

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

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

« _____ » _____ 2026 р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

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

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: Екструдер для виробництва труб з полівінілхлориду з модернізацією

ГОЛОВКИ

Студент (-ка) IV к, групи ЛП-21
(шифр групи)

Дунін Кірил Денисович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник проекту:

_____ доктор технічних наук, професор, Гондях О.В.
(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»

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – *133 Галузеве машинобудування*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Дунін Кірил Денисович

1. Тема проекту «Екструдер для виготовлення труб з полівінілхлориду з модернізацією головки», керівник проекту Гондляр Олександр Володимирович, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «19.05» 2026 р. № 1817-С
2. Термін подання студентом проекту 16.06.2025 р.
3. Вихідні дані до проекту
Одночерв'ячний екструдер 63х24 та прямоточна формуюча кільцева головка, діаметр черв'яка $D = 63$ мм, робоча довжина $L = 1512$ мм, номінальна частота обертання шнека $n = 90$ об/хв, маса $M = 2300$ кг, потужність приводу $N = 5,5$ кВт, продуктивність $Q = 160$ кг/год, робочий діапазон температур переробки 175–190 °С
4. Зміст пояснювальної записки
Пояснювальна записка містить розділи: «Пояснювальна записка», «Охорона праці» та «Технологія машинобудування», «Загальні висновки», «Перелік посилань», «Додатки». Пояснювальна записка містить розділи: Вступ; Галузь застосування екструдера; Технічні характеристики; Опис конструкції; Літературно патентний огляд; Обґрунтування запропонованої модернізації; Розрахунки; Охорона праці; Технологія машинобудування; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу

1 Технологічна схема лінії; 2 Загальний вид екструдера; 3 Креслення черв'яка; 4 Креслення вузла після модернізації; 5 Плакат збірки 3D моделі модернізованої головки; 6 Плакат числових розрахунків немодернізованої головки; 7 Плакат числових розрахунків модернізованої головки.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
МОДЕРНІЗАЦІЇ	проф. Щербина В.Ю.	20.05.26	25.06.26
ТЕХ. МАШИНОБУД.	ст. викл. Борщик С.О.	20.05.26	02.06.26
ОХОРОНА ПРАЦІ	ст. викл. Ковтун А.І.	20.05.26	27.05.26

7. Дата видачі завдання 20.05.26

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Вступ	20.05-21.05	
2.	Галузь застосування та загальний вигляд	23.05-25.05	
3.	Технічні характеристики базової машини, літературно-патентний огляд	27.05-28.05	
4.	Розрахунки	29.05-31.05	
5.	Розрахунки модернізованої головки в системі Ansys	01.06-03.06	
6.	Охорона праці, технологія машинобудування	04.06-06.06	
7.	Загальні висновки	07.06-09.06	

Студент

К.Д. Дунін

Керівник проекту

О.В. Гондлях

РЕФЕРАТ

У дипломному проєкті розроблено модернізацію трубної головки екструдера для виготовлення двошарових труб з механічним защемленням з полівінілхлориду (ПВХ). Пояснювальна записка містить розрахункову, дослідницьку та технологічну частини.

Проведено аналіз технологічного процесу екструзії жорсткого ПВХ та опис базової конструкції екструдера з діаметром черв'яка 63 мм та відношенням $L/D = 24$. На основі літературно-патентного огляду обґрунтовано впровадження модернізованої головки для спільної екструзії з використанням спеціальних пазів та виступів, що забезпечують Т-подібне механічне защемлення внутрішнього та зовнішнього шарів труби.

Виконано параметричні, теплові розрахунки та перевірку черв'яка на міцність і жорсткість. За допомогою програмного комплексу ANSYS проведено числове моделювання напружено-деформованого стану базової та модернізованої конструкцій зі сталі 38Х2МЮА. Встановлено, що максимальні еквівалентні напруження за Мізесом у модернізованій головці становлять 189 МПа, що забезпечує достатній коефіцієнт запасу міцності 4,42. Також розроблено заходи з охорони праці (зокрема, місцева вентиляція для відведення токсичних газів) та технологічний процес виготовлення матриці.

Ключові слова: екструдер, полівінілхлорид, ПВХ-труба, черв'як, екструзійна головка, коекструзія, механічне защемлення, числове моделювання.

ABSTRACT

In this diploma project, the modernization of an extruder pipe die head for the production of two-layer polyvinyl chloride (PVC) pipes has been developed. The explanatory note includes calculation, research, and technological sections.

An analysis of the rigid PVC extrusion process and a description of the basic extruder design with a screw diameter of 63 mm and an L/D ratio of 24 were conducted. Based on a literature and patent review, the implementation of a modernized co-extrusion die head utilizing special grooves and protrusions to provide a T-shaped mechanical interlocking of the inner and outer pipe layers was justified.

Parametric and thermal calculations, as well as verification of the screw's strength and rigidity, were performed. Using the ANSYS software suite, numerical modeling of the stress-strain state of both the basic and modernized designs made of 38Kh2MYuA steel was carried out. It was determined that the maximum equivalent von Mises stresses in the modernized head amount to 189 MPa, ensuring a sufficient safety factor of 4,42. Additionally, occupational safety measures (including local ventilation to extract toxic gases) and the manufacturing technology process for the die matrix were developed.

Keywords: extruder, polyvinyl chloride, PVC pipe, screw, extrusion die head, co-extrusion, mechanical interlocking, numerical modeling.

D - діаметр черв'яка, мм;
 L - робоча довжина черв'яка, мм;
 n - частота обертання черв'яка, об/хв;
 Q - продуктивність екструдера, кг/год;
 N - потужність приводу, кВт;
 p - тиск розплаву, МПа;
 T - температура, °С;
 Δp - перепад тиску, Мпа
 $M_{кр}$ - крутний момент, Н·м;
 F_a - осьова сила розпору, Н;
 $\sigma_{екв}$ - еквівалентне напруження за Мізесом, МПа;
 n - коефіцієнт запасу міцності;

Скорочення

ПВХ - полівінілхлорид;
ПЗ - пояснювальна записка;

Індекси

max - максимальний;
min – мінімальний;

ЗМІСТ

ВСТУП

1. СХЕМА І ОПИС МАШИНИ, ПРИНЦИПИ РОБОТИ, ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД МАШИНИ	9
1.1 Опис екструдера та принципу роботи	9
1.2 Опис технологічної лінії з використанням екструдера	10
2. ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ	12
3. ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ	13
4. ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД, ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГОЛОВКИ ЕКСТРУДЕРА	15
4.1 Обґрунтування запропонованої модернізації	19
5. ПРОЕКТУВАННЯ БАЗОВОГО ТА МОДЕРНІЗОВАНОГО ВУЗЛА ОБЛАДНАННЯ	23
6. РОЗРАХУНКИ	33
6.1 Параметричні розрахунки	33
6.2 Розрахунки черв'яка на міцність	37
6.3 Тепловий розрахунок	41
6.4 Числове моделювання	45
6.5 Результати числового моделювання	58
7. ОХОРОНА ПРАЦІ	59
7.1 Повітря робочої зони та мікроклімат	60
7.2 Виробничий шум та вібрація	61
7.3 Електробезпека	61
7.4 Пожежна безпека	62
7.5 Освітлення на робочих місцях	62
7.6 Охорона навколишнього середовища	63
8. ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ	65
8.1 Опис та призначення	65
8.2 Вибір та розрахунок	66
8.3 Призначення пристосування для обробки деталі	73
ВИСНОВКИ	
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	
ДОДАТКИ	

					ЛП21.05141546.001-70			
Зм..	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата	Екструдер для виготовлення труб з полівінілхлориду з модернізацією головки ЛПІ ім. Ігоря Сікорського			
Розроб.		Дунін К.Д.						
Перев.		Гондлах О.В.						
Н. Контр.								
Затвердив		Сокольський			Літ.. Аркуш Аркушів 1 75			

ВСТУП

Сучасний розвиток світової промисловості характеризується стрімким розширенням сфер застосування полімерних матеріалів. Завдяки унікальному поєднанню фізико-хімічних властивостей, корозійної стійкості та технологічності, вироби з пластмас, зокрема полівінілхлориду (ПВХ), стали незамінними в будівництві, хімічній індустрії та комунальному господарстві.

