. Виконано аналіз конструкції одночерв'ячного екструдера, його основних вузлів та принципу роботи.

Проведено параметричні розрахунки черв'яка, визначено основні геометричні характеристики робочого органу та виконано розрахунок коефіцієнта геометричної форми екструзійної головки. На основі літературно-патентного аналізу існуючих конструкцій екструзійних головок обґрунтовано необхідність модернізації внутрішньої розподільчої частини головки.

Розроблено тривимірну модель модернізованої конструкції з використанням систем автоматизованого проектування та проведено її числове моделювання у ANSYS. За результатами моделювання отримано розподіл напружень, деформацій та переміщень у конструкції. Проведений аналіз підтвердив працездатність і надійність модернізованої розподільчої частини екструзійної головки та доцільність її використання для підвищення якості виробництва полімерної плівки. У дипломі виконані також розділи з охорони праці та технології машинобудування.

Підготовлено і опубліковано тезу на XXIII Всеукраїнську конференцію за темою дипломного проекту бакалавра.

Ключові слова: ЕКСТРУДЕР, ЧЕРВ'ЯК, ЕКСТРУЗІЙНА ГОЛОВКА, РУКАВНА ПЛІВКА, РОЗПОДІЛЬЧА ЧАСТИНИ ГОЛОВКИ

ABSTRACT

The diploma project was completed by a student of group LU-21, T. M. Hafynets. The project supervisor is Ph.D. in Engineering, Associate Professor Ihor O. Kazak.

The project consists of an explanatory report containing 7 chapters and appendices. The report comprises 84 pages and is accompanied by a graphic section including 5 engineering drawings of A1 format, 1 engineering drawings of A2 format and 2 posters of A1 format.

The object of development is an extruder for the production of polymer blown film. The purpose of the study was to describe the technological production line and determine the role of the extruder within the film manufacturing process. An analysis of the single-screw extruder design, its main components, and operating principles was carried out.

Parametric calculations of the screw were performed, the main geometric characteristics of the working element were determined, and the geometric shape coefficient of the extrusion die was calculated. Based on a literature and patent review of existing extrusion die designs, the necessity of modernizing the internal melt distribution section of the die was substantiated.

A three-dimensional model of the modernized design was developed using computer-aided design software, and numerical simulation was performed in ANSYS. The simulation results provided stress, strain, and displacement distributions within the structure. The conducted analysis confirmed the operability and reliability of the modernized melt distribution section of the extrusion die and demonstrated the feasibility of its application for improving the quality of polymer film production.

The diploma project also includes sections devoted to occupational health and safety and manufacturing technology.

In addition, a conference paper based on the topic of the bachelor's diploma project was prepared and published for presentation at the XXIII All-Ukrainian Scientific Conference.

Keywords: EXTRUDER, WORM, EXTRUSION HEAD, SLEEVED FILM, DISTRIBUTION HEAD PARTS

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

- D – діаметр черв'яка, м;
 t – крок гвинтової лінії, м;
 e – ширина гребня витка, м;
 δ – зазор між черв'яком і гальзою, м;
 L – загальна довжина робочої частини черв'яка, м;
 L_3 – довжина зони завантаження, м;
 L_d – довжина зони дозування, м;
 L_c – довжина зони стиску, м;
 Q – продуктивність черв'ячної машини, $\text{м}^3/\text{с}$;
 φ – кут нахилу нарізки, рад;
 α' – коефіцієнт прямого потоку розплаву у каналі черв'яка, м^3 ;
 β_1 – коефіцієнт зворотного потоку розплаву у каналі черв'яка, м^3 ;
 γ_1 – коефіцієнт потоку втрат черв'яка, м^3 ;
 n_b – частота обертання валу екструдера, с^{-1} ;
 Π – масова продуктивність лінії, $\text{кг}/\text{с}$;
 I – момент інерції перерізу, м^4 ;
 i – радіус інерції, м;
 λ – ступінь жорсткості;
 δ_p – прогин черв'яка, м;
 $M_{\text{кр}}$ – крутний момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$;
 $Q_{\text{ос}}$ – осьове зусилля, Н;
 σ_z – напруження від осьової сили, Па;
 τ – дотичне напруження, Па;
 W – момент опору розрахункового перерізу, м^3 ;
 n – запас міцності.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСТРУДЕРА В ЛІНІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ РУКАВНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ	8
2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕКСТРУДЕРА	12
3 ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ ЕКСТРУДЕРА	13
4 ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД З ВИБОРУ ВАРІАНТА МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕКСТРУДЕРА.....	17
4.1 Літературно-патентний огляд варіантів модернізації головки екструдера.....	17
4.2 Обґрунтування вибору модернізації головки екструдера	23
5 РОЗРАХУНКИ ЕКСТРУДЕРА	27
5.1 Розрахунок геометричних параметрів черв'яка	27
5.1.1 Розрахунок черв'яка на міцність	29
5.1.2 Розрахунок черв'яка на стійкість	32
5.1.3 Розрахунок черв'яка на жорсткість.....	33
5.1.4 Розрахунок коефіцієнта геометричної форми головки.....	35
5.2 3D-моделювання екструзійної базової та модернізованої головки в системі САПІА	39
5.3 Результати чисельних розрахунків базової та модернізованої екструзійної головки в програмному середовищі ANSYS.....	51

					ЛУ21.017246.01-90ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Гафинець				Лінія для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера	Літ.	Арк.
Перевір.	Казак І.О.						7
Керівник						ФАПІЕ КПІ	
Н. Контр.						ім. Ігоря Сікорського	
Затверд.	Сокольський					5	

5.4 Виконання розрахунку на міцність черв'яка за допомогою мови програмування C++.....	58
6 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	60
6.1 Шум і вібрації та методи боротьби з ними.....	60
6.2 Електробезпека.....	61
6.3 Пожежна безпека.....	63
ВИСНОВКИ.....	70
7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ	71
7.1 Технологія виготовлення деталі	71
7.2 Вибір та розрахунок пристосування для певної операції	76
ВИСНОВКИ.....	81
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	84
ДОДАТКИ.....	86
Додаток А. Таблиця огляду патентів	87
Додаток Б. Специфікації.....	89
Додаток В. Лістинг програми та результати розрахунку на міцність черв'яка екструдера за допомогою мови програмування C++	92
Додаток Г. Тези	94

					ЛУ21.017246.01-90ПЗ	Арк.
						2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Полімерні матеріали та вироби на їх основі займають важливе місце в сучасному виробництві. Вони широко застосовуються в пакувальній промисловості, будівництві, сільському господарстві, медицині та багатьох інших галузях завдяки поєднанню високих експлуатаційних характеристик, відносно низької вартості та технологічності перероблення

У проєкті розглянуто технологічний процес виготовлення полімерної плівки методом екструзії з роздуванням рукава. Наведено опис технологічної лінії та визначено місце екструдера в технологічному процесі виробництва плівкових матеріалів.

Виконано аналіз конструкції одночерв'ячного екструдера, його основних вузлів та принципу роботи. Проведено параметричні розрахунки черв'яка, визначено основні геометричні характеристики робочого органу та виконано розрахунок коефіцієнта геометричної форми екструзійної головки.

Метою дипломного проєкту є модернізація внутрішньої розподільчої частини екструзійної головки екструдера для виготовлення полімерної плівки, створення її тривимірної моделі та дослідження працездатності конструкції за допомогою числового моделювання.

Результати виконаної роботи можуть бути використані для вдосконалення конструкцій екструзійних головок, підвищення якості полімерної плівки та покращення техніко-економічних показників виробництва.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСТРУДЕРА В ЛІНІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ РУКАВНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ

Екструдер - машина, яка призначена для перетворення вихідної сировини, що перебуває в подрібненому стані, на розплав конкретної форми. Дана сировина може бути виконана у вигляді гранул, порошоків, паст [1].

Екструдери являються основним обладнанням, яке застосовується для екструзії. Екструзія - це технологічний неперервний процес, під час якого під дією температури відбувається розм'якшення матеріалу та пропускання його через формуючу головку для надання йому певної форми. В ході виконання даного процесу, із термопластичних матеріалів виготовляють плівки, труби, кабелі, вироби різного профільного перерізу, переробляють компаунти та папір, фібри, фільтраційну тканину [1].

В залежності від таких особливостей, як тип сировини, яка застосовується, матеріал, що переробляється та технічні параметри виробу, який необхідно одержати, розрізняють кілька типів екструдерів. Відмінність між ними полягає в геометрії, типі та кількості робочих органів, функціональному призначенні, режимах роботи, термодинаміці процесу тощо. Наприклад, черв'ячні екструдери використовуються для перероблення пластмас в процесі екструзії. Бувають випадки, коли при переробці полімерів доцільно застосовувати безчерв'ячні екструдери. До таких належать дискові. Вони експлуатуються у разі виникнення потреби провести якісне змішування, але немає необхідності у забезпеченні високого тиску формування. Інколи використовуються черв'ячно-дискові екструдери. Їх експлуатація дозволяє одержати високу якість змішування при переробленні матеріалу з відносно низькою в'язкістю та високою еластичністю.

В даній роботі розглянемо виготовлення полімерної плівки методом роздування рукава, адже цей спосіб часто застосовується на виробництвах та має наступні переваги у порівнянні з іншими:

- отримання продукту, який має «врівноважені» характеристики механічних властивостей як вздовж, так і в поперек виробу;
- на відміну від плоских плівок, плівки, виготовлені методом роздування рукава, під час ударних навантажень менше піддаються розщепленню на повздовжні полоси;
- у порівнянні з екструзією крізь плоскощілинну головку, з одного самого полімеру можна отримати плівку, яка матиме більшу густину та міцність;
- у зв'язку з відсутністю повздовжніх швів, добре підходять для виготовлення мішків, адже виключається ризик розриву в місцях зварювання вертикального шва;
- виробництво рукавної плівки не включає в себе операцію обрізання країв, що мінімізує кількість відходів;
- можливість корегувати ширину плівки шляхом регулювання швидкості відбору плівки і подачі повітря в рукав без заміни головки екструдера.

З технологічної ємності пневматичним завантажувачем 1 полімер, який перебуває у вигляді гранул, транспортується в бункер 2. Там він підсушується та нагрівається, після чого подається в екструдер 3, де відбувається його пластифікація та гомогенізація. Далі полімер нагнітається під тиском в формуючу головку 4 і видавлюється з неї у вигляді рукавної заготовки. Переріз цієї заготовки заданий геометрією кільцевої щілини головки екструдера. Повітря під тиском від 2 до 4 кПа через дорн головки подається в середину заготовки, за рахунок чого відбувається її роздування в поперечному напрямі. Таким чином утворюється плівковий міхур, який піддють інтенсивному охолодженню повітрям через дюзи пристрою для охолодження 5. Ця операція виконується для того щоб надати продукту формостійкості на даному етапі виробництва.

Розглянемо виготовлення плівки екструзійним методом з роздувом рукава на рис. 1.1 [1].

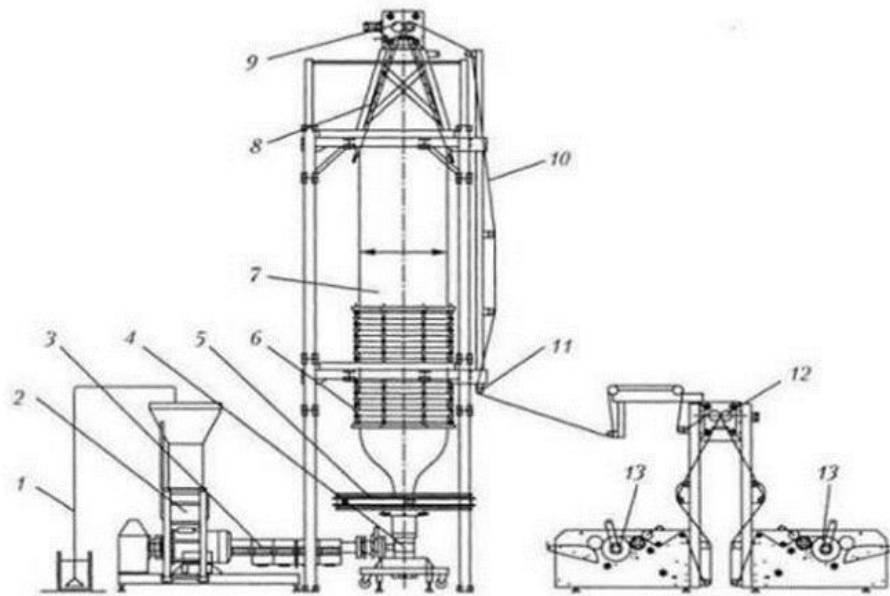


Рисунок 1.1 - Технологічна лінія виготовлення полімерної плівки екструзійним методом з роздуванням рукава:

1 – пневматичний завантажувач; 2- бункер; екструдер; 4- головка; 5 – пристрій для охолодження; 6 – кільцевий бандаж; 7 – рукавна плівка; 8 – щоки складальні; 9 – тягучий пристрій; 10 – полотно плівки; 11 – центруючі валки; 12 – ріжучий пристрій; 13 – намотувач.

З технологічної ємності пневматичним завантажувачем 1 полімер, який перебуває у вигляді гранул, транспортується в бункер 2. Там він підсушується та нагрівається, після чого подається в екструдер 3, де відбувається його пластифікація та гомогенізація. Далі полімер нагнітається під тиском в формуючу головку 4 і видавлюється з неї у вигляді рукавної заготовки. Переріз цієї заготовки заданий геометрією кільцевої щілини головки екструдера. Повітря під тиском від 2 до 4 кПа через дорн головки подається в середину заготовки, за рахунок чого відбувається її роздування в поперечному напрямі. Таким чином утворюється плівковий міхур, який піддють інтенсивному

охолодженню повітрям через дюзи пристрою для охолодження 5. Ця операція виконується для того щоб надати продукту формостійкості на даному етапі виробництва. Щоб стабілізувати форму рукава 7 і пришвидшити його охолодження, застосовується кільцевий бандаж 6. Циліндричний рукав перетворюється у двошарове полотно 10 складальними щокми 8. За необхідності, можна зменшити ширину полотна плівки, виконавши операцію фальцювання, під час якої фальцювальним пристроєм на полотні формуються поперздовжні бічні складки. Відведення рукава від головки екструдера та переміщення полотна плівки відбувається за рахунок дії тягучого пристрою 9 та валків 11, що обертаються. Потім полотно подається на шпирильні валки для розправлення складок, після чого розрізається ріжучим пристроєм 12 та намотується намотувачем 13 в рулони [2].

2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕКСТРУДЕРА

Розглянемо тип екструдера — РН-45 з такими вихідними даними, які представлені в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики екструдера РН-45

Технічна характеристика	Одиниця
Об’ємна продуктивність	$Q=10498 \text{ м}^3/\text{с}$
внутрішній діаметр гільзи	$D_1 = 45 \text{ мм}$
зовнішній діаметр гільзи	$D_2 = 65 \text{ мм}$
матеріал черв’яка	сталь 40ХН2МА
зовнішній діаметр корпусу	$D_3 = 235 \text{ мм}$
діаметр черв’яка	$d=45 \text{ мм}$
частота обертання черв’яка	$n=1,66 \text{ об/с}$
габаритні розміри машини : -довжина; - ширина; -висота;	$L=2270 \text{ мм},$ $S=900 \text{ мм},$ $H=935 \text{ мм}$
потужність двигуна	$N=37 \text{ кВт}$

3 ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ ЕКСТРУДЕРА

Екструдер - машина, яка призначена для перетворення вихідної сировини, що перебуває в подрібненому стані, на розплав конкретної форми. Дана сировина може бути виконана у вигляді гранул, порошоків, паст [1].

Розглянемо конструкцію та принцип роботи екструдера для виготовлення полімерної плівки (Рис 3.1) [3].

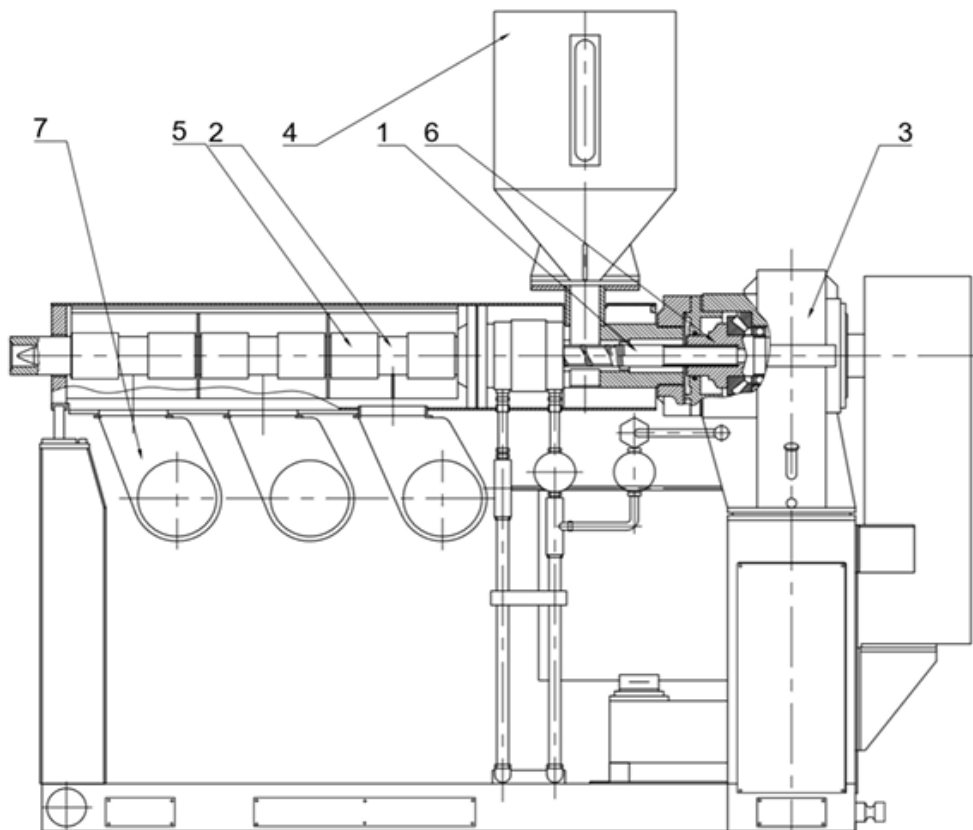


Рисунок 3.1 – Загальний вид екструдера

1 – черв'як; 2 – корпус, 3 – редуктор; 4 – завантажувальний бункер; 5 – нагрівачі; 6 – підшипник; 7 – вентилятор.

Вихідна сировина, яка може перебувати у вигляді гранул або порошоків, подається в завантажувальний бункер 4. Далі вона потрапляє до головного робочого органу данії машини — черв'яка 4, захоплюється ним та транспортується вздовж корпусу 2 до формуючої головки. Під час переміщення вздовж корпусу екструдера, полімерний матеріал спресовується,

плавиться за рахунок встановлених нагрівачів 5, гомогенізується та направляється під тиском до екструзійної головки. З метою відведення надлишку теплоти дисипації та забезпечення охолодження, в конструкції екструдера передбачений вентилятор 7. Черв'як приводиться в дію електромеханічним приводом через редуктор 3. 8 Підшипник 6 сприймає осьове навантаження, яке діє на черв'як в напрямку, протилежному руху розплаву.

Для екструдерів використовують приводи постійного струму та двигуни змінного струму з паралельним збудженням. Вони забезпечують плавне регулювання частоти обертання черв'яка.

Циліндр екструдера ділиться на кілька зон нагріву по своїй довжині. Регулювання потужності проводиться автоматично. З цією метою в кожній зоні нагрівання, в циліндрі розміщена термopapa, сигнал з якої надходить на прилади, якими проводиться регулювання температурних параметрів. Широкого розповсюдження набув обігрів нагрівниками опору. В деяких випадках для даної мети можуть бути використані рідинний та паровий обігрів. Омічі нагрівники не в змозі забезпечити стабільну температуру через свою високу інерційність.

Черв'як екструдера має свої особливості. В зоні плавлення об'єм його каналу зменшується. Причиною цьому є те, що густина розплаву більша, ніж насипна маса полімеру, що подається в екструдер. Зміна об'єму черв'яка реалізується шляхом зменшення глибини нарізки каналу, в окремих випадках — за рахунок зменшення кроку витків.

По виходу з екструдера, полімерний розплав набуває трубчасту форму шляхом видавлювання через кільцевий формувальний канал екструзійної головки. Далі дану заготовку піддають пневматичному розтягуванню шляхом подачі в неї стисненого повітря для установалення в рукаві надлишкового тиску. Повітря в рукаві утримується шляхом забезпечення герметичності простору безпосередньо стінкою самого рукава та головкою екструдера з тягучим валками на торцях.

Навколо екструзійної головки розташовані щілини для подачі холодного повітря, яке викривується з метою рівномірного й швидкого охолодження полімерної трубки. Це дає змогу забезпечити збереження циліндричності заготовки та отримати рівномірну товщину стінки виробу. Охолодження рукава повітрям продовжується від кільця до валків.

Шляхом зміни тиску в рукаві та частоти обертання валків, можна корегувати ширину й товщину одержуваної плівки. Але при цьому слід опиратися на деформаційність розплаву та швидкість кристалізації матеріалу. При виготовленні полімерної плівки методом, який розглядається в даній роботі, існує три схеми виробництва за напрямком руху рукава від головки до валків (Рис. 3.2) [4]:

- 1) вертикально вгору;
- 2) вертикально вниз;
- 3) горизонтально.

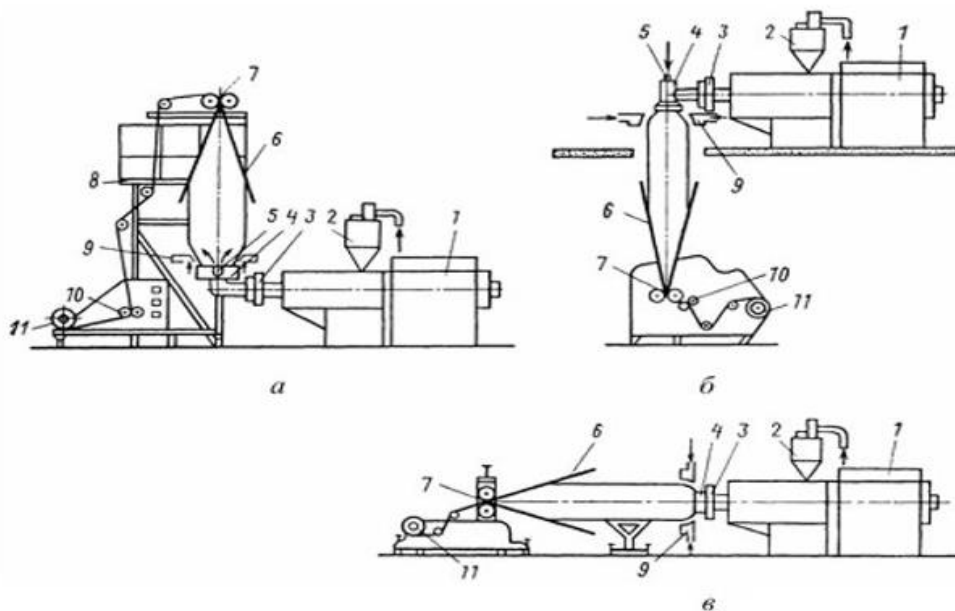


Рисунок 3.2 – Схеми виробництва рукавних полімерних плівок:

а – вертикально вгору; б – вертикально вниз; в – горизонтально; 1 – екструдер; 2 – бункер; 3 – фільтр; 4 – екструзійна кільцева головка; 5 – трубопровід; 6 – складальний пристрій; 7, 10 – тягучі валки; 8 – естакада; 9

– охолоджувальне кільце; 11 – приймальний (намотувальний) пристрій

При виготовленні полімерної плівки екструзією з роздуванням рукава, необхідно контролювати технологічні параметри, адже зміна одразу впливає на якість продукту. Температура головки екструдера для ПЕВТ рекомендовано підтримувати в діапазоні 170-200°C, для ТЕНТ — 190-220°C, для ПП — 210-230°C. При збільшенні швидкості обертання черв'яка може виникнути необхідність в підвищенні температури екструзії. Слід врахувати, що при цьому інтенсифікуються процеси окиснення, які знижують якість плівки. Підвищення вологості сировини сприяє утворенню бульбашок газу в розплаві, які лопаються по виходу з формуючої головки. Усувається ця причина шляхом завчасного підсушування полімерної сировини [4].

4 ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД З МЕТОЮ ВИБОРУ ВАРІАНТУ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕКСТРУДЕРА

4.1 Літературно-патентний огляд варіантів модернізації екструдера

Екструзія є одним із найпоширеніших способів переробки полімерних матеріалів. Даний процес широко використовується для виробництва плівок, листів, труб, профілів та інших виробів.

Основними вимогами до сучасного екструзійного обладнання є висока продуктивність, стабільність технологічного процесу, рівномірність розподілу полімерного розплаву та забезпечення високої якості готової продукції.

Під час роботи традиційних екструдерів виникають проблеми, пов'язані з нерівномірністю потоку розплаву, нестабільністю тиску в зоні формування, виникненням внутрішніх напружень у матеріалі та неоднорідністю товщини готових виробів. Тому значна кількість сучасних наукових досліджень та патентних розробок спрямована на вдосконалення конструкції екструдера і формувальної головки.

Для вибору оптимального варіанта модернізації було проведено аналіз [5-8] сучасних патентних рішень.

У джерелі [5] запропоновано спосіб і обладнання для формування надвисокомолекулярних полімерів на основі динамічного розтягування розплаву.

Особливістю конструкції є використання екструдера з розтягувальною реологією та спеціальної формувальної головки, у якій полімерний матеріал піддається одночасному осьовому та радіальному розтягуванню. Під час проходження через формувальний канал трубчаста заготовка безперервно деформується, що сприяє вирівнюванню структури матеріалу та покращенню його реологічних характеристик (Рис.4.1).

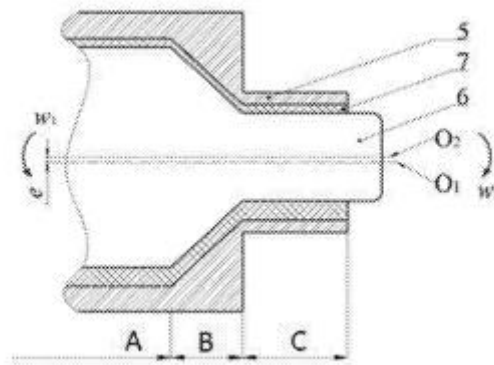


Рисунок 4.1 - Схема розподілу та формування полімерного розплаву в модернізованій головці екструдера; 5 – внутрішній канал розплаву; 7 – формувальна щілина; 6 – центральний дорн;

Основними перевагами даного технічного рішення є підвищення текучості високомолекулярних полімерів, зменшення внутрішніх напружень і покращення рівномірності товщини виробів.

Разом із тим конструкція потребує суттєвих змін у будові екструдера та використання спеціальної формувальної головки. Реалізація такого рішення пов'язана зі значними витратами на модернізацію обладнання та складністю подальшого технічного обслуговування.

Таким чином, незважаючи на високі технологічні показники, використання даного патенту для модернізації існуючого екструдера є економічно менш доцільним.

Патент з джерела [6] присвячений удосконаленню екструзійної системи шляхом стабілізації потоку полімерного розплаву та оптимізації конструкції формувальної головки (Рис.4.2).

У традиційних екструдерах нерівномірність розподілу тиску та швидкості потоку розплаву часто призводить до появи коливань товщини плівки, дефектів поверхні та погіршення фізико-механічних характеристик виробів. Для усунення цих недоліків авторами запропоновано застосування формувального каналу зі змінним поперечним перерізом, який забезпечує плавний розподіл розплаву перед виходом із головки.

Особливістю винаходу є поєднання декількох технічних рішень:

- системи стабілізації тиску;
- системи вирівнювання швидкості потоку;
- модернізованого формувального каналу;
- системи охолодження виробу.

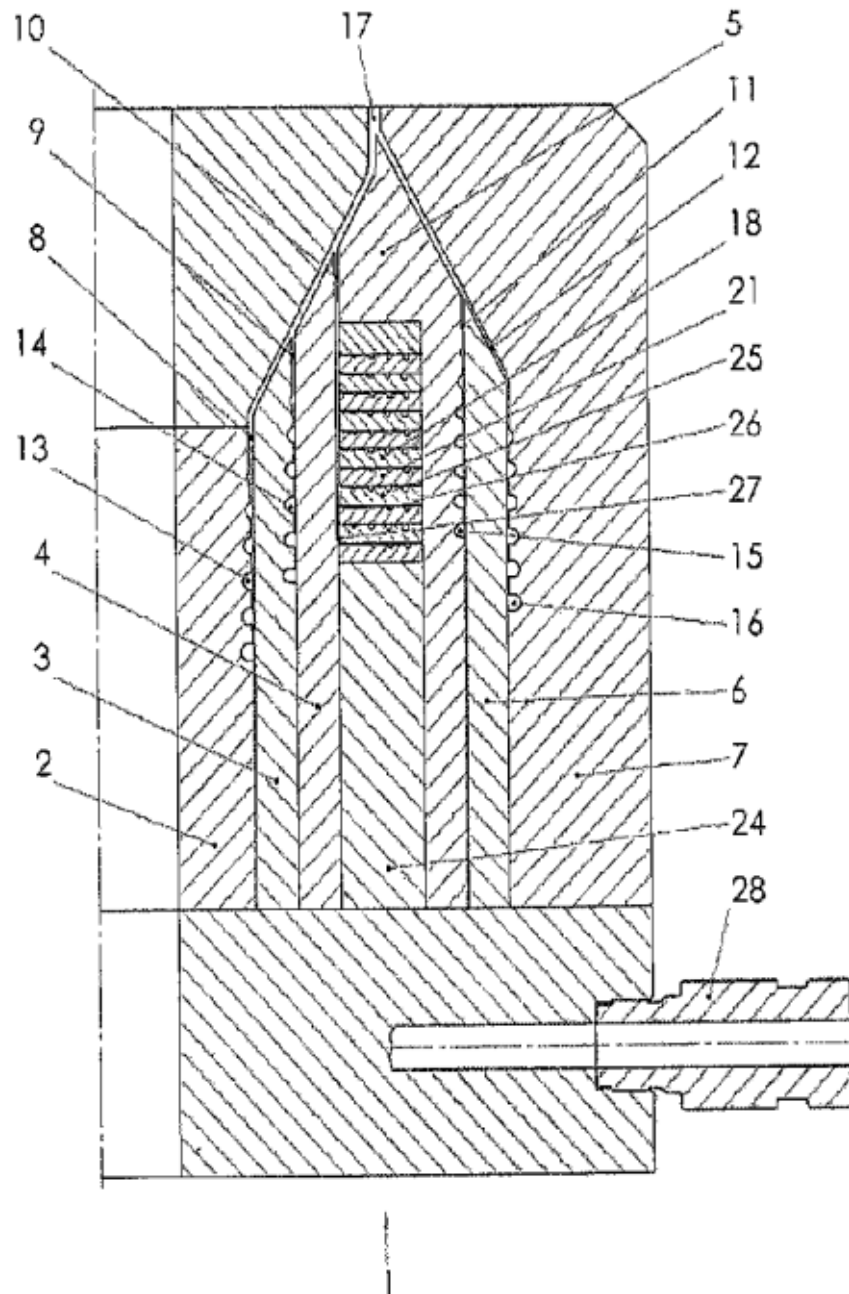


Рисунок 4.2 - Схема розподільника розплаву:

2 - дорн / внутрішній кільцевий елемент; 3 - зовнішній кільцевий елемент; 4 - центральна вісь; 5 - внутрішній канал для розплаву; 6 - зовнішній

канал для розплаву; 7 - проміжний або додатковий канал для розплаву, 8 підвід розплаву; 9 - спіральний розподільник; 10 - пластинчастий розподільник; 11 - канал шару плівки; 12 - зона об'єднання шарів, 13 - кільцеве сопло; 14 - елементи термоізоляції; 5 – нагрівальний елемент; 16 – електричний нагрівач формувальної головки; 17 – центральний конічний розподільник потоку; 18 – зовнішній корпус розподільника; 21 – канал вирівнювання потоку розплаву; 24 – корпус головки екструдера; 25 – напрямний канал розплаву; 26 – розподільна порожнина; 27 – зона стабілізації потоку; 28 – штуцер (патрубок) подачі полімерного розплаву.

У результаті модернізації забезпечується більш рівномірний розподіл полімерного розплаву по всій ширині формувального каналу, зменшується турбулентність потоку та покращується якість готової продукції.

Основними перевагами даного рішення є:

- рівномірна товщина виробів;
- покращення якості поверхні;
- зниження внутрішніх напружень;
- підвищення стабільності технологічного процесу;
- можливість впровадження без повної заміни екструдера.

Особливо важливо, що модернізація передбачає внесення змін переважно до формувальної головки, що значно спрощує реалізацію проекту та зменшує витрати на модернізацію.

Саме тому даний патент розглядається як найбільш перспективний варіант для подальшого впровадження.

Джерело [7] присвячений автоматичній ідентифікації форми плівкового рукава у процесі видувного формування плівки (Рис.4.3).

У процесі виробництва полімерних плівок часто виникають відхилення геометричних параметрів рукава, які негативно впливають на рівномірність товщини та якість готової продукції. Для вирішення цієї проблеми авторами запропоновано використання системи автоматичного контролю, що

складається з камер, датчиків та програмного забезпечення для аналізу геометрії рукава.

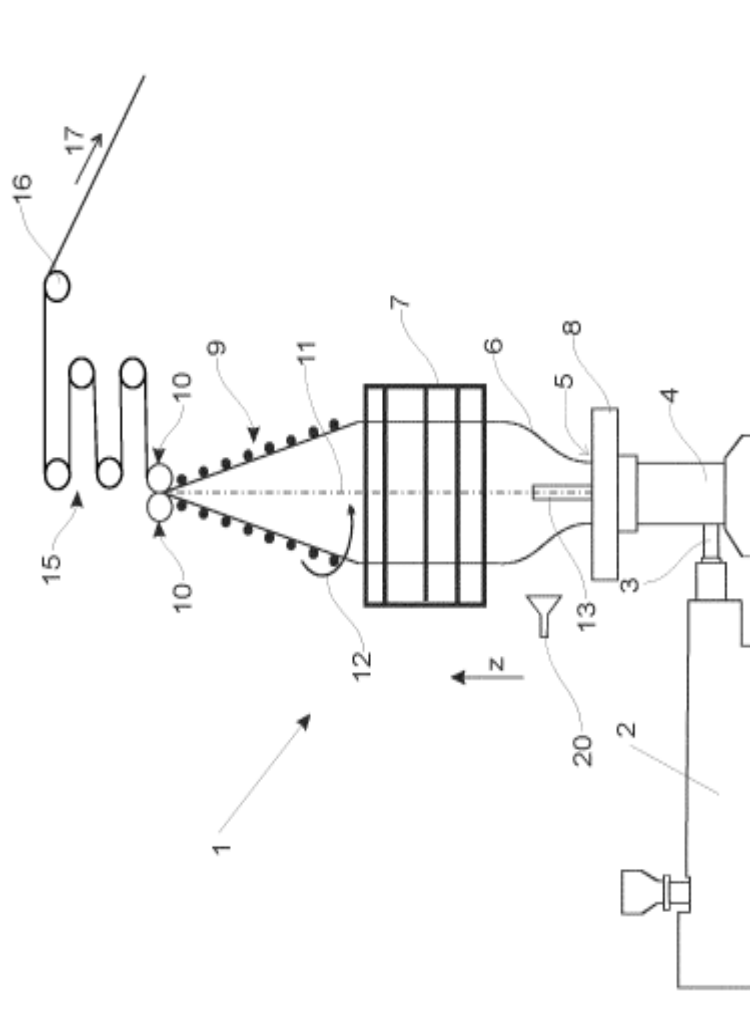


Рисунок 4.3 – Вид збоку лінії видувної плівки згідно з винаходом:

1 – система видувного формування плівки; 2 – екструдер; 3 – кільцева екструзійна головка; 4 – адаптер головки; 5 – опорний фланець; 6 – плівковий рукав; 7 – пристрій вимірювання форми рукава; 8 – калібрувальна клітка; 9 – верхня частина рукава; 10 – датчики; 11 – вимірювальне кільце; 12 – вісь рукава; 13 – система подачі охолоджувального повітря; 15 – тягнучі валки; 16 – напрямний валок; 17 – намотувальний пристрій; 20 – потік охолоджувального повітря.

Система дозволяє в режимі реального часу контролювати форму рукава та автоматично коригувати параметри технологічного процесу.

Перевагами даного рішення є:

- зниження кількості браку;
- автоматизація виробництва;
- підвищення стабільності процесу;
- зменшення впливу людського фактора.

Разом з тим даний патент не передбачає безпосередньої модернізації конструкції екструдера. Він орієнтований переважно на вдосконалення системи контролю технологічного процесу.

З цієї причини використання даного рішення як основного напрямку модернізації екструдера є недоцільним.

Джерело [8] описує багатшаровий пристрій видувного формування плівки з різноспрямованим обертанням внутрішньої оправки та зовнішнього формувального кільця (Рис.4.4).

Принцип роботи базується на одночасному обертанні формувальних елементів у протилежних напрямках, що забезпечує стабілізацію потоку розплаву та покращення рівномірності товщини плівки.

Застосування даного технічного рішення дозволяє:

- зменшити анізотропію матеріалу;
- покращити механічні властивості плівки;
- забезпечити стабільність формування;
- підвищити рівномірність товщини.

Однак реалізація такого рішення потребує суттєвої зміни конструкції формувальної головки, встановлення додаткових приводів та складної системи передачі обертального руху.

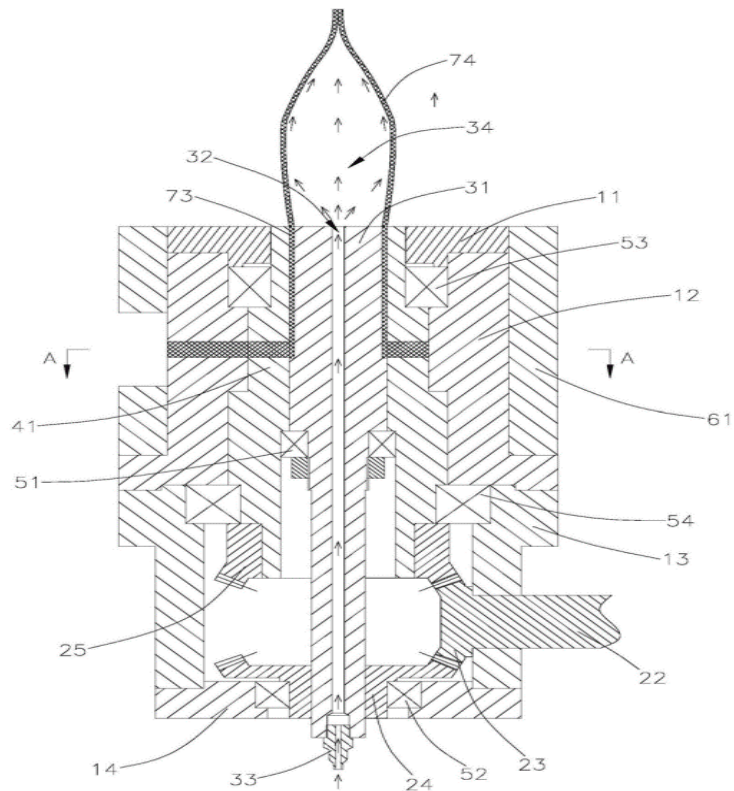


Рисунок 4.4 – Конструкція багатошарової головки видувного формування плівки з різноспрямованим обертанням:

11 – внутрішня обертова оправка; 12 – зовнішнє обертове формувальне кільце; 13 – корпус головки; 14 – нижня кришка; 22 – отвір подачі розплаву; 23 – канал подачі розплаву; 24 – формувальна щілина; 25 – кільцева порожнина розподілу розплаву; 31 – канал подачі повітря; 32 – вихід повітря; 33 – вхід повітря; 34 – плівковий рукав; 41 – внутрішня передавальна шестерня; 51–53 – підшипникові вузли; 54 – зовнішня передавальна шестерня; 61 – канал течії розплаву; 73 – напрямок руху повітря; 74 – напрямок руху плівкового рукава.

Через високу складність конструкції та значні витрати на впровадження використання даного патенту як базового варіанта модернізації є менш доцільним порівняно з патентом.

4.2 Обґрунтування вибору модернізації головки екструдера

У результаті проведеного літературно-патентного огляду було

розглянуто чотири сучасні технічні рішення, спрямовані на вдосконалення процесу екструзії полімерних матеріалів. Аналіз джерел [5-8] показав, що кожен із них вирішує окремі проблеми екструзійного виробництва та забезпечує покращення певних технологічних параметрів.

Патент [5] передбачає використання динамічного розтягування полімерного розплаву під час формування виробу. Запропонована конструкція дозволяє покращити переробку надвисокомолекулярних полімерів та підвищити однорідність структури матеріалу. Проте реалізація даного технічного рішення потребує суттєвої зміни конструкції екструдера та формувальної головки, що супроводжується значними витратами на модернізацію обладнання. Крім того, даний винахід орієнтований переважно на спеціалізовані високомолекулярні полімерні матеріали та має обмежене застосування для традиційного виробництва полімерних плівок.

Патент [7] спрямований на автоматизацію процесу контролю форми плівкового рукава шляхом використання датчиків, камер та програмного забезпечення для аналізу геометричних параметрів виробу. Незважаючи на високий рівень автоматизації та можливість оперативного контролю якості продукції, даний винахід практично не впливає на конструкцію екструдера або формувальної головки. Основним його призначенням є контроль технологічного процесу, а не усунення причин виникнення дефектів під час формування плівки. Тому використання цього рішення як основного напрямку модернізації головки екструдера є недоцільним.

Патент [8] пропонує використання формувальної головки з різноспрямованим обертанням внутрішньої оправки та зовнішнього формувального кільця. Дане рішення дозволяє зменшити анізотропію полімерної плівки, покращити рівномірність товщини виробу та стабілізувати процес формування. Однак впровадження такої конструкції потребує встановлення додаткових механічних вузлів, приводів, підшипникових опор і зубчастих передач. Це значно ускладнює конструкцію головки, збільшує її вартість та підвищує вимоги до технічного обслуговування обладнання.

Найбільш доцільним варіантом модернізації було обрано технічне рішення, запропоноване у патенті [6]. Даний винахід спрямований на усунення однієї з основних проблем процесу екструзії – нерівномірності потоку полімерного розплаву в каналах формувальної головки. Саме нестабільність потоку є основною причиною появи коливань товщини плівки, утворення дефектів поверхні, виникнення внутрішніх напружень та погіршення фізико-механічних властивостей готової продукції.

У патенті [6] запропоновано модернізовану конструкцію формувальної головки зі змінною геометрією каналу течії розплаву. Завдяки поступовому перерозподілу матеріалу забезпечується вирівнювання швидкості потоку по всій площі формування виробу. Одночасно відбувається стабілізація тиску полімерного розплаву, що сприяє зменшенню турбулентності та локальних зон застою матеріалу.

Використання даного рішення дозволяє досягти таких переваг:

- підвищення рівномірності розподілу полімерного розплаву;
- покращення стабільності технологічного процесу екструзії;
- зменшення коливань товщини плівки;
- зниження кількості поверхневих дефектів;
- зменшення внутрішніх напружень у виробі;
- покращення фізико-механічних властивостей продукції;
- підвищення якості готових виробів;
- зниження кількості браку;
- підвищення ефективності використання полімерної сировини.

Важливою перевагою патенту [6] є можливість його впровадження без кардинальної зміни конструкції екструдера. Основні зміни стосуються лише модернізації формувальної головки та системи розподілу потоку розплаву. Це дозволяє значно скоротити витрати на модернізацію обладнання та зменшити терміни впровадження нового технічного рішення у виробництво.

Крім того, запропонована конструкція є універсальною та може використовуватися для виробництва одношарових і багатшарових

полімерних плівок, листових матеріалів та інших виробів, що виготовляються методом екструзії. Така універсальність підвищує економічну ефективність модернізації та розширює можливості використання обладнання.