Одним із найпоширеніших методів переробки термопластів є екструзія. Ефективність цього процесу та якість кінцевої продукції безпосередньо залежать від досконалості конструкції формуючого інструменту та стабільності параметрів течії розплаву. В умовах сучасного ринку особливої актуальності набуває виготовлення багатошарових труб, що дозволяє комбінувати переваги різних матеріалів або використовувати вторинну сировину без втрати експлуатаційних характеристик.

Даний дипломний проєкт присвячений модернізації екструзійної головки для виробництва двошарових ПВХ труб. Основною метою роботи є вдосконалення конструкції формуючого вузла на основі аналізу патентної документації та сучасних інженерних рішень. Це дозволить забезпечити рівномірний розподіл товщини шарів та підвищити продуктивність лінії.

В ході виконання проєкту проведено розрахунки технологічних параметрів, виконано аналіз напружено-деформованого стану конструкції та розроблено рекомендації щодо оптимальних режимів експлуатації модернізованого обладнання.

1 СХЕМА І ОПИС МАШИНИ, ПРИНЦИПИ РОБОТИ, ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД МАШИНИ

1.1 Опис екструдера та принципу роботи

Основним робочим обладнанням лінії є одночерв'ячний екструдер, призначений для безперервної переробки полімерної сировини (ПВХ) у гомогенний розплав та подальшого його нагнітання у формуючу головку [3].

Основними вузлами екструдера є робочий циліндр. Виконує роль камери, в якій відбувається нагрівання та плавлення полімеру. На зовнішній поверхні циліндра встановлені кільцеві електричні нагрівачі, розділені на температурні зони.

Шнек - головний робочий орган, що має спеціальний профіль навивки для забезпечення зон живлення, пластифікації та дозування. Матеріал шнека - сталь 38Х2МЮА [8] з подальшим азотуванням для підвищення зносостійкості.

Привідна частина. Складається з електродвигуна та редуктора, що забезпечують необхідний крутний момент та регульовану частоту обертання шнека.

Завантажувальний бункер. Призначений для накопичення та стабільної подачі вихідної сировини в зону живлення шнека.

Принцип роботи машини. Процес переробки відбувається наступним чином, сировина з бункера потрапляє в міжвитковий простір шнека в зоні живлення. При обертанні шнека матеріал переміщується вздовж циліндра, поступово нагріваючись від стінок та за рахунок внутрішнього тертя. У зоні стиснення відбувається остаточне плавлення та видалення повітря з розплаву. В зоні дозування розплав остаточно гомогенізується та під високим тиском подається крізь пакет фільтрів до формуючої головки [3].

Технічна характеристика формуючої головки. Формуюча головка прямооточного типу забезпечує перетворення циліндричного потоку розплаву в кільцевий. Вона складається з корпусу, дорна, матриці та системи дорнотримачів. На виході з головки формується трубна заготовка, яка згодом потрапляє на калібрування.

1.2 Опис технологічної лінії з використанням екструдера

На рис. 1.1 представлена технологічна лінія для виготовлення труб з ПВХ.

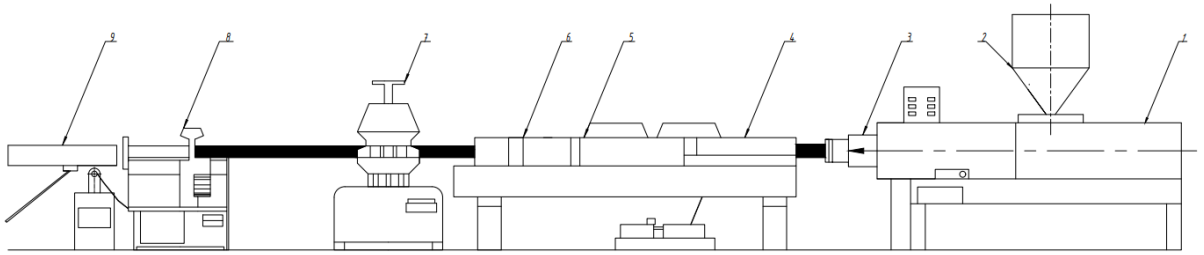


Рис. 1.1 - Технологічна лінія

Стабільність екструзійного процесу безпосередньо залежить від ретельного контролю температурних та швидкісних параметрів. Оскільки жорсткий ПВХ є термочутливим матеріалом, схильним до деструкції з виділенням хлористого водню при перегріві. Особлива увага приділяється тиску розплаву перед формуючою головкою, який повинен коливатися в межах $\pm 0,5$ МПа. Різкі стрибки тиску вказують на неоднорідність сировини або забруднення фільтруючих сіток, що може призвести до зміни товщини стінки труби або появи поверхневих дефектів.

Послідовність технологічних операцій.

Підготовка та завантаження сировини. Композиція ПВХ у вигляді порошку або гранул, що містить необхідні адитиви (стабілізатори, змащувальні речовини, пігменти), подається з цехової системи зберігання у бункер (2) екструдера (1). Завантаження здійснюється за допомогою шнекового живильника [4].

Пластифікація та гомогенізація розплаву. У робочому циліндрі екструдера під дією обертання черв'яка матеріал транспортується крізь зони живлення, стиснення та дозування. За рахунок зовнішнього обігріву та внутрішнього тертя полімер переходить у стан в'язкотекучого розплаву, де відбувається його остаточне перемішування [7].

Формування трубної заготовки. Розплав під високим тиском проходить крізь фільтр та потрапляє в екструзійну головку (3). Завдяки системі дорнів та матриць потік розплаву перетворюється на кільцеву заготовку необхідного профілю.

Калібрування та охолодження. Гаряча заготовка виходить із головки та потрапляє у вакуум-калібруючий пристрій (4,5). Під дією розрідження (вакууму) заготовка притискається до внутрішньої стінки калібруючої гільзи, фіксуючи зовнішній діаметр труби. Одночасно з цим у ваннах відбувається інтенсивне охолодження водою (6) для стабілізації форми.

Транспортування та маркування. Тягнучий пристрій (7) забезпечує стабільну швидкість виходу труби з лінії, що критично для збереження товщини стінки. На готовий виріб наноситься маркування з технічними характеристиками за допомогою принтера.

Різання та приймання готової продукції. Автоматичний відрізний пристрій (8) виконує розрізання труби на мірні відрізки заданої довжини. Готові труби скидаються на накопичувальний стіл (9) для подальшого пакування.

2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ

Основні технічні характеристики базового екструдера для виробництва ПВХ-труб наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики екструдера

Параметр	Значення	Одиниці виміру
Діаметр черв'яка D	63	мм
Відношення L/D	24	-
Частота обертання черв'яка n	60-120	об/хв
Продуктивність Q	90	кг/год
Потужність приводу N	5,5	кВт
Максимальний тиск $p_{\max}$	40	МПа
Довжина	2500	мм
Ширина	1000	мм
Висота	1900	мм
Маса	2300	кг
Напруга	380/220	В

З ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ

Екструдер 63х24, призначений для переробки композицій на основі жорсткого полівінілхлориду (ПВХ) у трубні вироби. Дана машина є основним модулем екструзійної лінії та забезпечує безперервність технологічного циклу, що включає транспортування сировини, її плавлення, гомогенізацію та формування кільцевої заготовки під високим тиском.