Таким чином, на підставі проведеного літературно-патентного аналізу встановлено, що патент [6] найбільш повно відповідає поставленим вимогам модернізації екструдера. Запропоноване технічне рішення забезпечує покращення якості продукції, підвищення стабільності технологічного процесу та не потребує значних конструктивних змін існуючого обладнання. Саме тому даний патент прийнято за основу при розробленні проєкту модернізації головки екструдера.

5 РОЗРАХУНКИ ЕКСТРУДЕРА

5.1 Розрахунок геометричних параметрів черв'яка

Приймаємо відношення довжини черв'яка до діаметра L/D рівним 30 та розрахуємо геометричні параметри робочого органу екструдера, конструктивна схема якого зображена на рисунку 5.1.

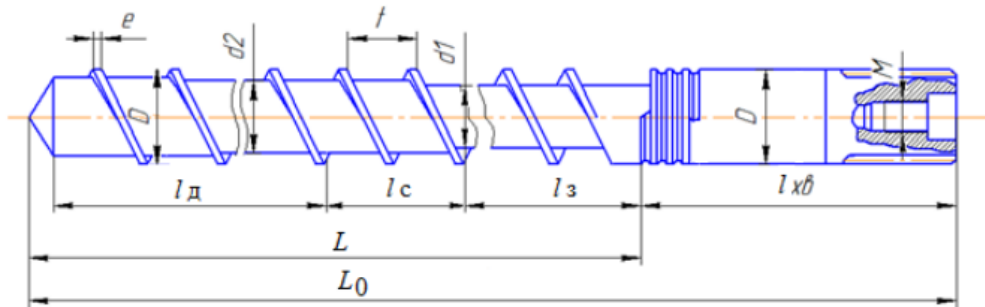


Рисунок 5.1 — Конструктивна схема черв'яка

Робоча частина черв'яка розподілена на зони, які зазвичай, відповідають відповідним технологічним зонам екструдера. В основному, гвинтова нарізь розподілена на три основні конструктивні зони: завантаження, стиснення та дозування. В зоні звнтаження черв'як має постійну геометрію та максимальну глибину каналу гвинтової нарізі, на відміну від зони дозування, де глибина каналу мінімальна. Параметр, якій визначає співвідношення цих глибин, називається ступенем стискання. Між вище зазначеними зонами знаходиться зона стиснення, яка виконана у вигляді конічного переходу.

1. Знайдемо довжину гвинтової частини черв'яка:

$$l_{\text{роб}} = (20 \div 30) \cdot D = 30 \cdot 45 = 1350 \text{ мм.}$$

2. Довжина завантажувальної зони становитиме:

$$l_{\text{зав}} = (2,5 \div 9) \cdot D = 8 \cdot 45 = 360 \text{ мм.}$$

3. Розраховуємо зону дозування:

$$l_{\text{доз}} = (8 \div 15) \cdot D = 15 \cdot 45 = 675 \text{ мм.}$$

4. Отримавши попередні значення, знайдемо довжину зони стиснення:

$$l_{\text{ст}} = l_{\text{роб}} - l_{\text{зав}} - l_{\text{доз}} = 1350 - 360 - 675 = 315 \text{ мм.}$$

5. Довжина шліцевого зачеплення:

$$l_{\text{шл}} = (1 \div 1,5) \cdot D = 1,4 \cdot 45 = 63 \text{ мм.}$$

6. Прийmemo значення довжин опори і евольвентного зачеплення:

$$l_{\text{ев}} = 125 \text{ мм.}$$

7. Довжина циліндричної частини черв'яка становить:

$$l_{\text{цил}} = (1 \div 2) \cdot D = 1 \cdot 45 = 45 \text{ мм.}$$

8. Обрахуємо величину загальної довжиної черв'яка:

$$l_{\text{заг}} = l_{\text{роб}} + l_{\text{ев}} + l_{\text{цил}} = 1350 + 125 + 45 = 1520 \text{ мм.}$$

6. Крок профілю витків черв'яка визначаємо наступним чином:

$$t = (0,7 \div 1) \cdot D = 1 \cdot 45 = 45 \text{ мм.}$$

7. Товщина гребня черв'яка:

$$e = (0,08 \div 0,12) \cdot D = 0,1 \cdot 45 = 4,5 \text{ мм.}$$

8. Визначимо значення зазору між черв'яком та гільзою:

$$\delta = (0,002 \div 0,03) \cdot D = 0,003 \cdot 45 = 0,135 \text{ мм.}$$

Зазвичай, радіуси заокруглення профілю нарізки становлять:

$$R = (0,12 \div 0,18) \cdot D = 0,16 \cdot 45 = 7,2 \text{ мм.}$$

$$r = (0,06 \div 0,16) \cdot D = 0,09 \cdot 45 = 4,05 \text{ мм.}$$

9. Знайдемо довжину гвинтового каналу під завантажувальною лійкою:

$$h_1 = (0,12 \div 0,16) \cdot D = 0,14 \cdot 45 = 6,3 \text{ мм.}$$

10. Визначаємо кут підйому гвинтової лінії в корпусі за наступною формулою:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{t}{\pi \cdot D} = \operatorname{arctg} \frac{45}{3,14 \cdot 45} = 17,67^\circ.$$

11. Глибина гвинтового каналу в зоні дозування:

$$h_2 = 0,5 \cdot \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4 \cdot h_1}{i} (D - h_1)} \right] =$$

$$= 0,5 \cdot \left[45 - \sqrt{45^2 - \frac{4 \cdot 6,3}{2,1} (45 - 6,3)} \right] = 2,75 \text{ мм.}$$

i — ступінь стиску ПНТ.

12. Розрахуємо діаметри стержня черв'яка.

12.1. Під завантажувальною горловиною:

$$d_1 = D - 2 \cdot h_1 = 45 - 2 \cdot 6,3 = 32,4 \text{ мм.}$$

12.2. В зоні дозування:

$$d_2 = D - 2 \cdot h_2 = 45 - 2 \cdot 2,75 = 39,5 \text{ мм}$$

5.1.1 Розрахунок черв'яка на міцність

На черв'як екструзійної машини діють наступні зусилля:

- осьове зусилля, $P_{ос}$;
- рівномірно розподілене навантаження від власної ваги, q , Н/м;
- крутний момент, $M_{кр}$, Н · м.

1. Розрахункова схема черв'яка на міцність зображена на рисунку 5.2 .

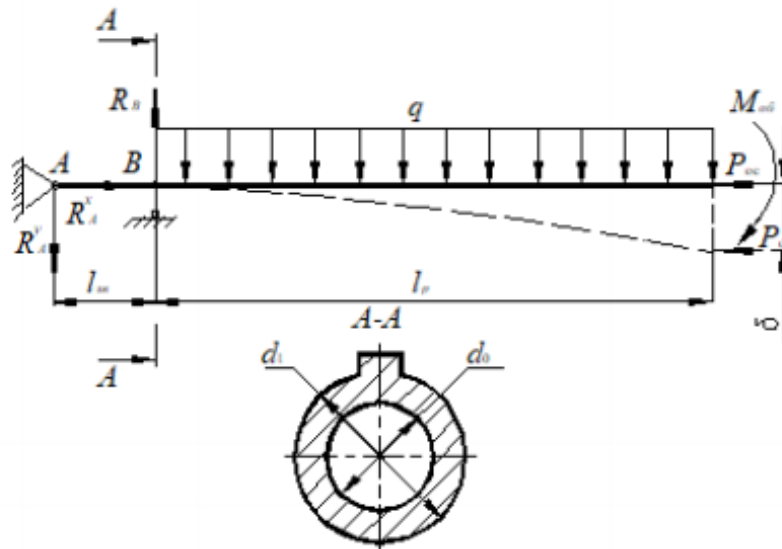


Рисунок 5.2 — Розрахункова схема черв'яка на міцність

1. Визначимо величину крутного моменту:

$$M_{кр} = \frac{30N}{\pi n} = \frac{30 \cdot 37}{3,14 \cdot 99,6} = 3,549 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де N — потужність, яка споживається черв'яком, Вт;

n — частота обертання черв'яка, об/хв.

2. Розрахуємо осе зусилля:

$$P_{ос} = \frac{2M_{кр}}{D} \operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \cdot 3,549}{0,045} \operatorname{tg} 17,67^\circ = 50,25 \text{ Н},$$

де D — діаметр черв'яка, м;

φ — кут підйому гвинтової лінії робочого органу екструдера.

3. Знайдемо величину розподіленого навантаження від власної ваги черв'яка:

$$q = \frac{9,8 \cdot G}{l_{заг}} = \frac{9,8 \cdot 11,47}{1,52} = 69,27 \text{ Н/м}.$$

де G — маса черв'яка, кг;

$l_{заг}$ — загальна довжина черв'яка, м.

$$G = \frac{\pi \cdot (D - d_0)^2}{4} \rho l_{\text{заг}} = \frac{3,14 \cdot (0,045 - 0,01)^2}{4} \cdot 7850 \cdot 1,52 = 11,47 \text{ кг.}$$

де $\rho = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ — густина матеріалу, з якого виготовлений черв'як — сталі 40ХН2МА,

d_0 — діаметр каналу для охолодження, м, який визначається з наступного співвідношення:

$$d_0 = (0,15 \dots 0,25)D = 0,23 \cdot 0,045 = 0,01 \text{ м.}$$

4. Під дією осьової сили та згинального моменту, спричинених вагою черв'яка, виникає стискаюче напруження A , яке має найбільше значення на нижніх волокнах та визначається за формулою:

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{p_{\text{ос}}}{F} + \frac{M_{\text{max}}}{W_x} = \frac{50,25}{0,00067} + \frac{52,65}{2,92 \cdot 10^{-6}} = 18,1 \text{ МПа,}$$

де F — площа небезпечного перерізу, м^2 . Розташована під завантажувальною лійкою, у тому місці де починає утворюватися виток. Саме там найбільші навантаження припадають на найменшу площу. Площа перерізу витків не враховується.

$$F = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} (1 - \alpha^2) = \frac{3,14 \cdot 0,031^2}{4} \cdot (1 - 0,32^2) = 0,00067 \text{ м}^2.$$

$$\alpha = \frac{d_0}{d_1} = \frac{0,01}{0,031} = 0,32,$$

де d_1 — діаметр осердя в завантажувальній зоні, м.

Визначимо величину максимального згинаючого моменту, який виникає під дією власної ваги черв'яка (у місці, де починається гвинтова нарізка):

$$M_{\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot q \cdot l_{\text{заг}}^2 = \frac{1}{2} \cdot 69,27 \cdot 1,52 = 52,65 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Обрахуємо осьовий момент опору:

$$W_x = \frac{\pi \cdot d_1^3 \cdot (1 - \alpha^4)}{32} = \frac{3,14 \cdot 0,031^3 (1 - 0,032^4)}{32} = 2,92 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^3.$$

Знайдемо дотичні напруження:

$$\tau = \frac{M_{кр}}{W_p} = \frac{3,549}{5,85 \cdot 10^{-6}} = 0,614 \text{ МПа.}$$

де W_p — полярний момент опору осердя, м^3 .

$$W_p = \frac{\pi d_1^3 (1 - \alpha^4)}{16} = \frac{3,14 \cdot 0,031^3 (1 - 0,032^4)}{16} = 5,85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Еквівалентне напруження за III теорією міцності:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{ст}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{(18,1 \cdot 10^6)^2 + 4 \cdot (0,614 \cdot 10^6)^2} = 18,14 \text{ МПа.}$$

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{екв}} = \frac{780 \cdot 10^6}{18 \cdot 10^6} = 43 \geq [n] = 1,4.$$

5.1.2 Розрахунок черв'яка на стійкість

У зв'язку з циклічною дією власної ваги, на черв'як діє згинальний момент. Тому виникає необхідність перевірити його на тривкість.

$$n_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{(k_\sigma)_d \cdot \sigma_a + \psi_\sigma \cdot \sigma_c} = \frac{3,52 \cdot 10^8}{3,07 \cdot 18 \cdot 10^6 + 0,5 \cdot 0} = 6,37.$$

де n_σ — коефіцієнт, який характеризує запас міцності під дією циклічного навантаження;

σ_{-1} — допустиме напруження при дії циклічного навантаження;

$$\sigma_{-1} = 0,4 \cdot \sigma_b = 0,4 \cdot 880 \cdot 10^6 = 3,52 \cdot 10^8 \text{ Па.}$$

σ_a — амплітуда зміни напружень (в даному випадку їх зміна відбувається в межах від $-\sigma_{max}$ до $+\sigma_{max}$).

σ_{max} — найбільше напруження, викликане дією згинального моменту.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_x} = \frac{52,65}{2,92 \cdot 10^{-6}} = 18 \cdot 10^6 \text{ Па;}$$

σ_c — середнє циклове напруження. У зв'язку з тим, що цикл симетричний, значення σ_c приймаємо рівним нулю.

ψ_σ — коефіцієнт, який залежить від матеріалу сталі.

$(k_\sigma)_d \sigma_a$ — ефективний коефіцієнт концентрації напружень, який визначаємо наступним чином:

$$(k_\sigma)_d = \frac{k_\sigma}{\beta \cdot \varepsilon} = \frac{2}{1 \cdot 0,65} = 3,07.$$

де k_σ — коефіцієнт концентрації напружень (в нашому випадку його значення становить 1,9 – 2,0);

β — коефіцієнт урахування якості поверхні деталі, $\beta = 1$, оскільки поверхня черв'яка полірована.

ε — коефіцієнт урахування розміру перерізу деталі.

Перевіряємо умову стійкості:

$$n_\sigma \geq [n] = 6,37 \geq 1,6,$$

отже умова стійкості виконується.

5.1.3 Розрахунок черв'яка на жорсткість

Визначимо полярний момент інерції:

$$I = \frac{\pi \cdot d_1^4}{64} \cdot (1 - \alpha^4) = \frac{3,14 \cdot 0,031^4}{64} \cdot (1 - 0,32^4) = 4,48 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Знайдемо радіус інерції:

$$i = \sqrt{\frac{I}{F}} = \sqrt{\frac{4,48 \cdot 10^{-8}}{0,00067}} = 0,0082 \text{ м.}$$

Розрахуємо ступінь жорсткості:

$$\lambda = \frac{\mu L}{i} = \frac{\mu L}{i} = \frac{2 \cdot 1,52}{0,0082} = 371$$

де μ — це коефіцієнт замурування. В даному випадку його значення приймаємо рівним 2.

Черв'як вважається не жорстким, оскільки отримане значення $\lambda > 50$. Отже необхідно перевірити його на найбільший прогин, використовуючи наступну формулу:

$$\begin{aligned}\delta_p &= \frac{1}{EI} \left[\frac{q}{k^2} \left(\frac{1}{k^2} + \frac{L^2}{2} \right) - \frac{1}{k} \left(\frac{q}{k^3} - AL \right) \cos(kL) - \frac{1}{k^2} \left(\frac{qL}{k} - A \right) \sin(kL) \right] \\ &= \frac{1}{2 * 10^{11} * 4,48 * 10^{-8}} \left[\frac{62,28}{2,37^2} \left(\frac{1}{2,37^2} + \frac{1,52^2}{2} \right) \right. \\ &\quad - \frac{1}{2,37} \left(\frac{62,27}{2,37^3} - 39,32 * 1,52 \right) \cos(2,37 * 1,52) \\ &\quad \left. - \frac{1}{2,37^2} \left(\frac{62,27 * 1,52}{2,37} - 39,32 \right) \sin(2,37 * 1,52) \right] = 0,0044 \text{ м}\end{aligned}$$

Де E – модуль пружності для сталі 40ХН2МА значення якого дорівнює $2 * 10^{11}$ Па[4]

$$\text{Де } k = \sqrt{\frac{50250}{2 * 10^{11}}} = 2,37$$

$$A = \frac{q(L - \frac{1}{k} \sin(kL))}{k \cos(kL)} = \frac{62,27 \left(1,52 - \frac{1}{2,37} \sin(2,37 * 1,52) \right)}{2,37 * \cos(2,37 * 1,52)} = 39,32 \text{ Н * м}$$

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{P_{oc}}{F} \left(1 + \frac{\delta_p F}{I} d_1 \right) + \frac{M_{max}}{W_x} = \\ &= \frac{50,25}{0,00067} * \left(1 + \frac{0,0044 * 0,00067}{4,48 * 10^{-8}} * 0,031 \right) + \frac{52,65}{2,92 * 10^{-6}} \\ &= 23,6 \text{ МПа}\end{aligned}$$

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{ст}^2 + 4\tau^2} = \sqrt{(23,6 * 10^6)^2 + 4 * (0,614 * 10^6)^2} = 23,6 \text{ МПа}$$

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{екв}} = \frac{780 - 10^6}{23,6 * 10^6} \geq 1,6 = 33 \geq 1,6$$

Отже умова жорсткості виконується.

5.1.4 Розрахунок коефіцієнта геометричної форми головки

Канал екструзійної головки для виробництва полімерної плівки розділяється послідовні ділянки, які мають просту геометрію. Для кожної ділянки розраховується коефіцієнт геометричної форми K_1 , м³, чи мм³. Потім визначається сумарне значення для всієї головки.

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

Розміри ділянок головки розраховуємо за наступними формулами, заокруглюючи отримані значення до найближчого цілого числа:

$$d_1 = D_{\text{ч}} \cdot 1,1 = 50 \text{ мм};$$

$$d_2 = d_{\text{ч}} \cdot 1,2 = 60 \text{ мм};$$

$$D = d_1 \cdot 1,3 = 65 \text{ мм};$$

$$l_1 = \frac{L_{\text{ч}}}{D_{\text{ч}}} \cdot 9 = 30 \cdot 9 = 270;$$

$$l_2 = \frac{L_{\text{ч}}}{D_{\text{ч}}} \cdot 1,4 = 30 \cdot 1,4 = 42;$$

$$l_3 = \frac{L_{\text{ч}}}{D_{\text{ч}}} \cdot 2,5 = 30 \cdot 2,5 = 75;$$

$$l_4 = \frac{L_{\text{ч}}}{D_{\text{ч}}} \cdot 0,8 = 30 \cdot 0,8 = 24;$$

$$l_5 = \frac{L_{\text{ч}}}{D_{\text{ч}}} \cdot 1,5 = 30 \cdot 1,5 = 45;$$

Розрахункова схема екструзійної головки зображена на рисунку 5.3

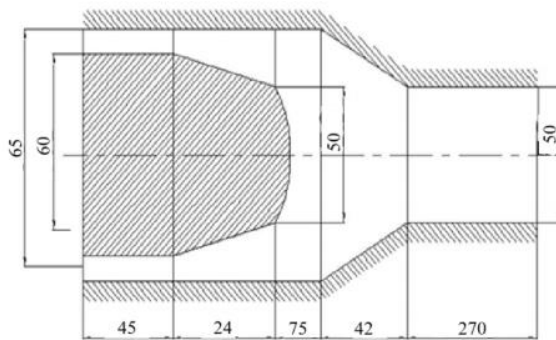


Рисунок 5.3 — Розрахункова схема екструзійної головки

Перша ділянка з довжиною l_1 має циліндричну форму (рис 5.4).