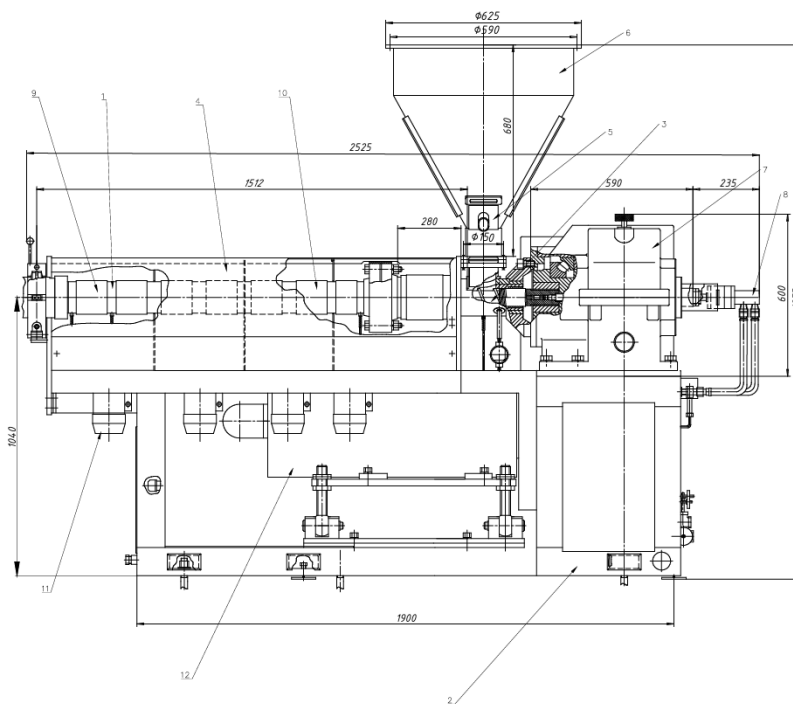


Рис. 3.1 – Екструдер 63х24

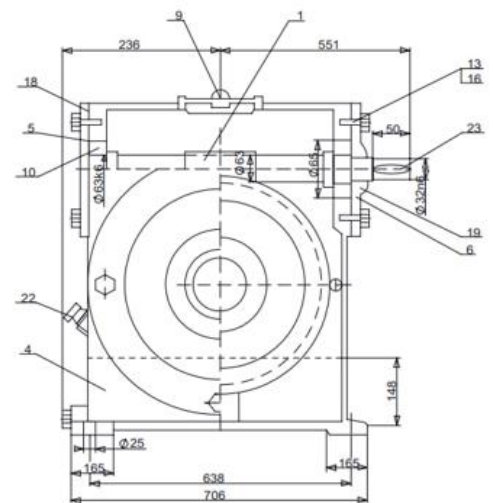


Рис. 3.2 - Формуюча головка кільцевого типу

Основою машини є рама коробчатого типу, на якій змонтовані всі функціональні вузли. Приводна частина екструдера складається з електродвигуна змінного струму потужністю 5,5 кВт, який через муфту з'єднаний з циліндричним редуктором. Редуктор забезпечує зниження частоти обертання до робочого діапазону (максимально 100 об/хв) та передачу крутного моменту на хвостовик черв'яка. Для сприйняття значних осьових зусиль, що виникають внаслідок опору розплаву при продавлюванні крізь формуючий інструмент, у конструкції

передбачено блок упорних підшипників, розміщений у спеціальному корпусі між редуктором та робочим циліндром.

Робочий вузол екструдера представлений циліндром та черв'яком, виготовленими з легованої сталі 38Х2МЮА з наступним азотуванням робочих поверхонь. Це забезпечує високу зносостійкість при переробці ПВХ, який може виділяти агресивні продукти деструкції при перегріві. Робочий циліндр обладнаний системою зовнішнього обігріву, що складається з чотирьох зон електричних нагрівачів опору. Для зниження теплових втрат та підвищення енергоефективності установки корпус закрито захисним кожухом із шаром теплоізоляції товщиною 30 мм, що дозволяє значно стабілізувати температурний профіль процесу.

Черв'як екструдера діаметром 63 мм та відносною довжиною $24L/D$ має спеціальну геометрію, адаптовану для переробки термочутливих матеріалів. Конструктивно він поділений на три функціональні зони: зону завантаження, куди з конічного бункера (обладнаного ворушителем для запобігання склеюванню частинок) надходить гранулят; зону пластикації, де глибина каналу черв'яка зменшується від 8,2 мм до 3,5 мм; та зону дозування. Такий профіль забезпечує ступінь стиснення матеріалу на рівні 2,34, що є критично важливим для видалення повітря та інтенсивного перемішування розплаву.

Принцип дії машини полягає у наступному: полімерна сировина з бункера потрапляє в міжвитковий простір черв'яка і під дією сил тертя транспортується вздовж внутрішньої поверхні циліндра. У міру просування матеріал прогрівається за рахунок тепла від зовнішніх нагрівачів та дисипативного тепловиділення, що виникає внаслідок інтенсивної деформації зсуву. Перейшовши у в'язкотекучий стан, розплав під тиском проходить крізь фільтруючі сітки та потрапляє до прямоочної трубної головки. В головці потік полімеру обтікає дорнотримач, що формує порожнисту кільцеву заготовку.

Розрахункова продуктивність даної базової конструкції становить 160 кг/год. Система автоматики підтримує температурний режим у діапазоні 175–195°C, запобігаючи термічній деструкції ПВХ. [5] Конструкція розрахована на роботу при тисках до 35 МПа, забезпечуючи високу якість поверхні та геометричну точність отримуваних трубних виробів [13].

4 ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД, ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГОЛОВКИ ЕКСТРУДЕРА

Мета даного огляду проаналізувати запропоновані патентами та довідковов літературою конструктивні рішення. Розглянемо які переваги надає кожне окреме рішення та які можливі впровадження можна зробити в виробничому процесі.

Патент UA 118513 U «ПРОФІЛЬНА ЕКСТРУЗІЙНА ГОЛОВКА»

Опис патенту. Профільна екструзійна головка призначена для виготовлення профільних виробів з термопластичних полімерів та композицій на їх основі. Головка містить корпус 1 з каналом 2 для протікання розплаву, який складається з вхідної (а), розподільчої (б) та формуючої (в) ділянок. Формуючу ділянку (в) оснащено щонайменше одним додатковим каналом 3, виконаним під кутом менше 90° до напрямку течії розплаву. Вихідний отвір додаткового каналу 3 направлений у напрямку формуючої ділянки, а вхідний отвір оснащено вузлом додаткового живлення 4, що включає матеріальний циліндр 5 з плунжером 7, привід 8 та дозувально-завантажувальний пристрій 9 (з поршнем 10, бункером 12 для полімерних капсул 13 та заслінкою 14).

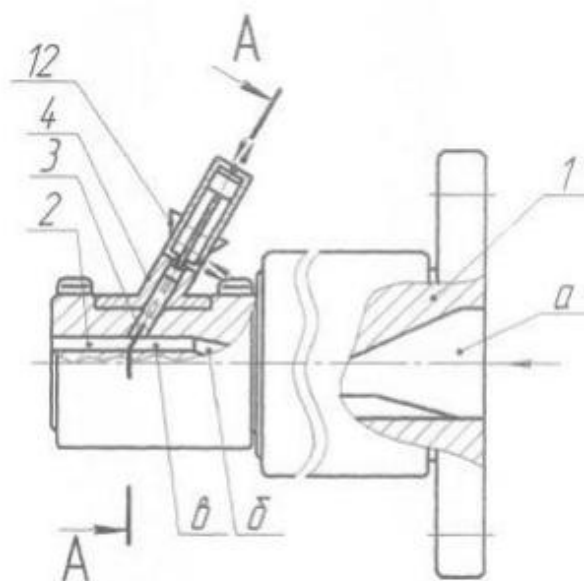


Fig. 1

Рисунок 4.1 – Приклад конструктивного виконання профільної екструзійної
ГОЛОВКИ

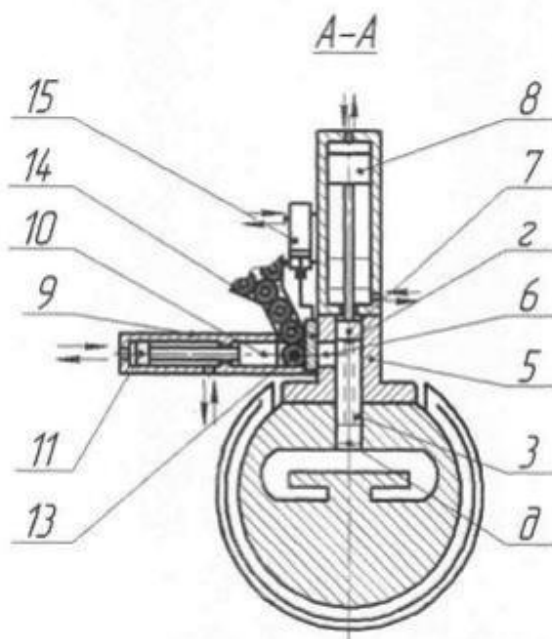


Fig. 2

Рисунок 4.2 – Переріз по А-А профільної екструзійної головки

Головка працює шляхом введення через додатковий канал 3 полімерної капсули з інтелектуальним датчиком (або іншим компонентом), яка оплавляється розплавом і вмонтовується в стінку профілю на заданій глибині.