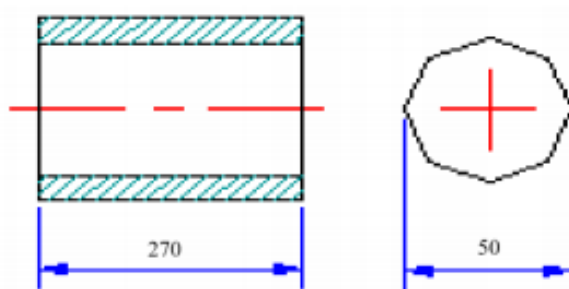


Рисунок 5.4 — Схема першої ділянки.

$$K_1 = \frac{\pi d_1^4}{128 l_1} = \frac{3,14 \cdot 50^4}{128 \cdot 270} = 567,8 \text{ мм}^3.$$

Друга ділянка, схема зображена на рис. 5.5

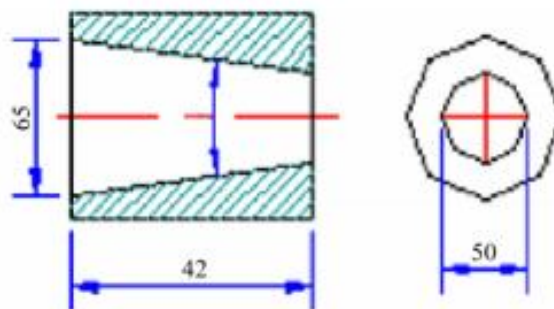


Рисунок 5.5 — Схема другої ділянки.

$$K_2 = \frac{3 \cdot \pi \cdot D^3 \cdot d_1^3}{128 \cdot l_2 (D^2 + D \cdot d_1 + d_1^2)} = \frac{3 \cdot 3,14 \cdot 65^3 \cdot 50^3}{128 \cdot 42 \cdot (65^2 + 65 \cdot 50 + 50^2)} = 6030,1 \text{ мм}^3.$$

Третя ділянка, схема зображена на рис. 5.6

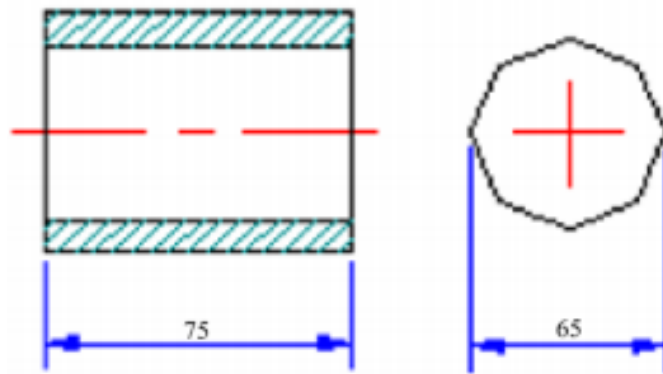


Рисунок 5.6 — Схема третьої ділянки.

$$K_3 = \frac{\pi D^4}{128 l_3} = \frac{3,14 \cdot 65^4}{128 \cdot 75} = 5838,6 \text{ мм}^3.$$

Четверта ділянка, рис. 5.7

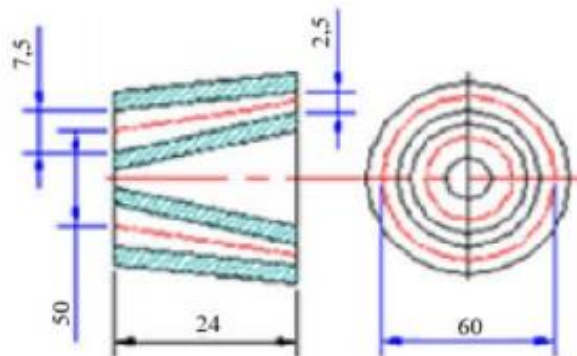


Рисунок 5.7 — Схема четвертої ділянки.

$$K_4 = \frac{\pi \cdot (R_1 \cdot \delta_2 - R_2 \cdot \delta_1)}{6 \cdot l_4 \cdot \omega} = \frac{3,14 \cdot (28,75 \cdot 2,5 - 31,25 \cdot 7,5)}{6 \cdot 24 \cdot (-0,075)} = 47,2 \text{ мм}^3.$$

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{2,3 \cdot (R_1 - R_2)^2}{(R_1 \cdot \delta_2 - R_2 \cdot \delta_1)^2} \cdot \lg \cdot \frac{R_1 \cdot \delta_2}{R_2 \cdot \delta_1} - \frac{(R_1 - R_2) \cdot (\delta_1 - \delta_2)}{(R_1 \cdot \delta_2 - R_2 \cdot \delta_1) \cdot \delta_1 \cdot \delta_2} - \\ &\quad - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 \cdot \delta_1^2 \cdot \delta_2^2} = \frac{2,3 \cdot (28,75 - 31,25)^2}{(28,75 \cdot 2,5 - 31,25 \cdot 7,5)^2} \lg \frac{28,75 \cdot 2,5}{31,25 \cdot 7,5} - \\ &\quad - \frac{(28,75 - 31,25) \cdot (7,5 - 2,5)}{(28,75 \cdot 2,5 - 31,25 \cdot 7,5) \cdot 7,5 \cdot 2,5} - \frac{7,5^2 - 2,5^2}{2 \cdot 7,5^2 \cdot 2,5^2} = -0,075 \text{ мм}^{-2}. \end{aligned}$$

$$\delta_1 = \frac{D - d_1}{2} = \frac{65 - 50}{2} = 7,5 \text{ мм.}$$

$$\delta_1 = \frac{D - d_2}{2} = \frac{65 - 60}{2} = 2,5 \text{ мм.}$$

$$R_1 = \frac{d_1}{2} + \frac{\delta_1}{2} = \frac{50}{2} + \frac{7,5}{2} = 28,75 \text{ мм.}$$

$$R_2 = \frac{d_2}{2} + \frac{\delta_2}{2} = \frac{60}{2} + \frac{2,5}{2} = 31,25 \text{ мм.}$$

П'ята ділянка, рис 5.8

$$K_5 = \frac{\pi \cdot (R_2 + R_1) \cdot (R_2 - R_1)^3}{12 \cdot l_5} = \frac{3,14 \cdot (+) \cdot (-)^3}{12 \cdot} = 5,6 \text{ мм}^3.$$

де

$$R_1 = \frac{d_2}{2} = \frac{60}{2} = 30 \text{ мм.}$$

$$R_2 = \frac{D}{2} = \frac{65}{2} = 32,5 \text{ мм.}$$

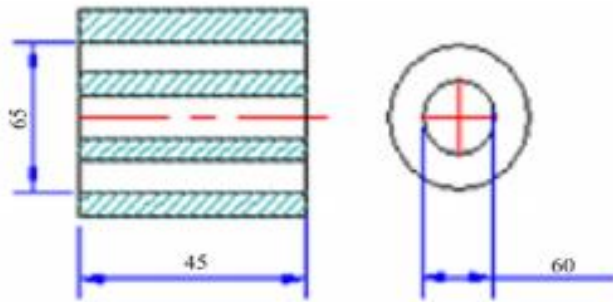


Рисунок 5.8 — Схема четвертої ділянки

Розрахувавши значення коефіцієнта K для кожної ділянки головки екструдера, знайдемо сумарне значення $K_{\text{заг}}$:

$$K_{\text{заг}} = \frac{1}{\frac{1}{567,8} + \frac{1}{6030,1} + \frac{1}{5838,6} + \frac{1}{47,2} + \frac{1}{5,6}} = 4,95 \text{ мм}^3.$$

5.2 3D-моделювання екструзійної базової та модернізованої головки в системі CATIA

Розпочинаємо проєктувати 3D-модель внутрішньої частини екструзійної головки в системі «CATIA» [9]. Перед початком хочеться відзначити те, що моделювання даної деталі буде спрощене відносно креслення, у зв'язку з тим, що якщо моделювати всі різьби, то будуть виникати концентратори напружень, які будуть заважати при отриманні результатів розрахунків. Початок моделювання починаємо з створення деталі де створюємо новий ескіз та обертаємо наш ескіз (Рис. 5.2.1, 5.2.2)

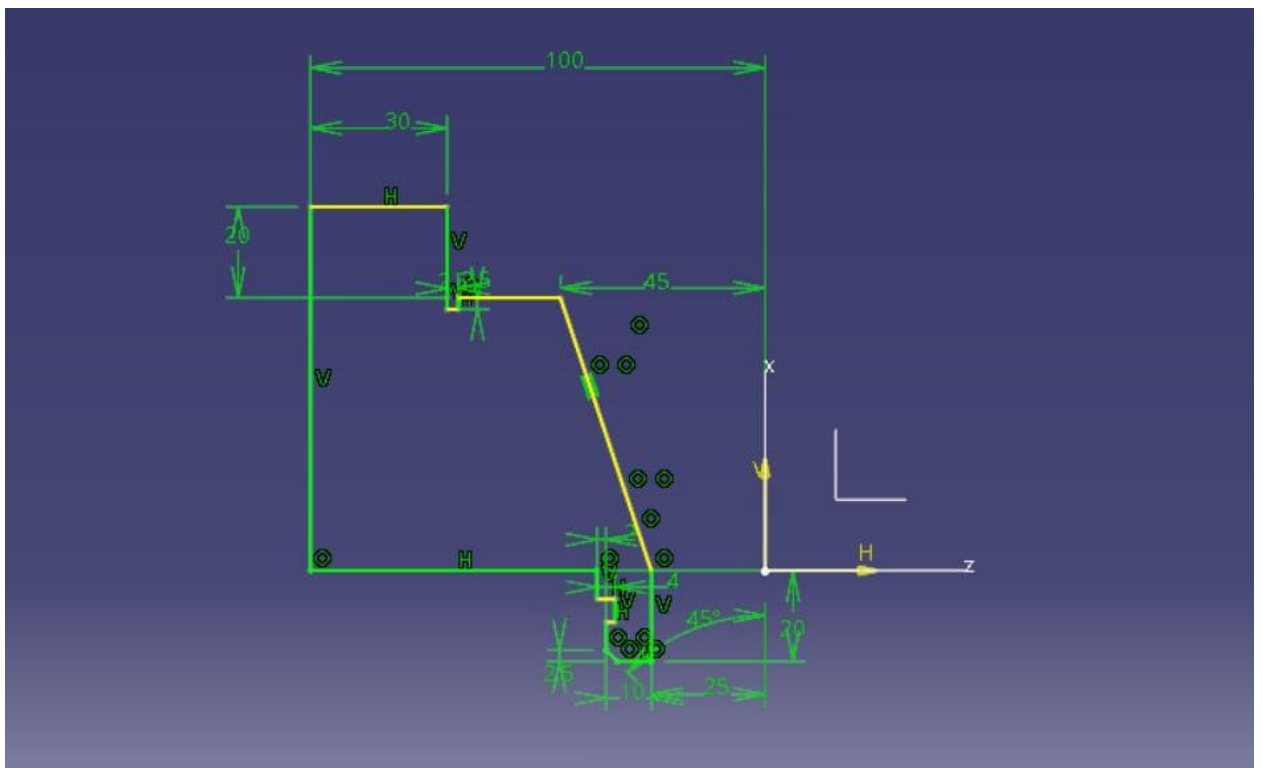


Рисунок 5.2.2 – Ескіз деталі фігури для обертання

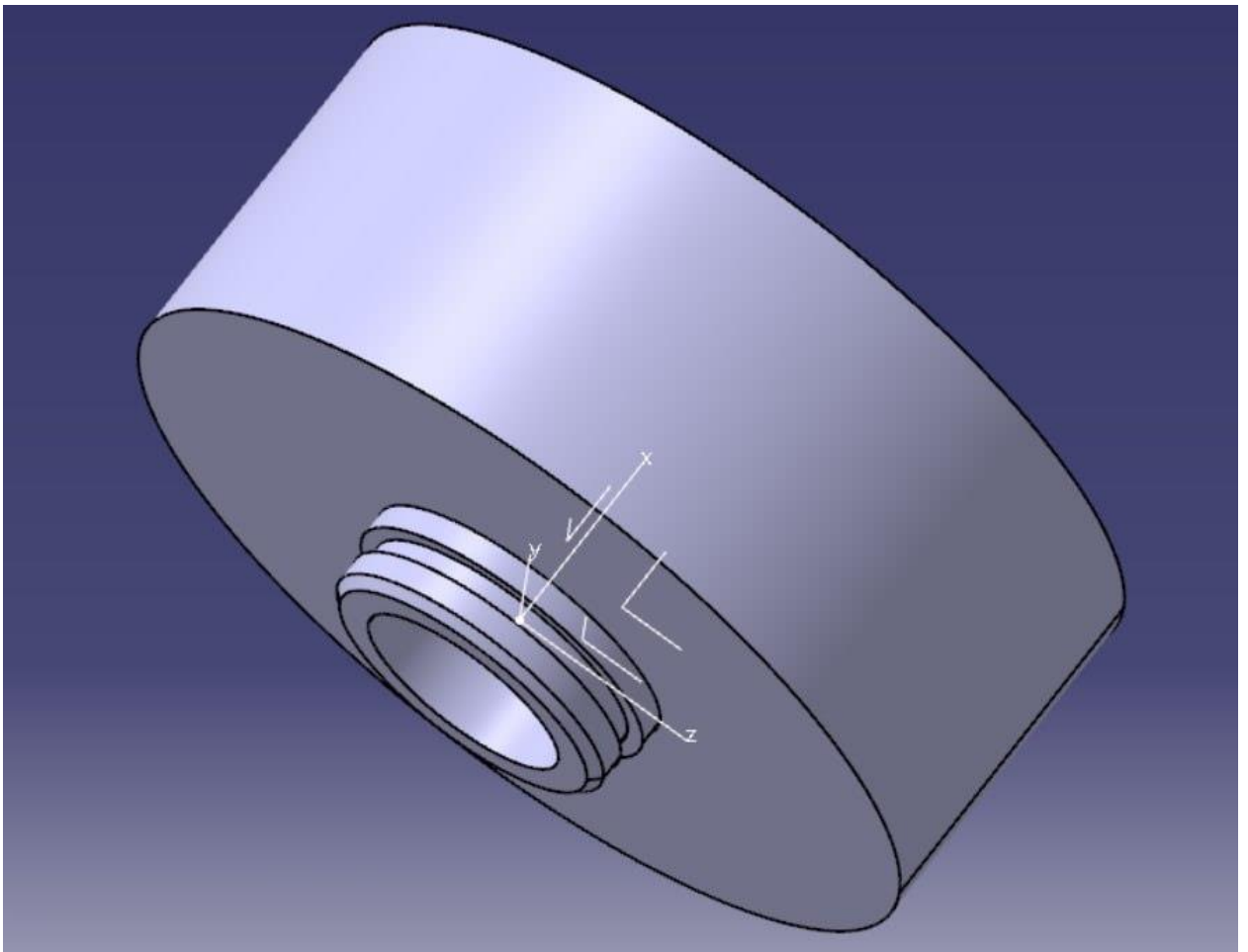


Рисунок 5.2.2 – Обертання навколо осі x

Далі Функцією вирізання створюємо різьбу (рис. 5.2.3).

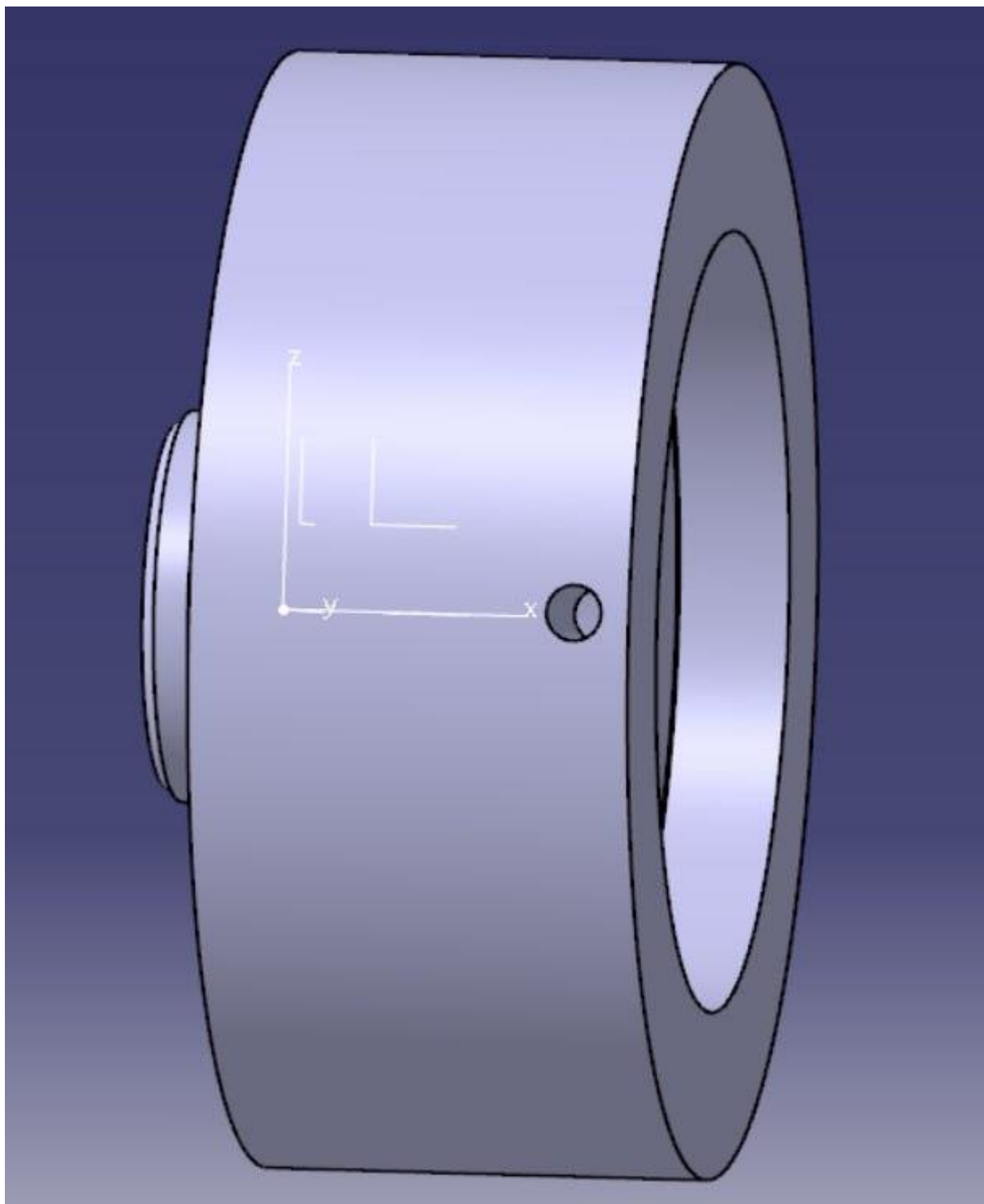


Рисунок 5.2.3 – різьба деталі

Повторюємо вирізу круговим масивом (рис. 5.2.4).

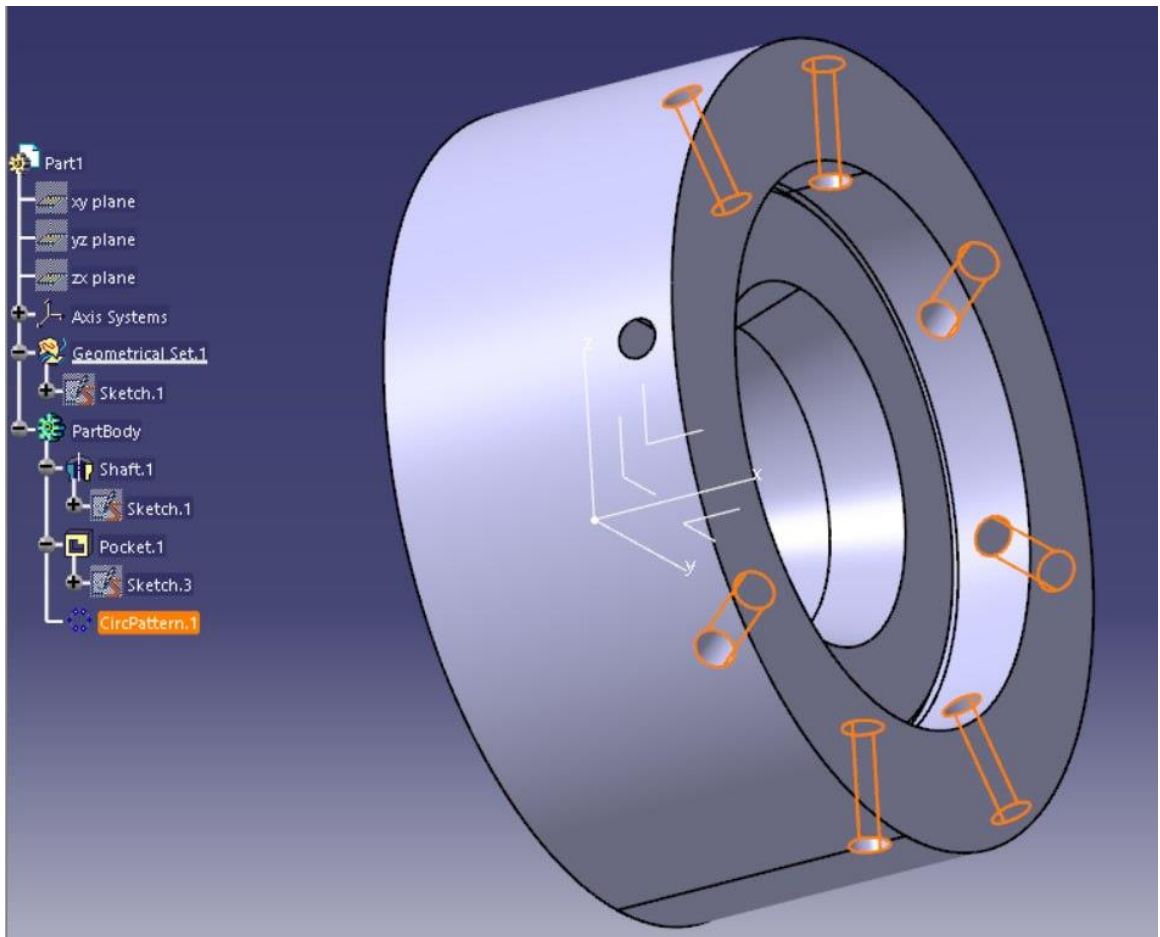


Рисунок 5.2.4 – Операція вирізу

за основу беремо звичайне креслення та дещо змінюємо (рис.5.2.5)

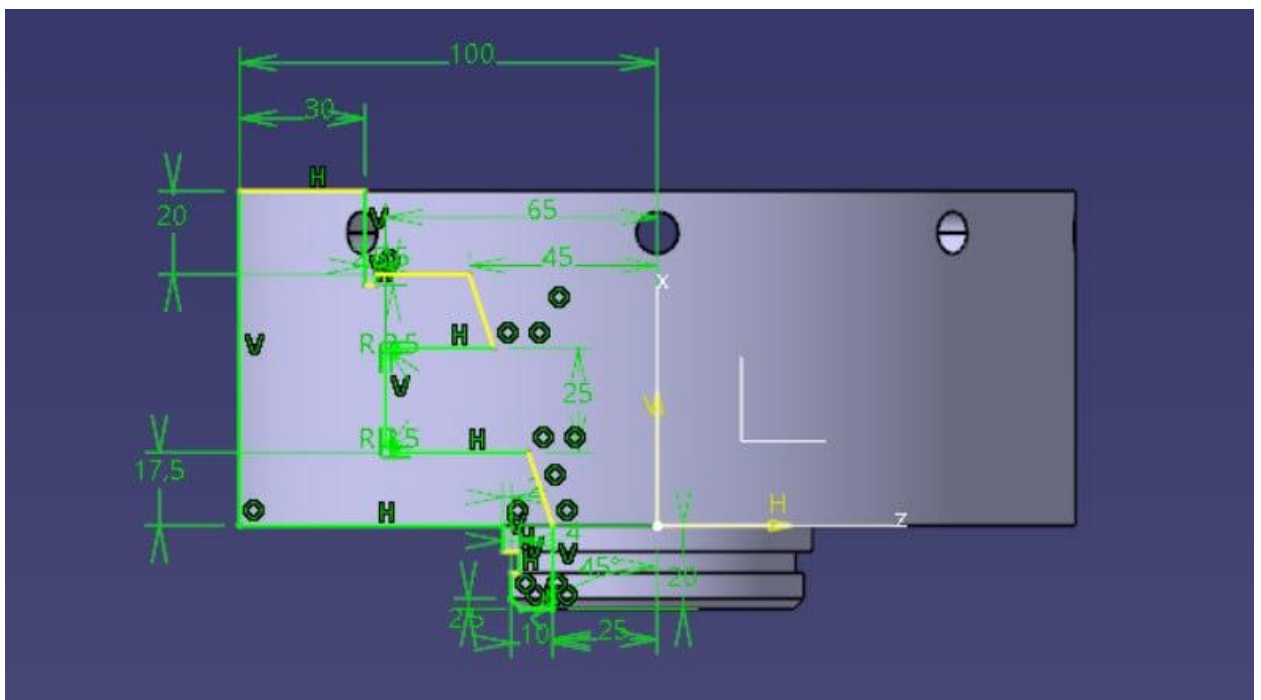


Рисунок. 5.2.5 Редагування креслення фігури обертання.