Аналіз патенту. Суть корисної моделі полягає в оснащенні формуючої ділянки додатковим каналом 3 з вузлом живлення 4, що дозволяє точно вводити в потік розплаву додаткові компоненти (домішки, наповнювачі або інтелектуальні датчики) безпосередньо в задану точку перерізу профілю без зупинки процесу. Це забезпечує локальну модифікацію властивостей виробу та контроль напружено-деформованого стану під час експлуатації. [9]

Для головок екструдерів ПВХ-труб запропоноване рішення становить інтерес як спосіб введення функціональних добавок, стабілізаторів або індикаторів якості безпосередньо в стінку труби на певній глибині. Воно може бути адаптоване для локальної співекструзії або введення модифікаторів у зоні формуючого каналу, що підвищить рівномірність властивостей труби, дозволить створювати багатошарові або «розумні» конструкції та зменшить ймовірність дефектів стінки.

Опис патенту. Кільцева екструзійна головка призначена для формування трубчастих і профільних виробів з термопластичних полімерів. Головка містить корпус, матрицю 1, дорн 2, встановлений на дорнотримачі 3, і канал 4 для протікання розплаву з вихідною ділянкою 5. Матриця 1 з'єднана з корпусом за допомогою принаймні одного пружного елемента 6 та одного демпфуючого елемента 7 і має можливість зворотно-поступального руху вздовж осі, змінюючи переріз каналу 4. Зусилля від матриці 1 передається на кришку 8.

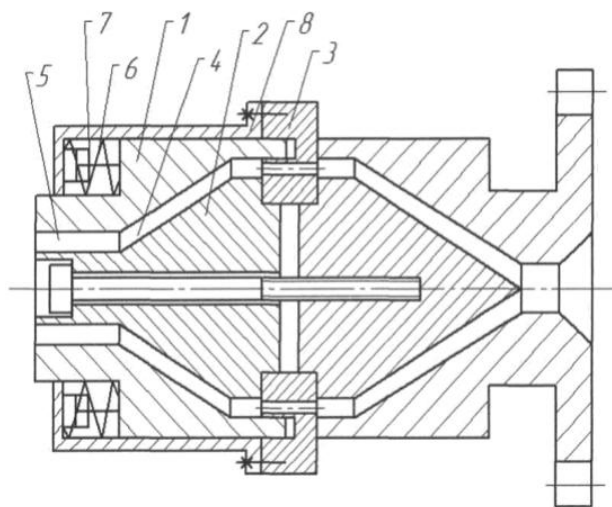


Рисунок 4.3 – Поздовжній переріз екструзійної головки

Головка працює за рахунок динамічного гасіння пульсацій розплаву шляхом осьового переміщення матриці 1.

Аналіз патенту. Суть корисної моделі полягає в еластично-демпфуючому кріпленні матриці 1 до корпусу за допомогою пружного 6 і демпфуючого 7 елементів, що дозволяє матриці виконувати зворотно-поступальні рухи під дією пульсацій тиску розплаву. Це автоматично змінює поперечний переріз каналу 4, гасить вискоеластичні коливання потоку та запобігає утворенню дефектів поверхні типу «акуляча шкіра».

Для головок екструдерів ПВХ-труб запропоноване рішення має особливу практичну цінність. Пульсації розплаву ПВХ часто призводять до нерівномірності товщини стінки труби та поверхневих дефектів. Застосування пружно-демпфуючого кріплення матриці дозволяє стабілізувати тиск і швидкість потоку в формуючому

засорі, підвищити рівномірність стінки труби по перерізу та зменшити брак без ускладнення конструкції головки або додаткових систем регулювання.

Патент UA 16817 U «КІЛЬЦЕВА ЕКСТРУЗІЙНА ГОЛОВКА» [11]

Опис патенту. Кільцева екструзійна головка призначена для виготовлення трубчастих і профільних виробів з термопластичних полімерів. Головка містить корпус 1, дорн 2, встановлений на дорнотримачі 3, і канал 4 для протікання розплаву з вихідною ділянкою 5. Між дорнотримачем 3 та вихідною ділянкою 5 каналу встановлені з можливістю колового руху тіла обертання 6 (кульки або ролики), об'єднані сепаратором 7, який пов'язаний з лопатями 8. Лопаті 8 можуть розміщуватися в проміжках між тілами обертання, перед ними або за ними. Тіла обертання можуть мати наскрізні отвори для зменшення гідравлічного опору.

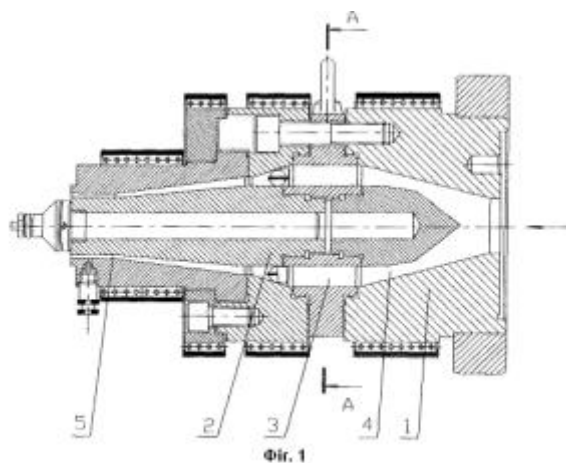


Рисунок 4.4 – Приклад конструктивного виконання кільцевої екструзійної головки

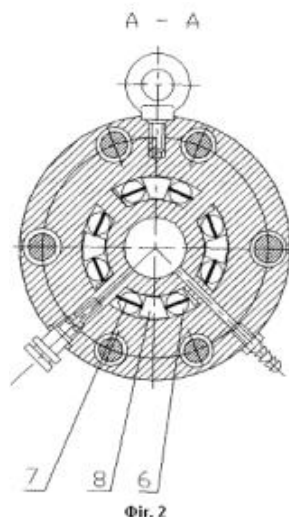


Рисунок 4.5 – Розріз А-А кільцевої екструзійної головки

Головка працює за рахунок того, що лопаті 8 під дією потоку розплаву приводять у коловий рух сепаратор 7 і тіла обертання 6, що інтенсивно деформує та розмиває лінії зварення підпотоків розплаву після дорнотримача.

Аналіз патенту. Суть корисної моделі полягає в механічній активації потоку розплаву за допомогою обертових тіл 6 і лопатей 8, які без додаткового розширення каналу інтенсифікують деформацію та повне злиття ліній зварення, що виникають після ребер дорнотримача 3. Це забезпечує високу якість поверхні та міцність виробу при одночасному зменшенні габаритів і матеріалоємності головки.

Для головок екструдерів ПВХ-труб запропоноване рішення є особливо актуальним. Лінії зварення після дорнотримача в трубних головках часто стають зоною концентрації напружень і причиною зниження довговічності труби. Вбудовування обертових елементів з лопатями дозволяє ефективно усувати ці дефекти безпосередньо в формуючому каналі, підвищувати рівномірність товщини стінки, поліпшувати зовнішній вигляд і механічні характеристики ПВХ-труб без ускладнення конструкції або збільшення гідравлічного опору головки.

4.1 Обґрунтування запропонованої модернізації

Патент CN 118219528 А «ФОРМА ДЛЯ СПІЛЬНОЇ ЕКСТРУЗІЇ ДВОШАРОВИХ ТРУБ ТА СПОСІБ ФОРМУВАННЯ ТРУБ»

Опис патенту. Форма для спільної екструзії двошарових труб призначена для одночасного формування внутрішнього та зовнішнього шарів труби з механічним замиканням для підвищення міцності з'єднання шарів. Форма включає перехідну втулку 1 з першим впускним отвором 101 для внутрішнього шару, розподільну пластину 2 з каналами 201, двошарову форму з замиканням 3 (з'єднувальне кільце 301 та напрямний циліндр 302 з поздовжніми пазами 303 і відповідними виступами 304 на внутрішній стінці), стискальну втулку 4 з другим впускним отвором 401 для зовнішнього шару, матрицю 5, сердечник 7 та фіксований сердечник 8. Внутрішній шар формується в каналі між напрямним циліндром 302 і сердечником, зовнішній - між напрямним циліндром і матрицею. Пази 303 на зовнішній поверхні напрямного циліндра створюють на внутрішньому шарі виступи, а на зовнішньому - відповідні заглиблення, що забезпечують механічне замикання шарів. [12]

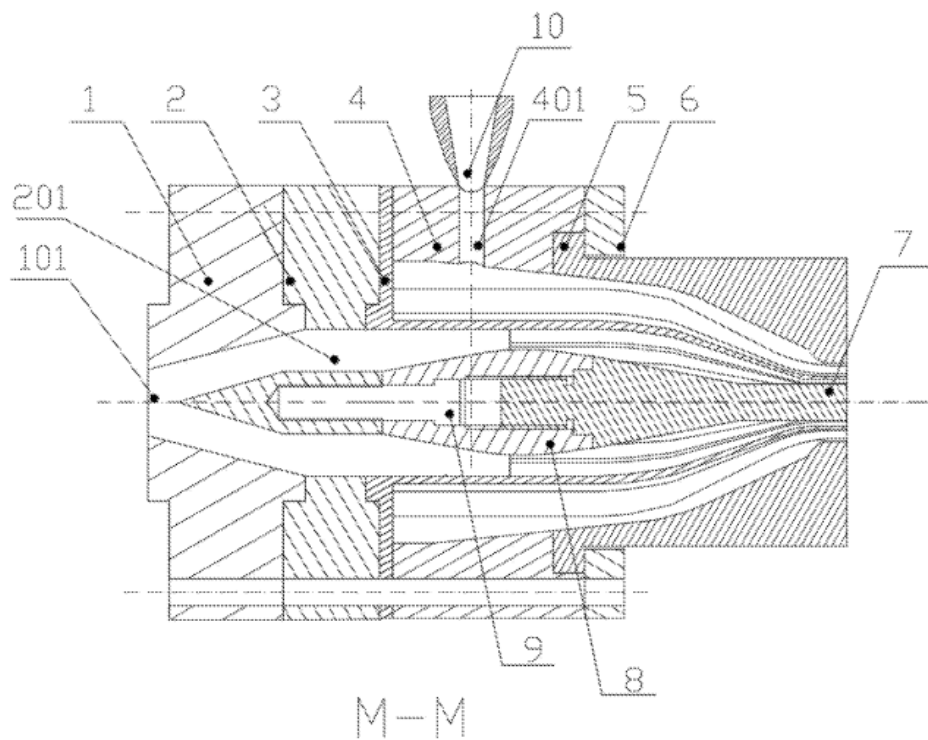


Рисунок 4.6 – Поздовжній розріз форми (М-М)

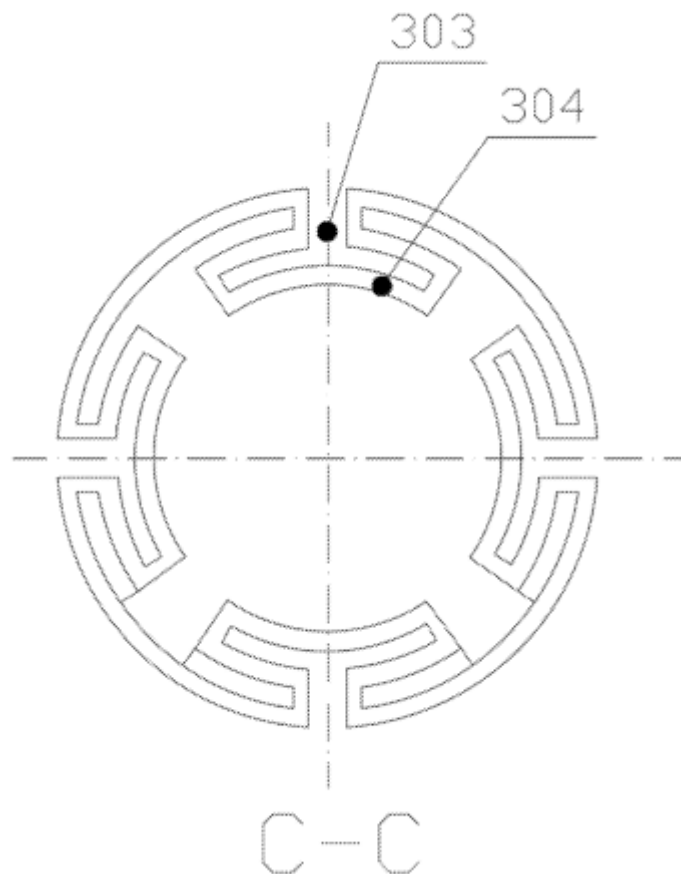


Рисунок 4.7 – Поперечний розріз напрямного циліндра з пазами та виступами (С-С)

Аналіз патенту. Суть корисної моделі полягає в спеціальній конструкції напрямного циліндра 302 двошарової форми з замиканням 3, який має поздовжні пази 303 (з розширенням у вигляді замка) та відповідні виступи 304. Це забезпечує

механічне замикання внутрішнього та зовнішнього шарів труби безпосередньо під час екструзії, значно підвищуючи міцність з'єднання порівняно зі звичайним адгезійним поєднанням.

Для головок екструдерів ПВХ-труб запропоноване рішення має високу практичну цінність. Воно дозволяє ефективно вирішувати проблему деламінації шарів у багатошарових ПВХ-трубах (особливо при використанні різномірних матеріалів або рециклованого ПВХ), забезпечуючи механічне замикання шарів без додаткових клеїв чи адгезивів. Принцип защемлення може бути адаптований для співекструзійних головок ПВХ-труб з метою створення надійних дво- або багатошарових конструкцій (наприклад, з внутрішнім шаром з переробленого ПВХ та зовнішнім - з нового матеріалу), що підвищить довговічність, герметичність і механічні характеристики труб.

Висновок щодо вибору патенту CN 118219528 A

Для аналітичного огляду в рамках теми «Головка екструдера для ПВХ-труб» обрано патент CN 118219528 A «Форма для спільної екструзії двошарових труб та спосіб формування труб» як найбільш релевантний і перспективний.

На відміну від попередньо розглянутих корисних моделей, які стосувалися переважно одношарових конструкцій, регулювання зазору, введення добавок чи усунення окремих дефектів потоку, даний патент пропонує принципово нове рішення саме для співекструзійних головок двошарових (багатошарових) труб. Запропонована конструкція з використанням двошарової форми з замиканням шляхом створення на внутрішньому шарі виступів, а на зовнішньому - відповідних пазів-замків забезпечує механічне блокування шарів безпосередньо в процесі екструзії. Це кардинально підвищує міцність з'єднання шарів порівняно зі звичайним адгезійним або тепловим поєднанням [2].

Для виробництва ПВХ-труб таке рішення особливо актуальне, оскільки дозволяє:

- надійно поєднувати шари з різномірних матеріалів (наприклад, внутрішній шар з вторинного ПВХ і зовнішній - з первинного або модифікованого);

- ефективно використовувати рециклований матеріал без ризику деламінації;

отримувати труби з підвищеною довговічністю, герметичністю та механічною стійкістю.

Таким чином, патент CN 118219528 А обрано тому, що він безпосередньо відповідає сучасним вимогам до головок екструдерів ПВХ-труб - забезпеченню високої адгезії та довговічності багатошарових конструкцій - і може слугувати технічною основою для подальшого вдосконалення вітчизняних співекструзійних головок.

5 ПРОЕКТУВАННЯ БАЗОВОГО ТА МОДЕРНІЗОВАНОГО ВУЗЛА ОБЛАДНАННЯ

Для створення 3D-моделі екструзійної головки в системі SolidWorks 2022 використано спрощену геометрію. Зокрема, відмову від моделювання різьбових з'єднань зумовлено необхідністю усунення зайвих концентраторів напружень, що забезпечує коректність подальших розрахунків. Також деталі були об'єднані в цілі елементи, щоб зменшити кількість тіл при збірці.