Числове моделювання базової та модернізованої екструзійної ГОЛОВКИ

Для виконання необхідних розрахунків нашої 3D-моделі базової деталі використовуємо програмне забезпечення ANSYS 2024 R2 STUDENT [10].

Для початку нам потрібно обрати необхідні модулі. В нашому випадку це будуть Steady-State Thermal та Static Structural (Рис 5.2.6).



Рисунок 5.2.6 – Середовище виконання розрахунків

Також потрібно перед початком задати характеристики матеріалу конструкції (рис.5.2.7), даний вузол виготовлений зі сталі 40Х ДСТУ 7806:2015. Вписуємо значення межі текучості $\sigma_t = 785$ МПа в колонки Tensile Yield Strength та Compressive Yield Strength, які є собою як межі текучості при розтягу та стиску. Проводимо такі ж дії тільки з межею міцності $\sigma_b = 980$ МПа в Tensile Ultimate Strength та Compressive Ultimate Strength.

Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			Description
3	Structural Steel		General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	D E
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
8	Young's Modulus	2E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
12	Strain-Life Parameters			
20	S-N Curve	Tabular		
24	Tensile Yield Strength	785	MPa	
25	Compressive Yield Strength	785	MPa	
26	Tensile Ultimate Strength	980	MPa	
27	Compressive Ultimate Strength	980	MPa	
28	Isotropic Thermal Conductivity	60,5	W m ⁻¹ C ⁻¹	

Рисунок 5.2.7 – Середовище задання характеристик матеріалу конструкції

Переходимо в пункт «Geometry», далі ми імпортуємо створену нами раніше 3D-модель, потім за допомогою команди «Sketch» створюємо ескіз, а потім ми розрізаємо нашу деталь через команду «Extrude» для зручності подальших розрахунків (рис. 5.2.8).

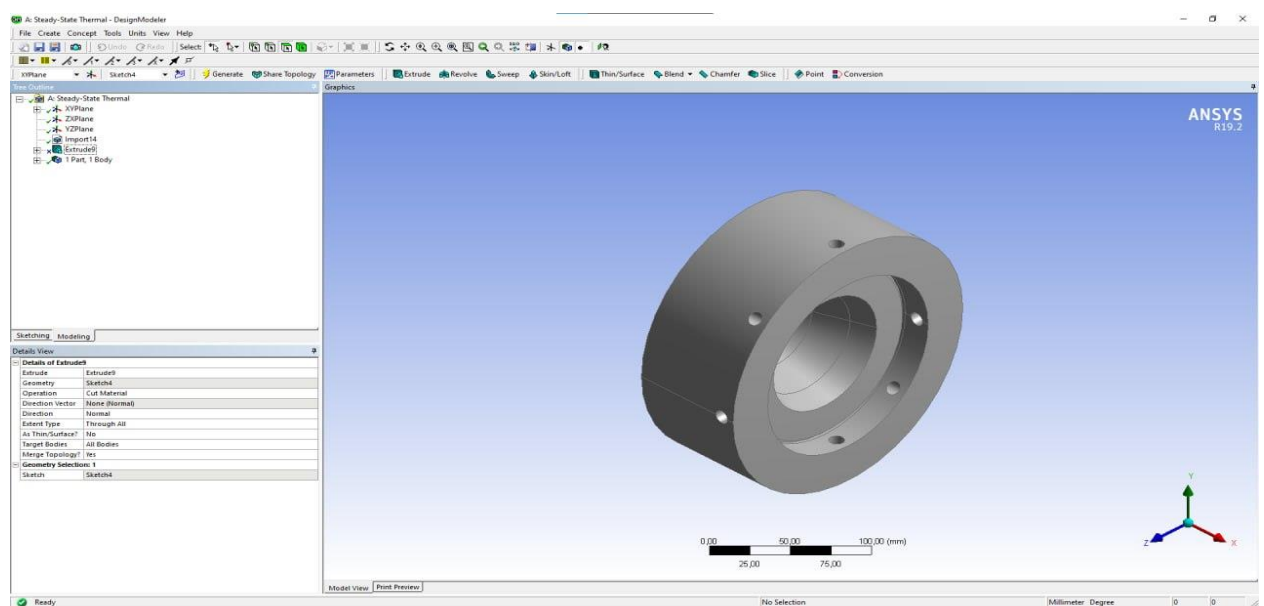


Рисунок 5.2.8 – Середовище створення геометрії, імпортована модель

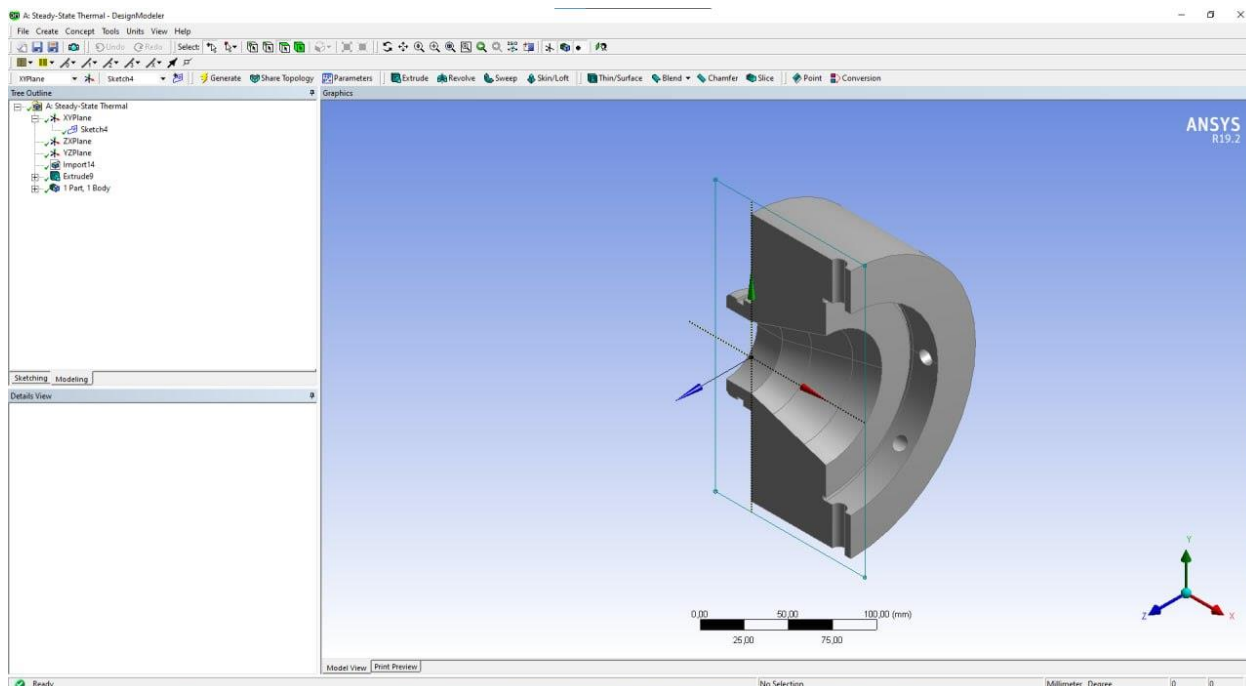


Рисунок 5.2.9 – Виконання розрізу деталі та середовище створення геометрії

Після цього об'єднуємо всі деталі в одне ціле, та йдемо в пункт «Model» для встановлення сітки розміром 3 мм, яка є найоптимальнішою для даної моделі, перевагою якої є висока швидкість рахування конструкції, та саме основне – це те, що після цього значення сітки і дрібніше – значення результатів суттєво не змінюються.

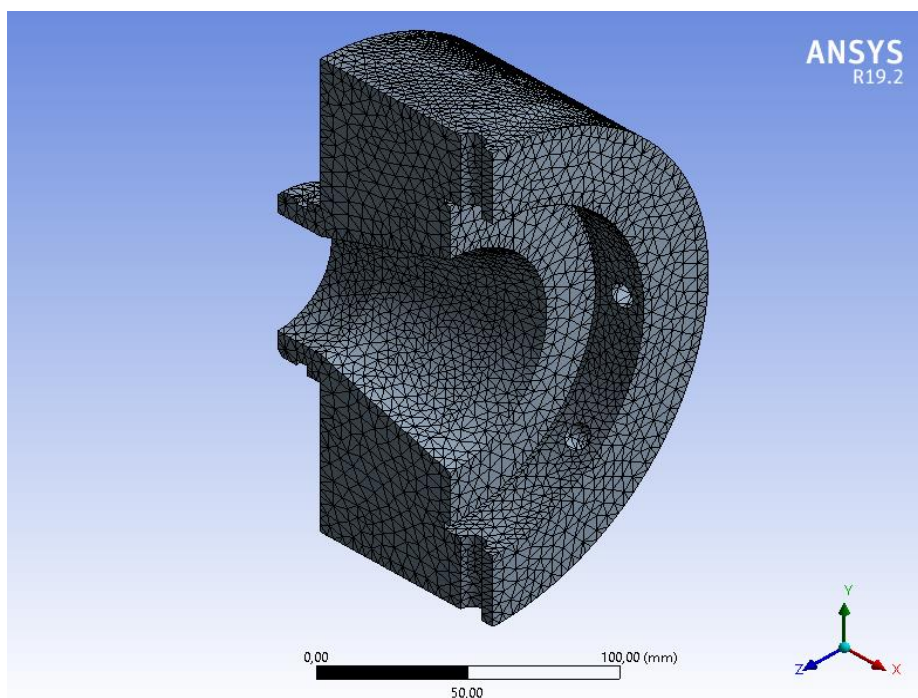


Рисунок 5.2.10 – Сітка скінченних елементів

Ділянка А – 190 °С (Температура розплаву)

Ділянка В – 180 °С (Температура розплаву з припущенням втрати температури)

Ділянка С – 185 °С (Температура розплаву з припущенням втрати температури)

Ділянка D – 175 °С (Температура розплаву з припущенням втрати температури)

A: Steady-State Thermal

Steady-State Thermal

Time: 1, s

16.06.2026 16:45

- A** Temperature: 190, °C
- B** Temperature 3: 180, °C
- C** Temperature 2: 185, °C
- D** Temperature 4: 175, °C

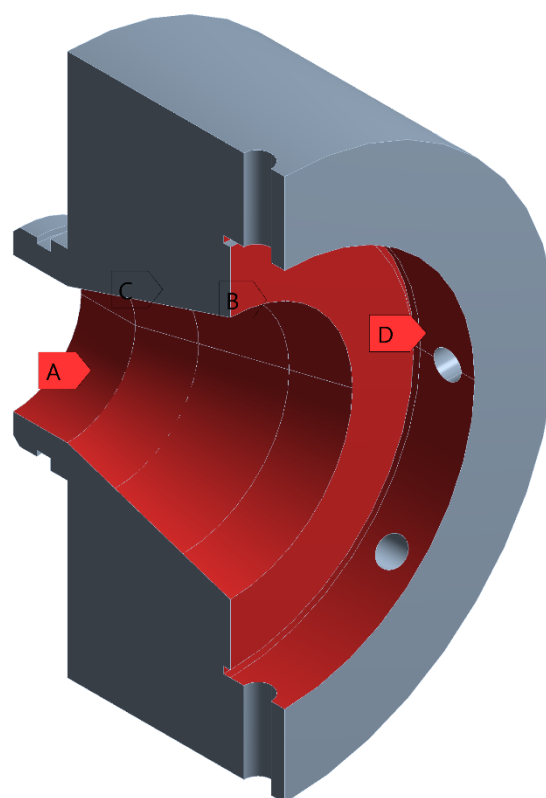


Рисунок 5.2.11 – Накладення температур

Накладення температур зроблено, тепер переходимо до наступного пункту

задаємо закріплення та тиск

Ділянка А Фіксація по осі Z

Ділянка В Фіксація по осям Y та X

Ділянка С – Вказання тиску рівному 30 МПа;

B: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

16.06.2026 16:48

- A** Displacement
- B** Displacement 2
- C** Pressure: 30, MPa

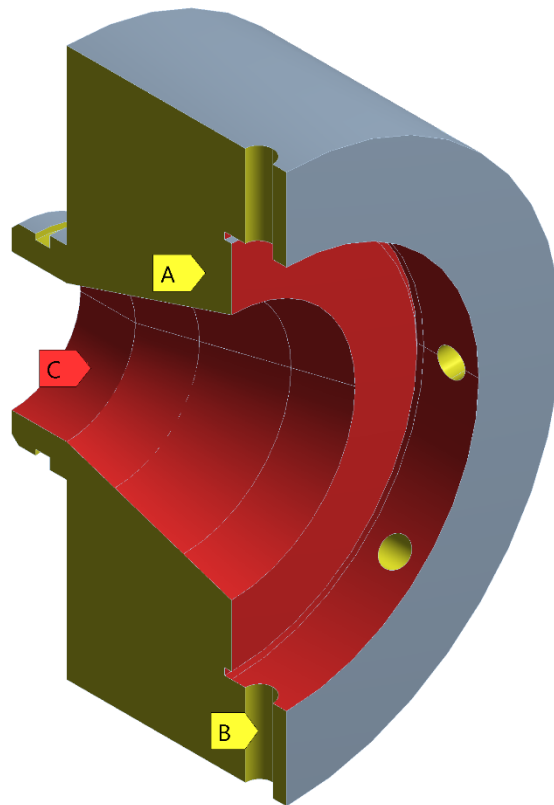


Рисунок 5.2.12 – Накладення закріплень та тиску

Тепер переходимо до модернізованої частини (рис. 5.2.13)

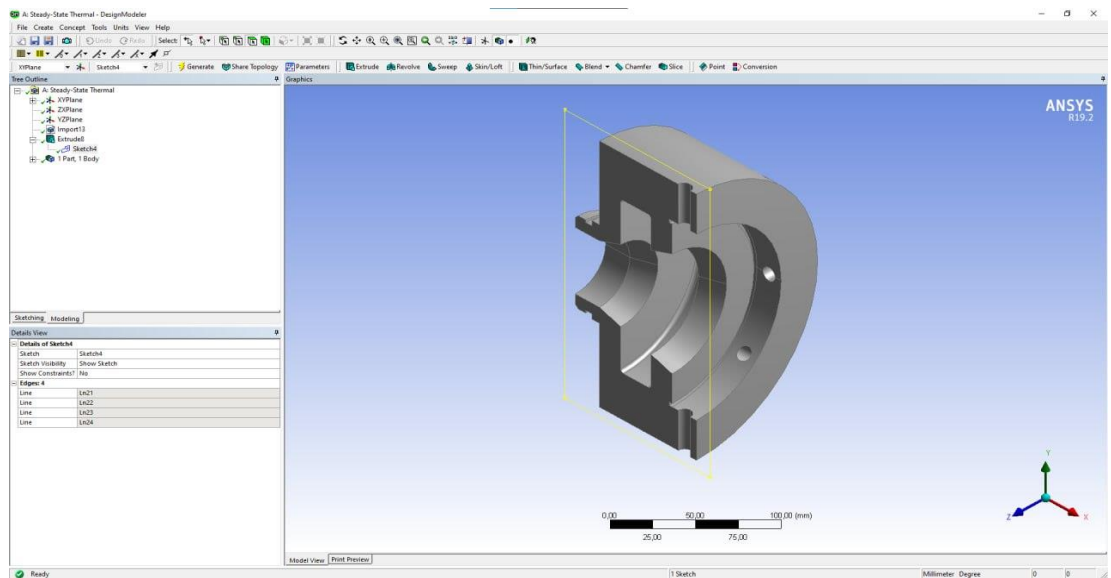


Рисунок.5.2.13 повторюємо виконання розрізу деталі та середовище створення геометрії

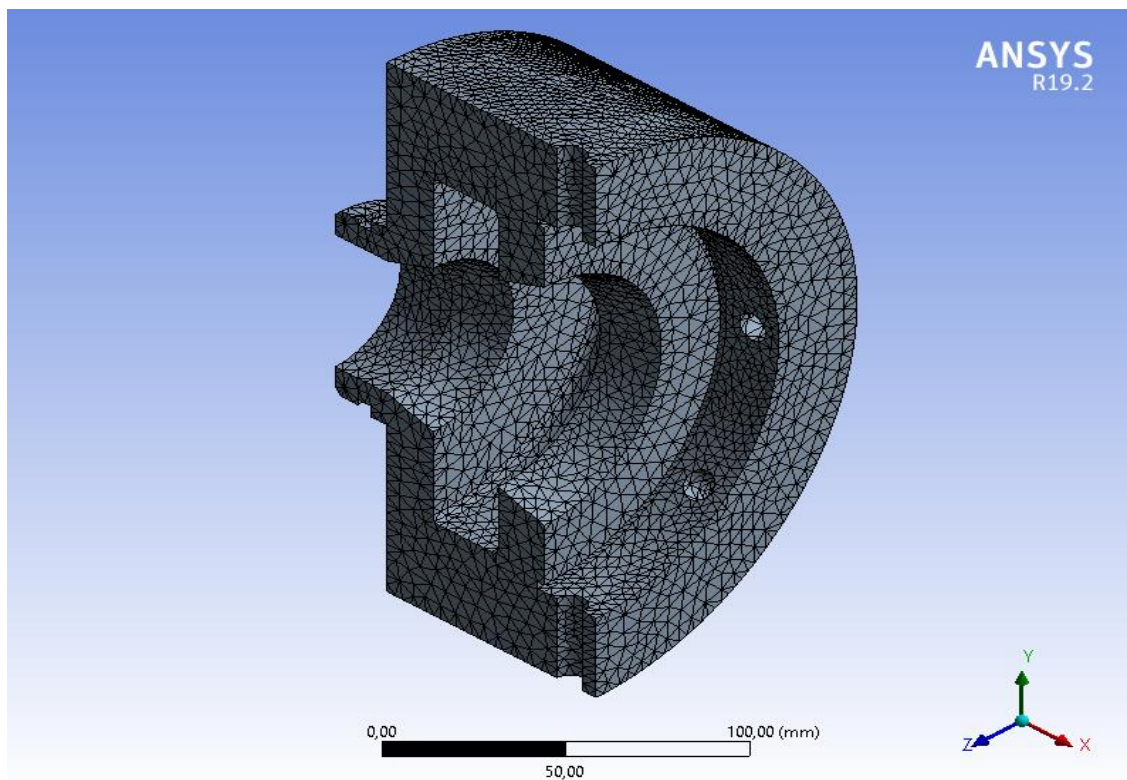


Рисунок 5.2.14 Сітка скінченних елементів модернізації

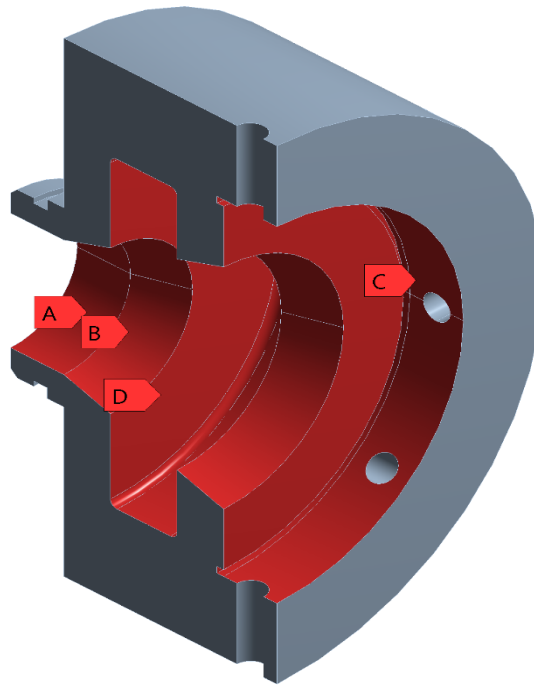
A: Steady-State Thermal

Steady-State Thermal

Time: 1, s

16.06.2026 16:19

- A** Temperature: 190, °C
- B** Temperature 2: 185, °C
- C** Temperature 4: 175, °C
- D** Temperature 3: 180, °C



0,00 25,00 50,00 75,00 100,00 (mm)

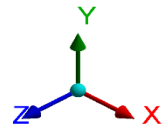


Рисунок 5.2.15 Накладення температур модернізації

Ділянка А – 190 °C (Температура розплаву)

Ділянка В – 185 °C (Температура розплаву з припущенням втрати температури)

Ділянка С – 175 °C (Температура розплаву з припущенням втрати температури)

Ділянка D – 180 °C (Температура розплаву з припущенням втрати температури)

Ділянка А Фіксація по осі Z

Ділянка В Фіксація по осям Y та X

Ділянка С – Вказання тиску рівному 30 МПа;

B: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

16.06.2026 16:20

- A** Displacement
- B** Displacement 2
- C** Pressure: 30, MPa

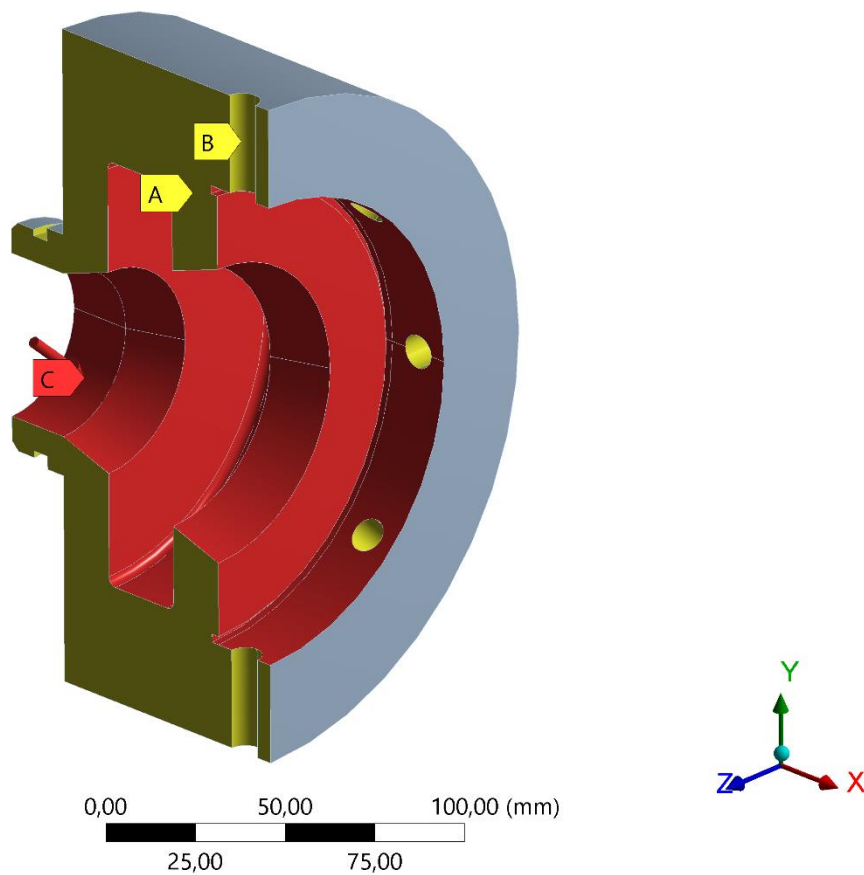


Рисунок 5.2.16 Накладення закріплень та тиску

5.3 Результати чисельних розрахунків базової та модернізованої екструзійної головки в програмному середовищі ANSYS

Отримуємо результат розподілу температур

A: Steady-State Thermal

Temperature

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1

16.06.2026 16:46

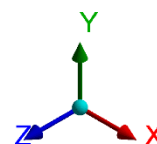
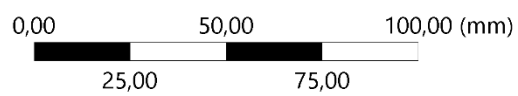
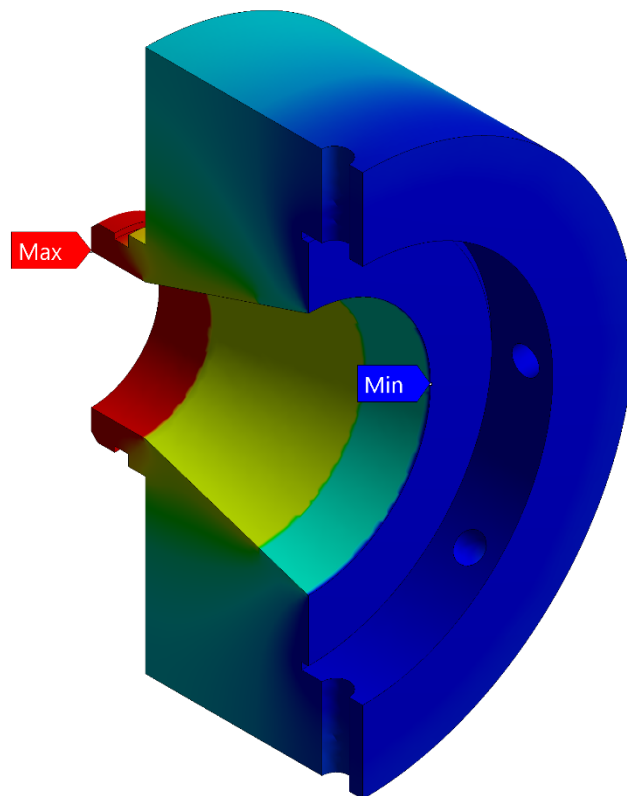
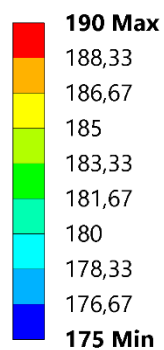


Рисунок 5.3.1 Розподіл температур

B: Static Structural

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1

16.06.2026 16:49

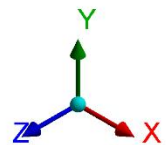
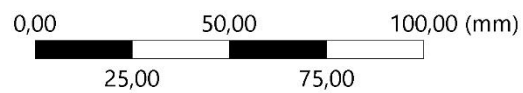
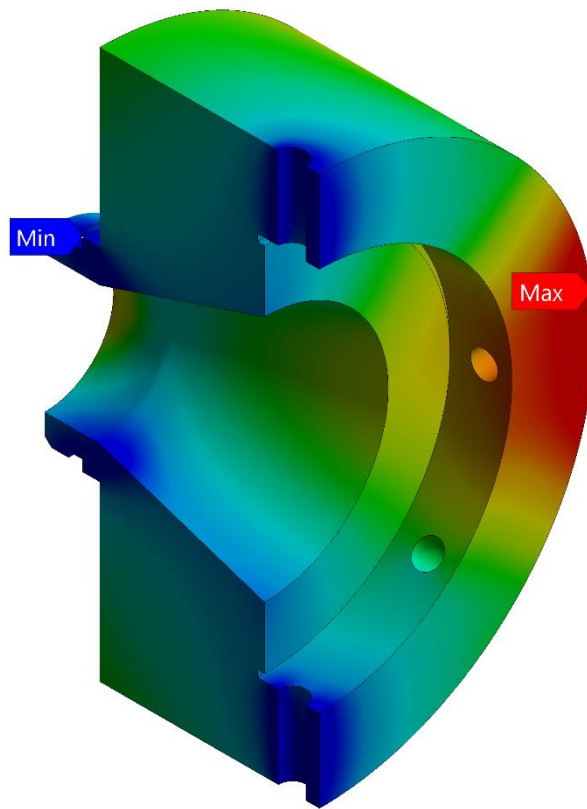
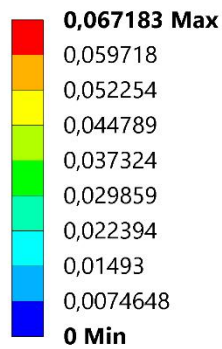


Рисунок 5.3.2 – Загальні переміщення

Максимальні переміщення отримані $s = 0,067183$ мм, що говорить про те, що конструкція незначно деформується, основною деталлю які переміщуються є край матриці.

Отримуємо еквівалентні напруження за Мізесом

B: Static Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1

16.06.2026 16:50

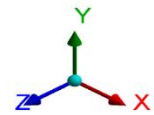
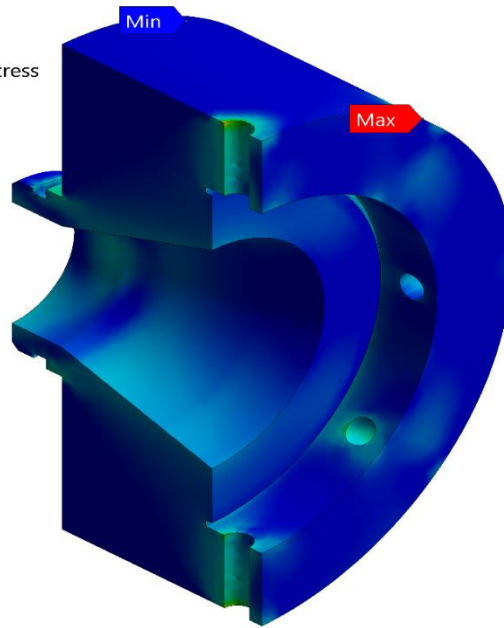
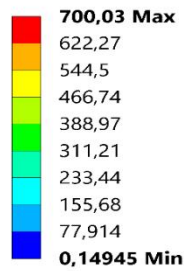


Рисунок 5.3.3 – Еквівалентні напруження конструкції

Максимальні еквівалентні напруження отримані $\sigma_{\text{екв}} = 700,03$ МПа.

Основними концентраціями напружень є ребра фіксації екструзійної головки і поверхні отворів під крипильні гвинти.

B: Static Structural

Safety Factor

Type: Safety Factor

Time: 1

16.06.2026 16:50

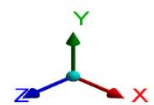
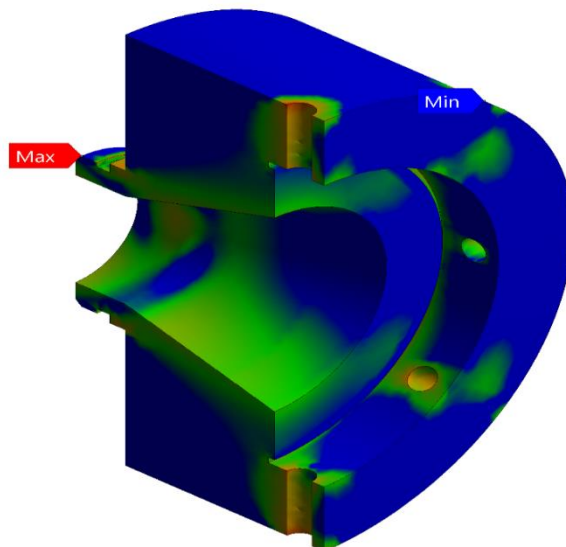
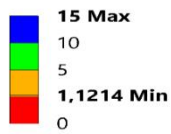


Рисунок 5.3.4– Запас міцності конструкції

При цьому найбільші еквівалентні напруження за Мізесом $\sigma_{\text{екв}} = 700,03$ МПа, а найбільші деформації $s = 0,067183$ мм. Коефіцієнт запасу міцності конструкції

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\text{екв}}} = \frac{785}{700,03} = 2,6588,$$

а значить, напруження конструкції менше допустимих і конструкція екструзійної головки є працездатною.

Повторюємо процес з модернізацією

A: Steady-State Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1
16.06.2026 16:03

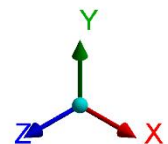
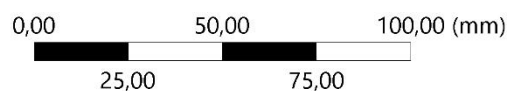
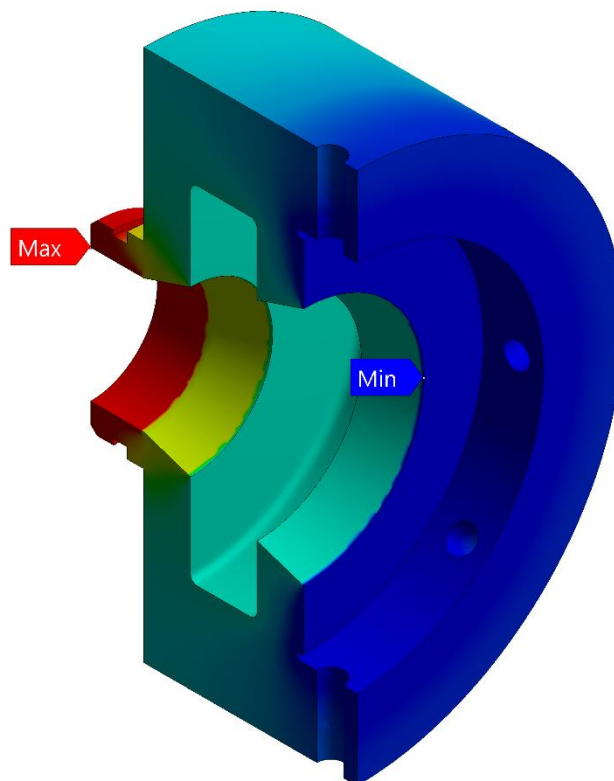
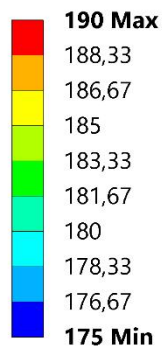


Рисунок 5.3.5 Розподіл температур

B: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 16.06.2026 16:20

0,070624 Max
 0,062777
 0,05493
 0,047083
 0,039236
 0,031389
 0,023541
 0,015694
 0,0078472
0 Min

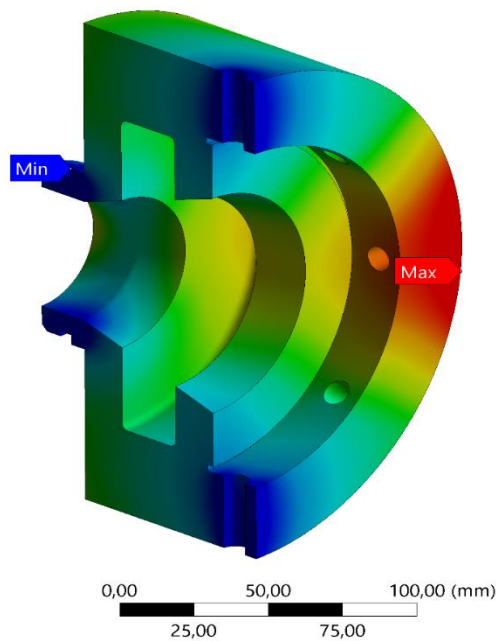


Рисунок 5.3.6 – Загальні переміщення

Максимальні переміщення отримані $s = 0,070624$ мм

Отримуємо еквівалентні напруження за Мізесом

B: Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 16.06.2026 16:20

702,23 Max
 624,37
 546,5
 468,63
 390,76
 312,89
 235,02
 157,15
 79,282
1,4134 Min

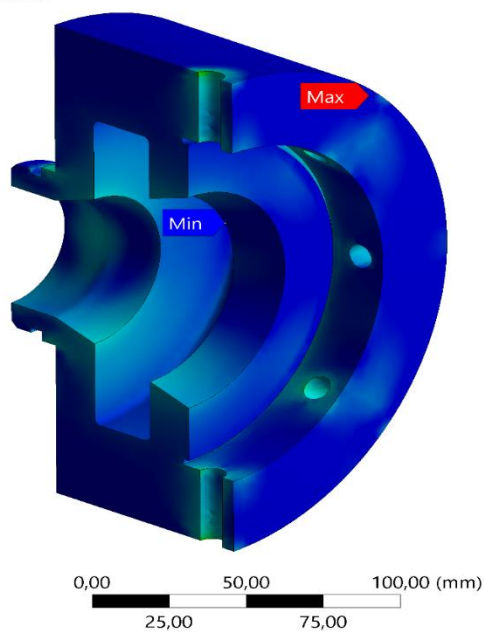


Рисунок 5.3.7 – Еквівалентні напруження конструкції

Максимальні еквівалентні напруження отримані $\sigma_{екв} = 702,23$ МПа.

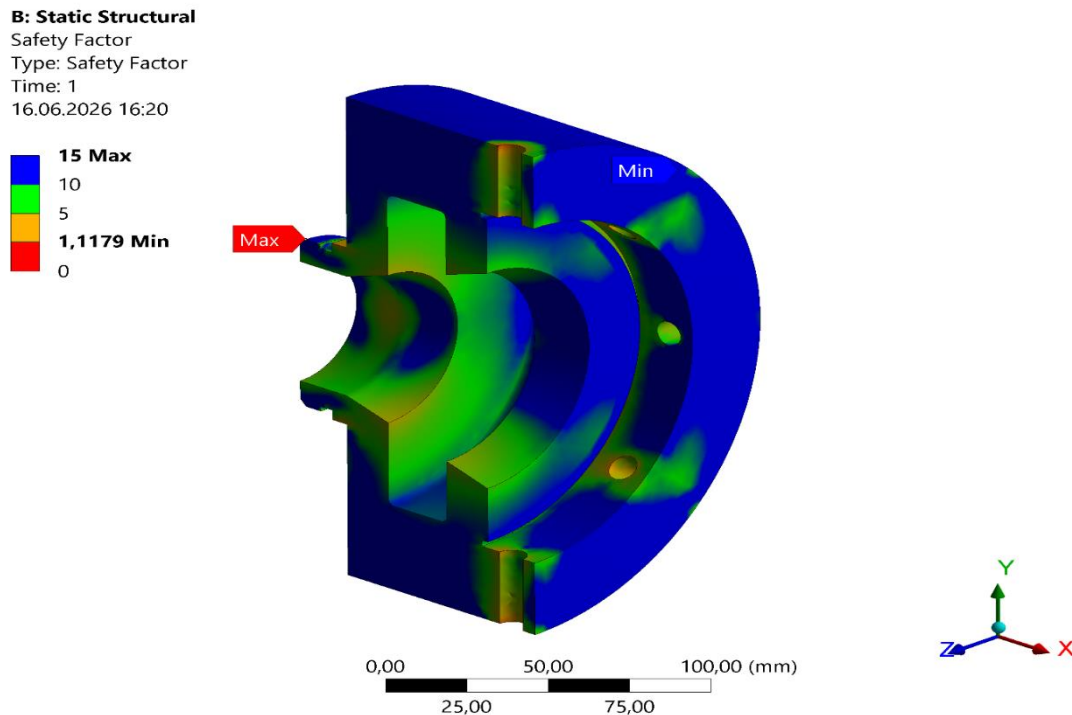


Рисунок 5.3.8 – Запас міцності конструкції

При цьому найбільші еквівалентні напруження за Мізесом $\sigma_{екв} = 702,23$ МПа, а найбільші деформації $s = 0,070624$ мм. Коефіцієнт запасу міцності конструкції

$$n = \frac{\sigma_t}{\sigma_{екв}} = \frac{785}{702,23} = 1,117$$

Похибка у еквівалентному напруженні та деформації не є сильною і не впливає на деталь тому є працездатною.

Порівняння результатів розрахунків у середовищі ANSYS показало, що модернізована конструкція головки екструдера забезпечує більш рівномірний розподіл напружень та менші значення максимальних деформацій порівняно з базовою конструкцією. Отримані результати підтверджують підвищення жорсткості та міцності модернізованої головки, що свідчить про доцільність впровадження запропонованої модернізації.

5.4 Виконання розрахунку черв'яка на міцність за допомогою мови програмування C++

Сучасні програмні засоби є важливою складовою інженерних розрахунків, оскільки дозволяють значно підвищити точність та швидкість виконання обчислень. Використання мов програмування високого рівня дає можливість автоматизувати розрахункові процедури, зменшити вплив людського фактора та забезпечити оперативну перевірку отриманих результатів.

Для виконання розрахунку черв'яка екструдера на міцність була розроблена програма мовою програмування C++. Програма реалізує алгоритм визначення основних геометричних параметрів черв'яка, а також розрахунок навантажень, що діють на нього під час роботи екструдера. На основі отриманих результатів здійснюється перевірка міцності конструкції.

Метою розрахунку є визначення геометричних параметрів черв'яка, крутного моменту, осьового зусилля, маси та розподіленого навантаження від власної ваги, необхідних для подальшої перевірки міцності та працездатності робочого органу екструдера.

Для проведення розрахунку використано технічні характеристики екструдера РН-45, наведені у попередніх розділах пояснювальної записки. Вихідні дані для програми наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для черв'яка екструдера РН-45 для розрахунку черв'яка на міцність за допомогою мови програмування C++

Діаметр черв'яка	D	45	мм
Потужність приводу	N	37	кВт
Частота обертання	n	99,6	об/хв
Густина матеріалу	ρ	7850	кг/м ³
Границя текучості сталі 40ХН2МА	σ_T	780	МПа
Ступінь стиску	i _{ст}	2,1	
Коефіцієнт довжини L/D	L/D	30	

Лістинг програми та результати розрахунку представлені у Додатку В.

Після виконання розрахунку черв'яка екструдера РН-45 за допомогою розробленої програми мовою програмування C++ було отримано основні геометричні та силові параметри робочого органу. Результати розрахунку підтвердили, що значення крутного моменту, осьового зусилля та навантажень відповідають умовам експлуатації екструдера, а отриманий запас міцності є достатнім для надійної та безпечної роботи конструкції.

Отримані результати збігаються з аналітичними розрахунками, що підтверджує правильність реалізованого алгоритму та доцільність використання мови програмування C++ для автоматизації інженерних розрахунків черв'яків екструзійних машин.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

У дипломному проєкті на тему «Лінія для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера» особлива увага приділяється забезпеченню безпечних умов праці під час експлуатації технологічного обладнання та організації виробничого процесу.

Під час експлуатації лінії необхідно забезпечити безпечні умови праці відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», Кодексу цивільного захисту України, а також чинних нормативно-правових актів у сфері промислової безпеки та виробничої санітарії.

Основними нормативними документами, що регламентують безпечну експлуатацію обладнання, є НПАОП 25.0-1.04-13 «Правила охорони праці на підприємствах з виробництва пластмасових виробів», НПАОП 25.0-1.01-12 «Правила охорони праці на об'єктах з переробки пластичних мас» та ДСТУ EN 1114-3:2020 «Машини для перероблення гуми та пластмаси. Екструдери та екструзійні лінії. Вимоги щодо безпеки».

Основною метою організації охорони праці є попередження виробничого травматизму, професійних захворювань та аварійних ситуацій.

Виробнича лінія включає екструдер, систему подачі сировини, модернізовану формуючу головку, башту формування плівкової бульбашки, стабілізаційні ролики та намотувальні механізми. Робота обладнання супроводжується дією підвищених температур, електричного струму, шуму, рухомих механізмів та можливим виділенням шкідливих речовин під час переробки полімерів.

6.1 Шум і вібрації та методи боротьби з ними

Під час роботи лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера виникають шум і вібрації, джерелами яких є електродвигуни, редуктори, вентилятори систем охолодження, приводи

роликів та намотувальні механізми. Тривалий вплив підвищеного рівня шуму може негативно впливати на працездатність працівників, викликати втому та знижувати концентрацію уваги.

Вимоги до допустимих рівнів шуму встановлені ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку», а вимоги щодо вібрації – ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації».

Для зниження рівня шуму необхідно забезпечувати своєчасне технічне обслуговування обладнання, балансування обертових деталей, змащування рухомих вузлів та надійне кріплення механізмів. За потреби можуть застосовуватися шумопоглинальні матеріали та захисні кожухи.

Зменшення вібрації досягається встановленням обладнання на віброгасні опори, використанням еластичних прокладок та підтриманням справного технічного стану механізмів. У випадках перевищення допустимих рівнів шуму працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту органів слуху. Для захисту від виробничого шуму можуть застосовуватися протишумові навушники типу **3M PELTOR Optime I, 3M PELTOR Optime II, Uvex K2, Delta Plus Interlagos** або інші сертифіковані засоби захисту з відповідним рівнем шумопоглинання

Застосування зазначених заходів дозволяє підтримувати рівні шуму та вібрації в межах нормативних значень і створювати безпечні умови праці для обслуговуючого персоналу

6.2 Електробезпека

У дипломному проєкті значна увага приділяється забезпеченню електробезпеки, оскільки технологічне обладнання працює від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В та містить потужні електродвигуни, нагрівальні елементи, системи автоматичного керування та контрольно-вимірювальні прилади.

Вимоги до безпечної експлуатації електрообладнання встановлюються **НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»**, які регламентують організаційні та технічні заходи безпеки під час роботи в електроустановках споживачів. Правила визначають порядок обслуговування електрообладнання, вимоги до персоналу, застосування захисних засобів та виконання ремонтних робіт.