Базова та модифікована модель відрізняються в процесі побудови на етапі створення геометрії матриці для Т-подібного защемлення. Подальші кроки до момента з матрицею спільні для обох екструзійних головок.

Процес побудови розпочато з деталей «Корпус» та «Фланець»: на основі ескізу (Sketch) (рис. 5.1) за допомогою операції «Revolve» сформовано тіло деталі (рис. 5.2).

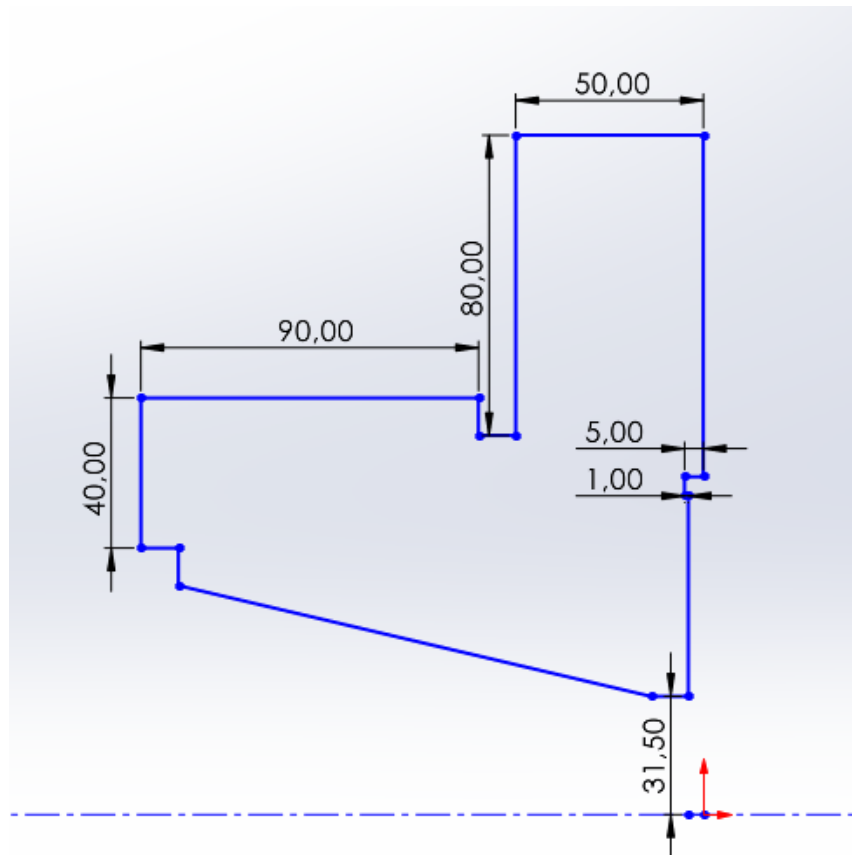


Рис. 5.1 – Ескіз Корпусу та Фланця

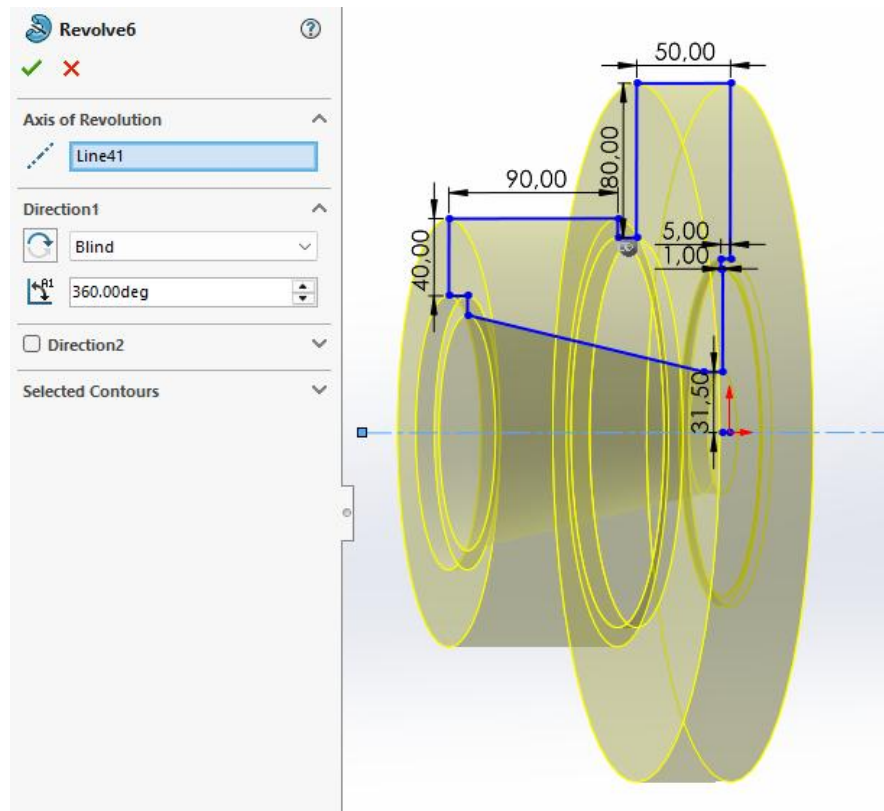


Рис. 5.2 – Корпус та фланець, операція «Revolve»

Наступна деталь «дорнотримач», «розсікач» та «дорн», об'єднанні в один ескіз (рис. 5.3). Основна геометрія створюється за допомогою інструменту «Revolve» (рис. 5.4), ребра жорсткості за допомогою «Cut Extrude» (рис. 5.5)