Основними джерелами небезпеки на екструзійній лінії є електродвигун приводу шнека, нагрівальні елементи циліндра екструдера та модернізованої головки, електричні шафи керування, датчики температури та допоміжне електрообладнання. У разі пошкодження ізоляції або порушення режимів роботи можливе виникнення напруги на металевих частинах обладнання, що створює небезпеку ураження працівників електричним струмом.

З метою захисту персоналу всі металеві неструмопровідні частини обладнання повинні бути приєднані до системи захисного заземлення відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ). Захисному заземленню підлягають корпус екструдера, корпуси електродвигунів, металеві конструкції башти формування плівки, шафи керування та інше обладнання, яке може опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції.

Конструкція та електрообладнання лінії повинні відповідати вимогам **ДСТУ EN 60204-1:2019 «Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги»**, який встановлює вимоги до електричних систем машин, пристроїв аварійного вимкнення, захисту від ураження електричним струмом, захисту від коротких замикань і перевантажень, а також до маркування та ідентифікації електричних кіл.

Для запобігання аварійним ситуаціям електричні кола повинні бути обладнані автоматичними вимикачами, плавкими запобіжниками та іншими пристроями захисту від перевантаження і короткого замикання. Шафи

керування мають бути зачинені та обладнані попереджувальними знаками безпеки.

Обслуговування та ремонт електрообладнання дозволяється виконувати лише працівникам, які пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки й мають відповідну групу допуску. Перед проведенням ремонтних або налагоджувальних робіт обладнання необхідно знеструмити, перевірити відсутність напруги та вжити заходів, що унеможливляють його випадкове ввімкнення. Такі вимоги передбачені НПАОП 40.1-1.21-98.

Для додаткового захисту персоналу застосовуються діелектричні рукавички, інструмент з ізольованими ручками, діелектричні килимки та інші електрозахисні засоби. Виконання зазначених заходів забезпечує безпечну експлуатацію лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки та знижує ризик виникнення нещасних випадків, пов'язаних з дією електричного струму.

6.3 Пожежна безпека

Під час експлуатації лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера особливу увагу необхідно приділяти забезпеченню пожежної безпеки, оскільки в технологічному процесі використовуються горючі полімерні матеріали, електронагрівальні елементи та електрообладнання значної потужності.

Організація пожежної безпеки на підприємстві повинна здійснюватися відповідно до вимог Закону України «Про пожежну безпеку», Кодексу цивільного захисту України, **НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні»**, а також **ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги»**. Зазначені нормативні документи встановлюють вимоги до утримання виробничих приміщень, евакуаційних шляхів, протипожежного захисту та дій персоналу у разі виникнення пожежі.

Основними причинами виникнення пожежі на екструзійній лінії можуть бути короткі замикання електрообладнання, перевантаження електричних

мереж, несправність нагрівальних елементів екструдера та головки, порушення технологічного режиму переробки полімерів, а також накопичення горючих відходів виробництва поблизу джерел нагрівання.

Особливу пожежну небезпеку становлять полімерна сировина та готова продукція, які здатні підтримувати горіння. При перегріванні полімерів можливе їх займання та виділення токсичних продуктів горіння. Тому температурний режим роботи екструдера повинен постійно контролюватися автоматизованою системою керування та контрольно-вимірювальними приладами.

Відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 виробничі приміщення повинні бути забезпечені первинними засобами пожежогашіння. Біля екструзійної лінії доцільно встановлювати порошкові та вуглекислотні вогнегасники, які придатні для гашіння електрообладнання під напругою та горючих матеріалів.

Шляхи евакуації повинні постійно утримуватися вільними від обладнання, сировини та готової продукції. Евакуаційні виходи необхідно позначати відповідними знаками безпеки та забезпечувати аварійним освітленням. Вимоги щодо забезпечення безпечної евакуації людей встановлені ДБН В.1.1-7:2016.

Для запобігання виникненню пожеж необхідно проводити періодичний огляд електрообладнання, перевірку стану ізоляції кабелів, справності автоматичних вимикачів та захисного заземлення. Ремонтні роботи повинні виконуватися лише після повного відключення обладнання від джерел живлення. Для ділянки з експлуатації лінії виготовлення рукавної полімерної плівки доцільно передбачити встановлення не менше **двох порошкових вогнегасників ВП-5 (ВП-9)** та **одного вуглекислотного вогнегасника ВВК-3,5 або ВВК-5** для гашіння електрообладнання, що перебуває під напругою.

Працівники, які обслуговують лінію, повинні проходити вступний та первинний протипожежний інструктаж, знати місця розташування засобів пожежогасіння, порядок виклику пожежно-рятувальних підрозділів та правила евакуації у разі виникнення надзвичайної ситуації.

Виконання вимог чинних нормативних документів та впровадження комплексу організаційних і технічних заходів дозволяє мінімізувати ризик виникнення пожежі та забезпечити безпечну експлуатацію лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера.

Захист від дії рухомих механізмів

Під час експлуатації лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера одним із найбільш небезпечних виробничих факторів є наявність рухомих частин обладнання. До них належать привід шнека екструдера, муфти та передачі приводу, транспортні ролики, вали системи відведення плівки, притискні механізми, а також намотувальні пристрої. Контакт працівника з рухомими елементами може призвести до механічних травм, затягування одягу, ушкодження кінцівок або інших нещасних випадків.

Вимоги щодо захисту працівників від небезпечної дії рухомих частин виробничого обладнання встановлюються Законом України «Про охорону праці», НПАОП 25.0-1.04-13 «Правила охорони праці на підприємствах з виробництва пластмасових виробів», НПАОП 25.0-1.01-12 «Правила охорони праці на об'єктах з переробки пластичних мас», а також ДСТУ EN ISO 12100:2016 «Безпечність машин. Загальні принципи конструювання. Оцінювання ризику та зменшення ризику» і ДСТУ EN 1114-3:2020 «Машини для перероблення гуми та пластмас. Екструдери та екструзійні лінії. Вимоги щодо безпеки».

Для запобігання доступу працівників до небезпечних зон усі рухомі частини обладнання повинні бути обладнані захисними огороженнями.

Огородження мають виключати можливість випадкового контакту з деталями, що обертаються або переміщуються, та водночас не перешкоджати виконанню технологічних операцій і технічного обслуговування обладнання.

Привідні механізми екструдера, муфти, ремінні та ланцюгові передачі повинні розміщуватися під суцільними металевими кожухами. Захисні кожухи мають бути надійно закріплені та зніматися лише за допомогою спеціального інструменту. Робота обладнання зі знятими або пошкодженими огороженнями не допускається.

Особливу увагу необхідно приділяти зоні намотування готової плівки, де існує ризик затягування рук або одягу між валами та намотувальними пристроями. Для підвищення рівня безпеки такі ділянки повинні бути обладнані аварійними вимикачами, доступними для швидкого використання оператором у разі виникнення небезпечної ситуації.

Конструкція лінії повинна передбачати застосування блокувальних пристроїв, які унеможливають запуск обладнання при відкритих захисних огороженнях. У разі відкривання дверцят або демонтажу захисного кожуха електроживлення приводу повинно автоматично відключатися.

Для безпечної експлуатації обладнання працівникам забороняється виконувати очищення, регулювання, змащування або ремонт рухомих вузлів під час їх роботи. Перед початком таких робіт обладнання необхідно повністю зупинити, відключити від джерел енергії та вжити заходів щодо недопущення його випадкового запуску.

Робочі місця повинні бути оснащені попереджувальними знаками безпеки відповідно до вимог ДСТУ ISO 3864-1:2005 та ДСТУ EN ISO 7010:2019. Працівники повинні проходити навчання та інструктажі з охорони праці, знати небезпечні зони обладнання та порядок дій у разі виникнення аварійної ситуації.

Застосування захисних огорожень, блокувальних пристроїв, аварійних вимикачів та дотримання вимог нормативних документів забезпечує надійний захист персоналу від дії рухомих механізмів і сприяє безпечній експлуатації лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера.

Мікроклімат та вентиляція

Під час експлуатації лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера важливе значення має забезпечення нормативних параметрів мікроклімату та ефективного повітрообміну у виробничому приміщенні. Основними джерелами тепловиділень є нагрівальні елементи екструдера та головки, температура яких під час роботи може перевищувати 200 °С.

Вимоги до параметрів мікроклімату встановлені ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», а вимоги до вентиляції — ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Для підтримання допустимих умов праці виробниче приміщення повинно бути обладнане загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією. У місцях можливого виділення парів та продуктів термічного розкладання полімерів доцільно передбачити місцеві витяжні пристрої. Система вентиляції повинна забезпечувати видалення забрудненого повітря та подачу свіжого повітря в робочу зону.

Дотримання нормативних параметрів температури, відносної вологості та швидкості руху повітря сприяє створенню комфортних і безпечних умов праці, знижує втому працівників та підвищує ефективність виробничого процесу.

Освітлення робочої зони

Якісне освітлення робочої зони є важливою умовою безпечної експлуатації лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера. Недостатня освітленість може призводити до підвищеної втомлюваності працівників, зниження точності виконання операцій та збільшення ризику виробничого травматизму.

Вимоги до освітлення виробничих приміщень встановлені **ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення»** та **ДСТУ EN 12464-1:2016 «Світло та освітлення. Освітлення робочих місць у приміщеннях»**.

У виробничому цеху повинно бути передбачене природне та штучне освітлення. Для освітлення робочих місць рекомендується використовувати світлодіодні світильники, які забезпечують рівномірний розподіл світлового потоку, економічність та тривалий термін експлуатації. Освітлювальні прилади необхідно розташовувати таким чином, щоб уникати утворення тіней, відблисків і засліплення працівників.

Освітленість робочої зони повинна відповідати встановленим нормативним значенням та забезпечувати безпечне обслуговування екструдера, контроль параметрів технологічного процесу й виконання ремонтно-налагоджувальних робіт.

Засоби індивідуального захисту

Під час експлуатації лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці» та **НПАОП 0.00-7.17-18 «Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці»**.

Для захисту від механічних пошкоджень, підвищених температур, шуму та забруднень працівники повинні використовувати спеціальний одяг, захисне взуття, рукавиці та за необхідності захисні окуляри. Під час виконання робіт поблизу нагрітих поверхонь екструдера і головки рекомендується застосовувати термостійкі рукавиці.

У зонах із підвищеним рівнем шуму необхідно використовувати засоби захисту органів слуху (беруші або навушники). При проведенні ремонтних робіт на електрообладнанні додатково застосовують діелектричні рукавички та інші електрозахисні засоби.

Правильне використання засобів індивідуального захисту дозволяє знизити вплив небезпечних і шкідливих виробничих факторів та забезпечити безпечні умови праці під час експлуатації лінії.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного аналізу умов праці на лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки з модернізацією головки екструдера визначено основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, до яких належать дія електричного струму, рухомих механізмів, підвищених температур, шуму та можливих шкідливих виділень під час переробки полімерів.

Розглянуто заходи щодо забезпечення електро- та пожежної безпеки, захисту працівників від дії рухомих частин обладнання, підтримання нормативних параметрів мікроклімату, вентиляції та освітлення робочої зони. Також визначено необхідні засоби індивідуального захисту для безпечного виконання виробничих операцій.

Виконання вимог чинних нормативних документів та впровадження передбачених організаційних і технічних заходів забезпечує безпечну експлуатацію лінії, зниження ризику виробничого травматизму та створення належних умов праці для обслуговуючого персоналу.

7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

7.1 Технологія виготовлення деталі

Метою даного розділу є розроблення технологічного процесу виготовлення деталі «Втулка для притискання фільтра» та вибір технологічного оснащення для виконання однієї з операцій її механічної обробки.

У процесі виконання роботи передбачено розробку технології виготовлення втулки, яка експлуатується в умовах підвищених температур. Для цього здійснюється вибір способу отримання заготовки, визначення послідовності технологічних операцій, підбір необхідного обладнання, ріжучого та вимірювального інструменту.

Оскільки до деталі не висуваються надто високі вимоги щодо точності та якості поверхні, її виготовлення доцільно здійснювати механічною обробкою на токарному верстаті. Як матеріал використовується сталь 65, а заготовкою служить круглий прокат (болванка) діаметром 70 мм. Даний матеріал характеризується достатньою міцністю та добрими технологічними властивостями, що забезпечує його ефективну обробку різанням.

7.1.1 Технологічний процес виготовлення деталі

Закріплення заготовки виконується в трикулачковому токарному патроні за зовнішню поверхню $\varnothing 70$ мм. При цьому її торець використовується як опорна точка, а зовнішній діаметр виконує роль подвійної напрямної бази, що сумарно забезпечує чотири опорні точки (Рис.7.1).

Переходи операції:

Обточити торець з $\varnothing 70$ мм до $\varnothing 57,5$ мм на довжину 24 мм.

Виконати підрізання обробленого торця.

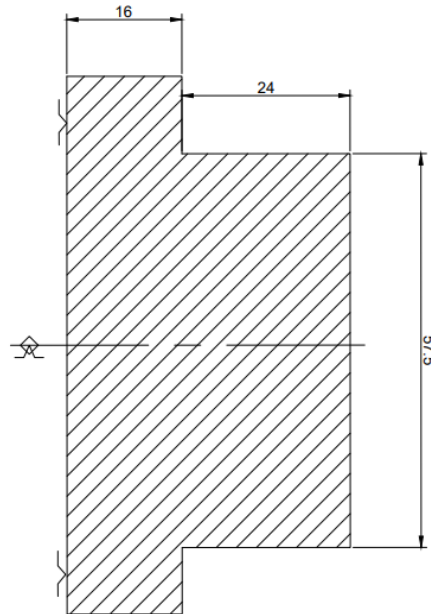


Рис 7.1 - Схема базування при Операції 010.1. Токарна

Встановлення деталі здійснюється на раніше оброблену циліндричну поверхню діаметром 57,5 мм, а підрізаний торець виступає базою, яка сумарно забезпечує чотири опорні точки (Рис. 7.2).

Переходи операції:

Свердління центрального отвору свердлом $\varnothing 25$ мм.

Розточування утвореного отвору до діаметра 45 мм.

Обточування конічної поверхні довжиною 6 мм під кутом 120° .

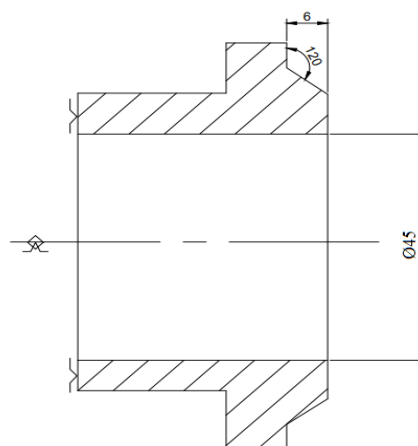


Рис 7.2 Схема базування при Операції 010.2. Токарна

Операція 015. Контрольна

На цьому етапі передбачено контроль геометричних параметрів та

точності обробки найбільш відповідальних поверхонь готового виробу. Контроль здійснюється безпосередньо на спеціалізованому контрольному столі.

Кінцевий вигляд готової деталі наведено на Рис. 7.3.

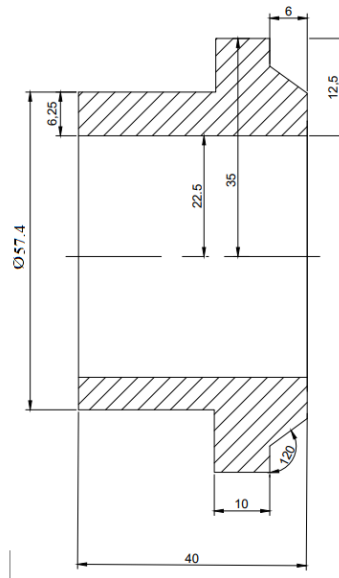


Рисунок 7.3 - Готова втулка для притискання фільтру дорна

Технічні характеристики обладнання для операцій 005, 010

Токарні операції реалізуються на токарно-гвинторізному верстаті моделі 16K20, який має такі паспортні характеристики:

Максимальний діаметр обробки над станиною: 400 мм;

Відстань між центрами (РМЦ): 710 / 1000 / 1400 / 2000 мм;

Максимальний діаметр деталі, що обробляється над супортом: 220 мм;

Найбільший діаметр оброблюваного прутка: 70 мм;

Кількість ступенів частоти обертання шпинделя: 24;

Діапазон частот обертання шпинделя: 12,5 ... 1600 хв⁻¹

Виконання кінця шпинделя: 1-6К згідно з ГОСТ 12595–72;

Максимальний переріз тіла різця в різцериначі супорта: 25 x 25мм;

Кількість ступенів подач: поздовжніх — 22, поперечних — 24;

Велична подачі на один оберт шпинделя:

поздовжня: 0,05... 2,8 мм/об;

поперечна: 0,025... 1,4 мм/об;

7.2 Вибір та розрахунок пристосування для певної операції

7.2.1 Вибір пристосування

Технологічний процес виготовлення втулки для притискання фільтра включає відносно невелику кількість операцій. Як заготовка використовується круглий прокат діаметром 70 мм, з якого шляхом токарної обробки формується деталь необхідної конфігурації. Застосування токарної обробки забезпечує досягнення необхідної точності розмірів та якості поверхні виробу.

Для встановлення та закріплення заготовки на верстаті використовується трикулачковий самоцентрувальний патрон. Даний пристрій забезпечує швидке та надійне базування заготовки, скорочує допоміжний час на її встановлення і гарантує достатню точність позиціонування під час механічної обробки. Використання трикулачкового патрона дозволяє ефективно виконувати токарні операції та отримувати деталь відповідно до заданих розмірів і технічних вимог.

Основним робочим елементом оснащення токарного верстата є токарний патрон, що відповідає за закріплення заготовок на шпинделі під час обробки.

До складу конструкції патрона входять: корпус (1), кулачок (2), механізм для зведення кулачків (3), спіральний диск (4), а також рейка (5) і кріпильні болти кулачка (6). Графічне зображення всіх компонентів наведене на рис. 7.4

Функціонування вузла:

Процес затискання відбувається шляхом обертання ключем механізму зведення (3). Це викликає повертання спірального диска (4), рух якого передається на рейку (5). Внаслідок цього кулачок (2) переміщується до центральної осі патрона, фіксуючи заготовку.

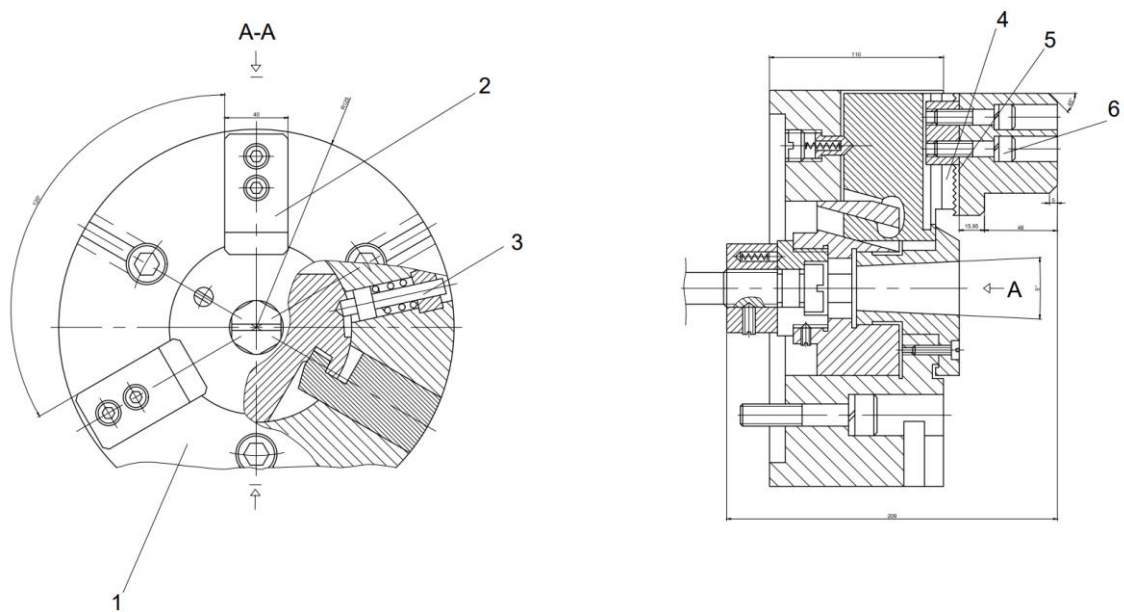


Рис 7.4 -Патрон 3-ох кулачковий

7.2.2 Розрахунок зусилля затискання заготовки

Під час механічної обробки на заготовку діє динамічна система сил. З одного боку, на неї впливають складові сили різання, які намагаються порушити її положення, а з іншого — протидіє сила затиску, що забезпечує нерухомість. Необхідне затискне та вихідне зусилля визначають із рівняння рівноваги моментів цих сил з урахуванням нормативного коефіцієнта запасу.

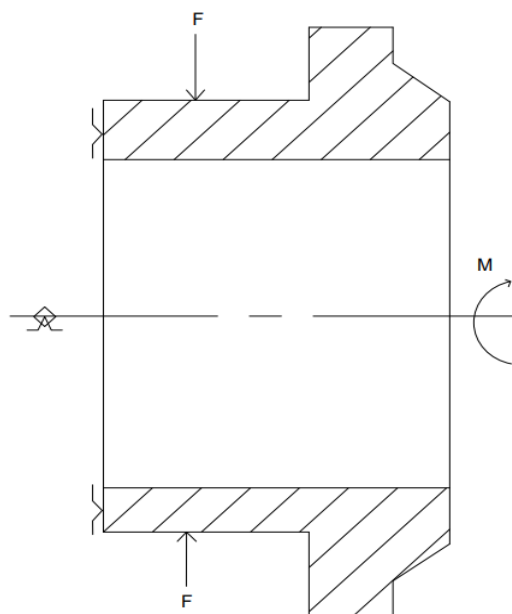


Рис 7.5 -Схема навантажень

Сумарний крутний момент, що виникає від тангенціальної (дотичної) складової сили різання й намагається повернути заготовку в кулачках, розраховують за формулою:

$$M_{p'} = \frac{P_{z'} \cdot d_1}{2}$$

Повороту деталі навколо своєї осі протидіє момент сили затискання, який обчислюють так:

$$M_{z'} = \frac{W' \cdot f \cdot d_2}{2}$$

З умови рівності моментів $M'_{p'}$ та $M'_{z'}$ визначають потрібне зусилля затиску (W'), що запобігає зсуву (провертанню) заготовки:

$$W' = \frac{4 \cdot K \cdot P_{z'} \cdot d_1}{f \cdot d_2}$$

Вихідні дані для розрахунку моменту зсуву W' :

$d_1 = 70 \text{ мм}$

$d_2 = 100 \text{ мм}$

$P_z = 1091.6 \text{ Н}$

$f = 0,4$

$K = 1,8$

$$W' = \frac{4 \cdot 1,8 \cdot 1091,6 \cdot 70}{0,4 \cdot 100} = 13754 \text{ Н}$$

7.2.3 Розрахунок зусилля проти виривання заготовки

Складові сили різання також намагаються вирвати (перекинути) заготовку з кулачків. Цьому процесу протидіє відновлювальний момент від сили затискання патрона.