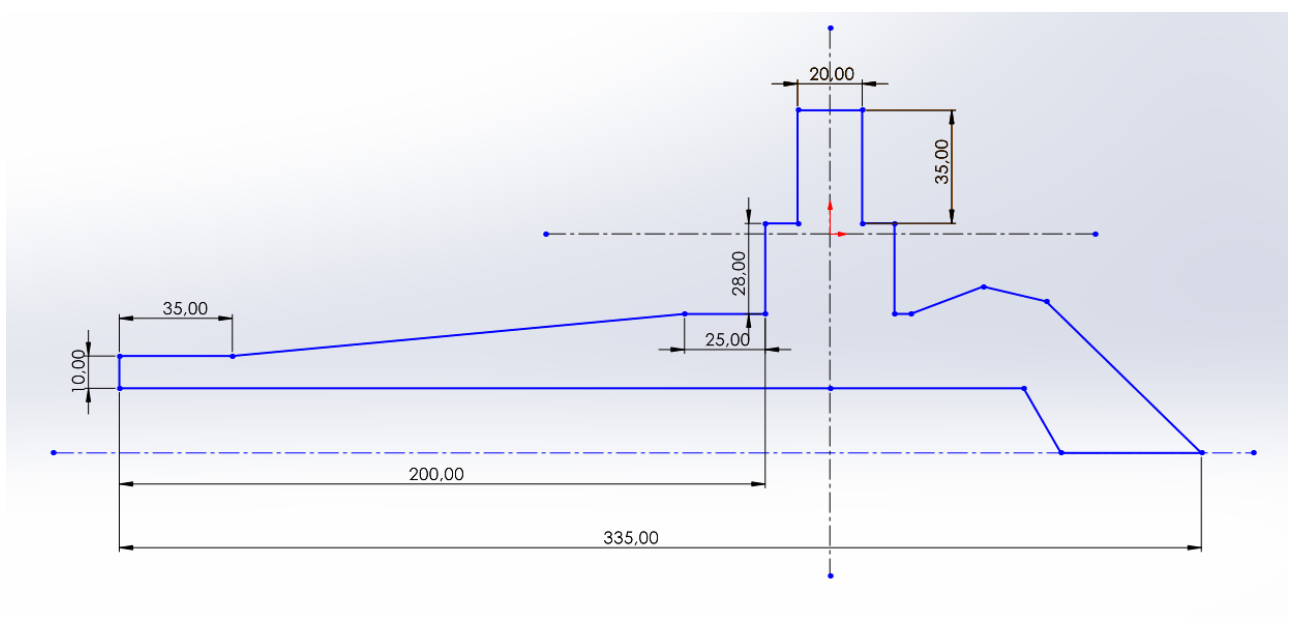


Рис. 5.3 – Ескіз дорнотримача, розсікача та дорну

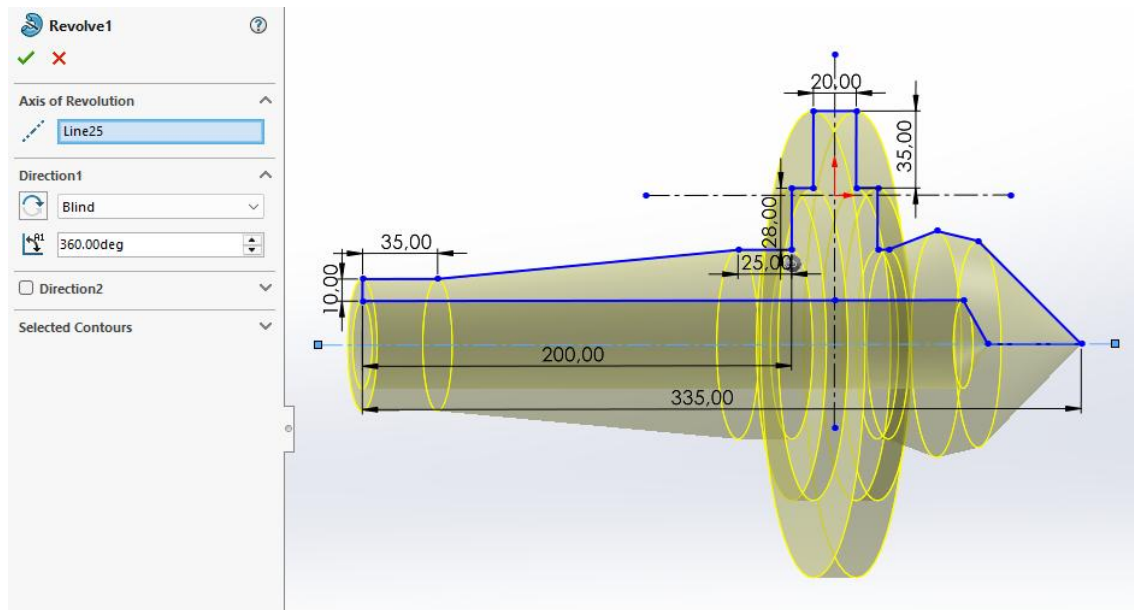


Рис. 5.4 – Операція «Revolve»

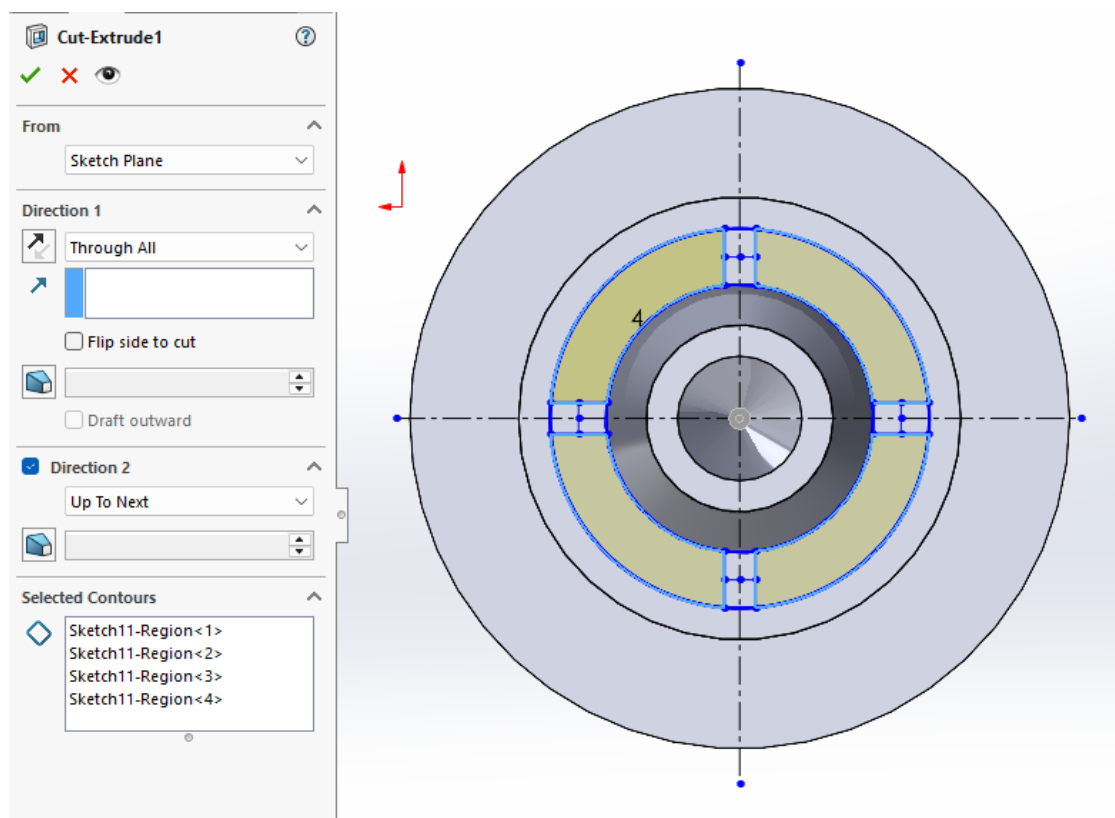


Рис. 5.5 – Ребра жорсткості, операція «Cut Extrude»

Наступний крок, побудувати деталь «матриця», для базової та модернізованої головки екструдера.

Побудова починається з ескізу матриці (рис. 5.6) та створення тіла за допомогою «Revolve».