Необхідну силу затиску для запобігання вириванню (W'') знаходять за формулою:

$$W'' = \frac{1,5 \cdot 2,52 \cdot 854 \cdot 105}{0,4 \cdot 102}$$

Вихідні дані для розрахунку зусилля перекинуття W'' :

$d_2 = 102 \text{ мм}$, $P_y = 850 \text{ Н}$, $f = 0,4$, $l = 40 \text{ мм}$, $K = 2,52$

$$W'' = \frac{1,5 \cdot 2,52 \cdot 850 \cdot 40}{0,4 \cdot 100} = 3213 \text{ Н}$$

Для подальшого проектування та інженерних розрахунків обирають найбільш несприятливий (максимальний) випадок навантаження:

$$W = 13754 \text{ Н}$$

7.2.4 Визначення повного зусилля з урахуванням тертя

Величина результуючого зусилля затискання W_1 що прикладається до постійних кулачків, дещо збільшується через втрати на тертя у вузлах порівняно з чистим зусиллям W . Його розрахунок виконують за залежністю:

$$W_1 = \frac{W}{1 - \left(\frac{3 \cdot l_k}{H_k} \cdot f_1 \right)}$$

Де l_k - виліт кулачка (відстань від середини робочої поверхні змінного кулачка до середини напрямної постійного кулачка);

H_k – довжина напрямної частини постійного кулачка, мм;

f – коефіцієнт тертя в напрямних парах «кулачок — корпус верстата».

$H_D = 30$ мм, - товщина змінного кулачка,

$h_k + h_z = 20 + 30 = 50$ мм, - товщина постійного кулачка

$H_k = 40$ мм, - ширина напрямного постійного кулачка

$H_1 = 25$ мм, - ширина змінного кулачка

$H_k = 80$ мм

$l_k = 62$ мм

$f = 0,1$

Підставивши вихідні дані в формулу:

$$W_1 = \frac{13754}{1 - \left(\frac{3 \cdot 62}{80} \cdot 0.1 \right)} = 17920.5 \text{ Н}$$

7.2.5 Розрахунок затискного механізму токарного патрона

Під час аналізу затискного механізму ключову роль відіграє його конструктивне виконання. У трикулачкових патронах механізми повинні забезпечувати рухливість кулачків у затискному напрямку, чітко дотримуючись закону їх відносного переміщення. До кінематики руху

кулачків висувають такі вимоги: різноспрямованість, одночасність та рівновисока швидкість ходу.

Під час проектування визначають зусилля Q , яке генерується силовим приводом, збільшується затискним механізмом і передається безпосередньо на постійний кулачок:

$$Q = \frac{W_1}{i_c}$$

де i_c — передавальне відношення сили затискного механізму.

Для важільного механізму це відношення становить:

$$i_c = \frac{A}{B} = \frac{2}{1},$$

де A і B — довжини відповідних плечей важеля.

Для попереднього визначення зусилля Q на цьому етапі розраховують орієнтовний зовнішній діаметр патрона:

$$D_p = d_2 + 2 \cdot H_k = 102 + 2 \cdot 80 = 262 \text{ мм}$$

Оскільки $D_p > 200 \text{ мм}$, статочно приймаємо до використання важільний механізм затиску із передавальним числом $i_c = 2$.

$$Q = \frac{17920.5}{2} = 8960,25 \text{ Н}$$

ВИСНОВКИ

Під час розробки технологічного процесу виготовлення втулки було детально проаналізовано її службове призначення та конструктивні особливості, а також обґрунтовано технологічність самої деталі й вихідної заготовки. У ході роботи визначено оптимальний спосіб отримання заготовки та повністю сформовано маршрут її подальшої механічної обробки. Для успішної реалізації техпроцесу підібрано відповідні моделі металорізальних верстатів, необхідні технологічні пристрої та різальні інструменти. Крім того, виконано графічну частину проєкту, яка наочно відображає етапи виготовлення деталі, та в повному обсязі оформлено технологічну документацію, зокрема маршрутну, операційну карти, а також карту ескізів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті виконано аналіз технологічної лінії для виготовлення рукавної полімерної плівки методом екструзії з роздуванням рукава та визначено місце екструдера у загальному виробничому процесі. Розглянуто призначення, конструкцію, принцип дії та технічні характеристики одночерв'ячного екструдера РН-45, що використовується для виробництва полімерних плівок.

Проведено літературно-патентний огляд сучасних технічних рішень щодо вдосконалення екструзійного обладнання та формувальних головок. У результаті аналізу патентних джерел встановлено, що найбільш доцільним напрямком модернізації є вдосконалення внутрішньої розподільчої частини екструзійної головки відповідно до технічного рішення, запропонованого у патенті СА 3058334 А1. Обране рішення забезпечує більш рівномірний розподіл полімерного розплаву, стабілізацію тиску в каналах головки, покращення якості готової продукції та не потребує суттєвої зміни конструкції базового екструдера.

У розрахунковій частині визначено основні геометричні параметри черв'яка екструдера, виконано розрахунки на міцність, стійкість та жорсткість.

На основі обраного варіанта модернізації розроблено тривимірну модель модернізованої екструзійної головки та проведено її числове моделювання із застосуванням програмного комплексу ANSYS.

За результатами розрахунків на міцність у програмному середовищі ANSYS для базової формуючої головки отримано найбільші еквівалентні напруження за Мізесом $\sigma_{\text{екв}} = 700,03 \text{ МПа}$, найбільші деформації $s = 0,067183 \text{ мм}$, а коефіцієнт запасу міцності конструкції $n = 2,6588$. Це свідчить, що еквівалентні напруження базової конструкції екструзійної головки менше допустимих і вона є працездатною.

За результатами розрахунків на міцність у програмному середовищі ANSYS для модернізованої формуючої конструкції екструзійної головки отримано найбільші еквівалентні напруження за Мізесом $\sigma_{\text{екв}} = 702,23$ МПа, найбільші деформації $s = 0,070624$ мм, а коефіцієнт запасу міцності конструкції $n = 1,117$.

Аналіз напружено-деформованого стану показав відсутність критичних напружень і деформацій, що підтверджує достатню міцність та працездатність модернізованої конструкції.

У розділі охорони праці розглянуто основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, характерні для роботи екструзійного обладнання, а також заходи щодо забезпечення безпечних умов праці, електробезпеки, пожежної безпеки та захисту працівників від шуму і вібрацій.

У технологічному розділі розроблено технологічний процес виготовлення деталі, виконано вибір обладнання, інструменту та пристосування для механічної обробки, що забезпечує необхідну точність виготовлення та економічну ефективність виробництва.

Таким чином, поставлені в дипломному проєкті завдання виконані у повному обсязі. Запропонована модернізація екструзійної головки дозволяє підвищити рівномірність розподілу полімерного розплаву, покращити якість рукавної плівки, знизити ймовірність виникнення дефектів та підвищити ефективність роботи технологічної лінії в цілому.

За темою диплома написана і опублікована теза [11].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Технологічна схема виробництва плівки методом екструзії з роздувом. Доступ з екрану: https://studbooks.net/1656251/tovarovedenie/tehnologicheskaya_shema_proizvodstva_s_tretch_plenki_metodom_ekstruzii_razduvom

2. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навчальний посібник. — 2-ге вид., переробл. та доповн. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — 292 с.

3 Екструзійне обладнання [Електронний ресурс]: конспект лекцій для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інжиніринг пакувань та пакувального обладнання», «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання» спец. 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.І. Сівецький, О.Л.Сокольський, Д.Г. Швачко. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025 – 149 с.

4 Костюченко, Д. О., & Щербина, В. Ю. (2026, February). АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ КОРПУСУ ГОЛОВКИ ЕКСТРУДЕРА. In The 4 th International scientific and practical conference “Innovation and development in world science”(February 2-4, 2026) MDPC Publishing, Zurich, Switzerland. 2026. 332 p. (p. 68).

5 Основи проектування одночерв'ячних екструдерів : навч. посіб. / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко . – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 200 с.

6 Hurin, R., Gondliakh, O., Sokolskyi, O., Shcherbina, V., & Antonyuk, S. (2025). Influence of carbon nanotubes on the characteristics of polymer melt flow during extrusion of two-layer pipes. Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving», (2), 20–31. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2025.333972>

7 Method and equipment for rolling ultra-high molecular weight polymers based on dynamic stretching pat. CN 109016449 A China/ Hei Jinping; published 18.12.2018; 12 pages

8 DIE HEAD AND PROCESS TO MANUFACTURE MULTILAYER TUBULAR FILM pat. CA 3058334 A1 Canada/ Perry Allen, Christopher Allen; Published 13.04.2020; 22 pages

9 BLOWN-FORM IDENTIFICATION IN A BLOWN FILM SYSTEM pat. US 12,544,967 B2 USA/Ingo Hehmann, Lengerich (DE); Marco Ventker Stegemann, Lengerich (DE); Michel Bembenek, Lengerich (DE) Published 10.02.2026; pages 11

10 MULTILAYER STACKED ANISOTROPIC ROTARY BLOWN FILM DEVIC pat CN 114228126 China/ Yang Zhitao Lai Yangeng Li Minrong; Published 25.03.2022; pages 9

11 Робота в програмному продукті CATIA. Загальні відомості. М.Г. Кришук, А.В. Трубін, Н.Ф. Тертишна, В.О. Єщенко. НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» 2017. 77 с.

12 Проектування виробів в системі CATIA. Створення ескізів в модулі «Sketcher». Частина 2 : метод. вказівки / М. Г. Кришук, А. В. Трубін, Н. Ф. Тертишна, В. О. Єщенко. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. 106 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/20082>

13 Гафинець Т.М., Козловець А.О., Казак І.О. Модернізація екструзійної головки екструдера для виготовлення полімерної рукавної плівки з метою підвищення якості // Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки: зб. наук. праць за матеріалами XXIII Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Київ, 8-9 червня 2026 р.). К: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2026, С.75-76.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Таблиця огляду патентів

№ п/п	Предмет пошуку	Країна видачі, вид і номер документа, рік	Ціль створення і сутність заявленого технологічного рішення, і технічний результат
1	2	3	4
1	基于动态延展的超高分子量聚合物轧制成 型方法及设备	专利 CN 109016449 A China 发明人 霍金平 申请公布日 18.12.2018	Метою винаходу є створення способу та обладнання, які забезпечують стабільне формування надвисокомолекулярних полімерів шляхом поєднання осьового та радіального розтягування матеріалу.
2	DIE HEAD AND PROCESS TO MANUFACTURE MULTILAYER TUBULAR FILM	Patent CA 3058334 A1 Canada Inventors: BAIER, CHRISTIAN, DE; GRIMM, FELIX, DE; HEINECKER, MICHAEL, DE; LIBOWSKI, Published 13.04.2020	Запропонована система та спосіб екструзійного формування полімерних виробів дозволяють забезпечити стабільність технологічного процесу, покращити якість готових виробів та розширити можливості переробки складних полімерних матеріалів у промислових умовах.
3	BLOWN-FORM IDENTIFICATION IN A BLOWN FILM SYSTEM	Patent US 12,544,967 B2 USA Inventors: Ingo Hehmann, Lengerich (DE); Marco Ventker-Stegemann, Published 10.02.2026	Запропонований у патенті спосіб ідентифікації форми плівкового рукава у системі видувної плівки дозволяє значно підвищити ефективність контролю технологічного процесу екструзії. Завдяки використанню систем аналізу геометрії, датчиків та автоматичного регулювання забезпечується стабільність форми плівкового рукава та рівномірність товщини готової плівки.

Продовження додатку А

4	多层叠合异向旋转吹塑薄膜装置	专利 CN 114228126 A China 发明人 杨智韬 赖燕根 黎敏荣 覃昌壬 汤明 杨昭 申请公布日 21.11.2021	Запропонований багатопаровий пристрій видувного формування плівки з різноспрямованим обертанням дозволяє значно покращити якість полімерних плівок, особливо при переробці високоорієнтованих матеріалів. Завдяки протилежному обертанню внутрішньої оправки та зовнішнього формувального кільця забезпечується стабільність каналу течії розплаву та рівномірність товщини плівки. Технологія сприяє зменшенню анізотропії властивостей плівки, підвищує стабільність процесу видувного формування та може ефективно використовуватися у сучасних промислових лініях виробництва багатопарових полімерних плівок.
---	----------------	---	--

Додаток Б Специфікації

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Додаток В. Лістинг програми черв'яка на міцність
та результати розрахунку на C++

```
✓ #include <iostream>
  #include <cmath>

  using namespace std;

✓ int main()
{
    // Вихідні дані
    double D = 45.0;           // діаметр черв'яка, мм
    double N = 37.0;           // потужність, кВт
    double n = 99.6;           // об/хв
    double rho = 7850.0;       // кг/м3
    double sigma_t = 780.0;    // МПа

    // Геометричні параметри
    double l_rob = 30 * D;
    double l_zav = 8 * D;
    double l_doz = 15 * D;
    double l_st = l_rob - l_zav - l_doz;

    double l_shl = 1.4 * D;
    double l_ev = 125;
    double l_cyl = D;

    double l_zag = l_rob + l_ev + l_cyl;

    double t = D;
    double e = 0.1 * D;
    double delta = 0.003 * D;

    double R = 0.16 * D;
    double r = 0.09 * D;

    double h1 = 0.14 * D;

    double phi = atan(t / (M_PI * D)) * 180.0 / M_PI;

    double i_st = 2.1;

    double h2 = 0.5 * (D -
        sqrt(pow(D, 2) -
            (4 * h1 / i_st) * (D - h1)));

    double d1 = D - 2 * h1;
    double d2 = D - 2 * h2;
```

```

cout << "=== Геометрія черв'яка ===" << endl;
cout << "Довжина робочої частини = " << l_rob << " мм" << endl;
cout << "Довжина завантажувальної зони = " << l_zav << " мм" << endl;
cout << "Довжина зони дозування = " << l_doz << " мм" << endl;
cout << "Довжина зони стиску = " << l_st << " мм" << endl;
cout << "Загальна довжина = " << l_zag << " мм" << endl;
cout << "Крок витка = " << t << " мм" << endl;
cout << "Товщина гребня = " << e << " мм" << endl;
cout << "Зазор = " << delta << " мм" << endl;
cout << "Кут підйому = " << phi << " град" << endl;
cout << "Глибина каналу h1 = " << h1 << " мм" << endl;
cout << "Глибина каналу h2 = " << h2 << " мм" << endl;
cout << "Діаметр осердя d1 = " << d1 << " мм" << endl;
cout << "Діаметр осердя d2 = " << d2 << " мм" << endl;

// Розрахунок міцності
double Mkr = (30.0 * N) / (M_PI * n);

double Pos = (2 * Mkr) /
(0.045 * tan(phi * M_PI / 180.0));

cout << "\n=== Міцність ===" << endl;
cout << "Крутний момент Mкр = "
<< Mkr << " Н*м" << endl;

cout << "Осьове зусилля Pos = "
<< Pos << " Н" << endl;

// Маса черв'яка
double d0 = 0.01;
double G = M_PI *
pow((0.045 - d0), 2) / 4.0 *
rho * 1.52;

double q = 9.8 * G / 1.52;

cout << "Маса черв'яка G = "
<< G << " кг" << endl;

cout << "Розподілене навантаження q = "
<< q << " Н/м" << endl;

return 0;
}

```

XXIII Всеукраїнська конференція «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки»

Модернізація екструзійної головки екструдера для виготовлення полімерної рукавної плівки з метою підвищення якості

Гафинець Т.М. студ., Козловець А.О., студ., Казак І.О., к.п.н., доц.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Запропоновано модернізацію екструзійної головки екструдера для виготовлення полімерної рукавної плівки з формувальним каналом зі змінним поперечним перерізом. Модернізація спрямована на покращення розподілу полімерного розплаву в проточній частині головки екструдера для виготовлення полімерної плівки, підвищення стабільності технологічного процесу та забезпечення рівномірної товщини готової плівки.

Ключові слова екструдер, екструзійна головка, полімерна рукавна плівка, покращення розподілу розплаву, формувальний канал, змінний поперечний переріз, підвищення якості.

Вступ. Екструзія є одним із найпоширеніших способів переробки полімерних матеріалів для виготовлення плівок, труб та профільних виробів [1]. У процесі виробництва полімерної рукавної плівки важливе значення має рівномірність розподілу полімерного розплаву в екструзійній головці. Нерівномірний потік матеріалу призводить до коливань товщини плівки, погіршення механічних характеристик та збільшення кількості браку.

Для підвищення якості готової продукції було проведено аналіз літературно-патентних рішень щодо існуючих варіантів модернізації екструзійних головок для виготовлення рукавної полімерної плівки. За результатами аналізу було обрано прототип [2] з формувальним каналом зі змінним поперечним перерізом, який передбачає вдосконалення конструкції проточної частини головки за рахунок оптимізації каналів подачі полімерного розплаву (Рис. 1).

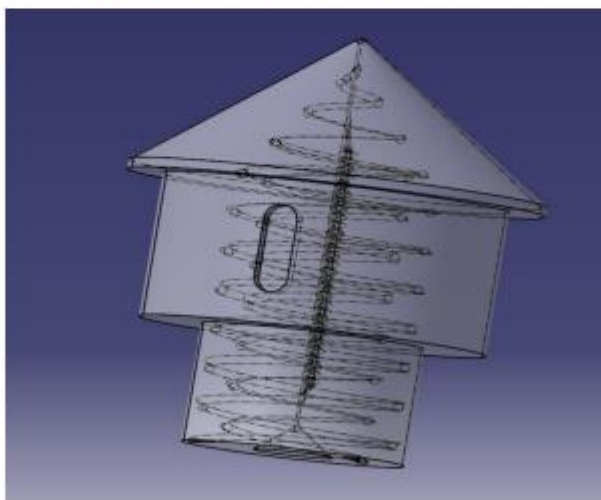


Рисунок 1 – Модель модернізованої конструкції головки екструдера з геометрією всередині формувального каналу зі змінним поперечним перерізом

У стандартних екструзійних головках розподіл полімеру відбувається через центральний канал із подальшим надходженням до кільцевого зазору. Така конструкція може спричиняти виникнення зон застою матеріалу, нерівномірний тиск по периметру головки та локальні

температурні перепади. У результаті погіршується однорідність плівки та знижується стабільність технологічного процесу.

Запропонована модернізація передбачає зміну геометрії розподільної частини головки, що забезпечує більш рівномірний розподіл розплаву по колу. Завдяки цьому вирівнюється швидкість потоку матеріалу, зменшуються втрати тиску та покращуються умови формування рукавної плівки (Рис. 2).

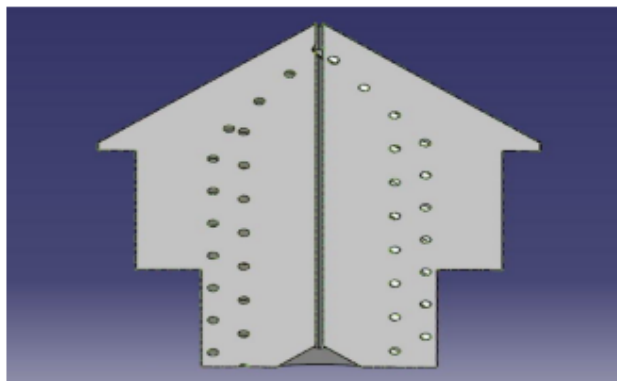


Рисунок 2 – Модель модернізованої конструкції головки екструдера з системою розподільних каналів зі змінним поперечним перерізом у розрізі

Під час роботи модернізованої головки полімерний розплав надходить у систему розподільних каналів, де рівномірно розподіляється по всьому периметру формувального зазору. Це дозволяє забезпечити стабільні умови екструзії, зменшити відхилення товщини плівки та підвищити якість готової продукції.

Використання формувального каналу зі змінним поперечним перерізом у голоці екструдера дозволить забезпечити більш плавний рух полімерного розплаву та зменшити турбулентність потоку. У результаті модернізації головки для рукавної плівки: вирівнюється тиск у каналі; стабілізується швидкість руху розплаву; покращується рівномірність товщини плівки; зменшується ризик утворення дефектів поверхні. Для процесу екструзії це має велике значення, оскільки навіть незначні коливання потоку можуть викликати порушення структури плівки та появу браку. Таким чином забезпечується комплексне покращення процесу екструзії, що дозволить підвищити якість готової продукції, зменшити кількість дефектів та реалізувати модернізацію з мінімальними конструктивними змінами обладнання [2].

Висновки. Проведений аналіз показав, що конструкція екструзійної головки має вирішальний вплив на якість полімерної рукавної плівки та стабільність процесу екструзії. Представлена конструкція модернізованої головки екструдера з системою розподільних каналів зі змінним поперечним перерізом, дозволяє покращити умови розподілу полімерного розплаву в проточній частині головки, знизити нерівномірність потоку та мінімізувати коливання товщини плівки. Запропонована модернізація головки екструдера сприяє підвищенню ефективності роботи екструзійного обладнання, покращенню якості готової продукції та зменшенню кількості технологічного браку.

Перелік посилань

1. Мікульонюк І.О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. 3-тє вид., переробл. та доповн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 296 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/68766>
2. Die head and process to manufacture multilayer tubular film : pat. CA 3058334 A1 Canada / Perry Allen, Christopher Allen; Applicat. 10.10.2019 ; Publ. 13.04.2020, 22 p.