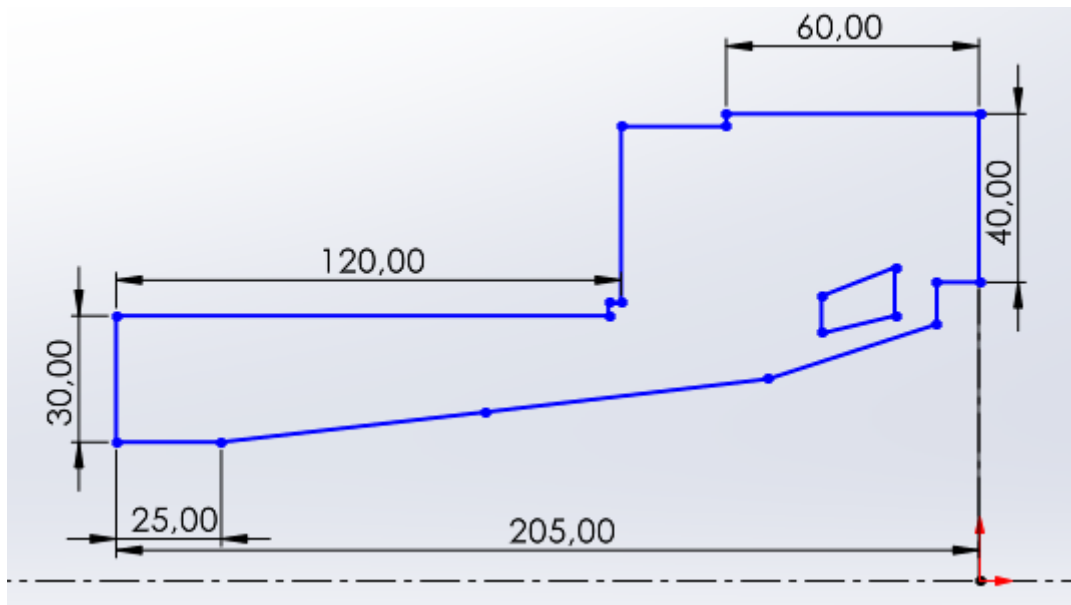


Рис. 5.6 – Ескіз базової матриці

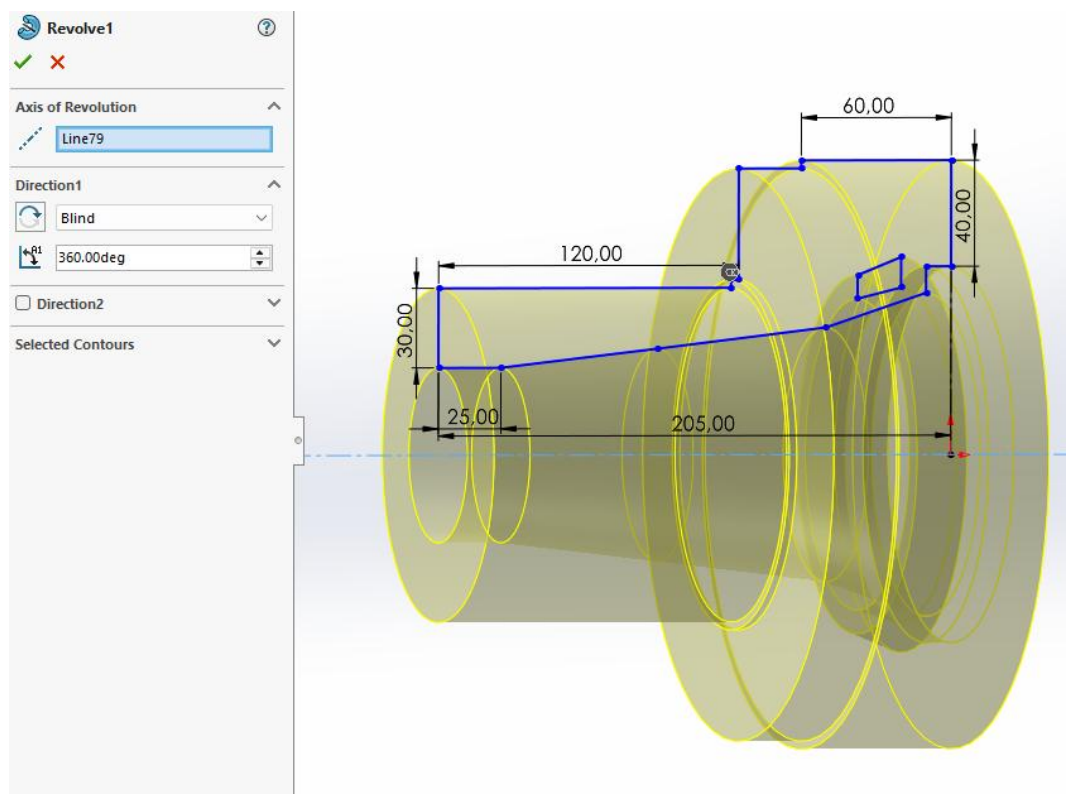


Рис. 5.7 - Базова матриця, операція «Revolve»

Після створення базової матриці, в ній потрібно зробити канал для матеріалу. Для цього використаємо операцію «Loft Cut» (рис. 5.8).

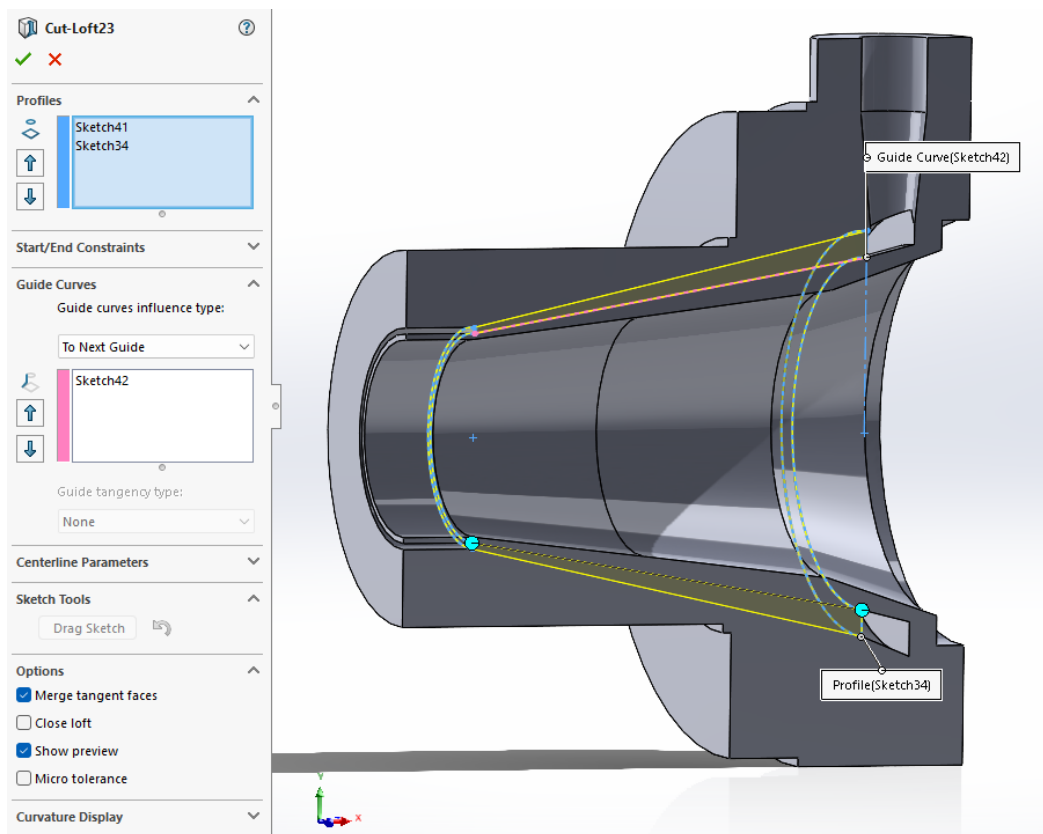


Рис. 5.8 – Формування каналу, операція «Loft Cut»

Наступний крок, додати корпус та фланець для додаткового каналу, використовуючи операцію «Boss Extrude» (рис. 5.9).

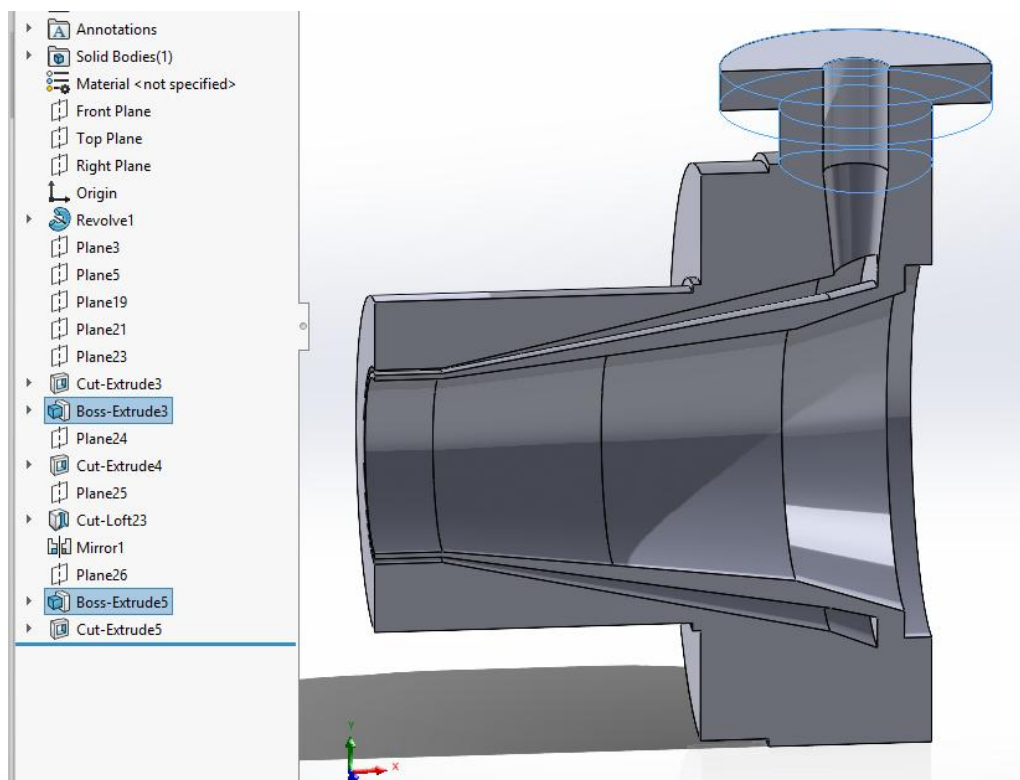


Рис. 5.9 – Корпус та фланець додаткового каналу, «Boss Extrude»

Останній крок для базової екструзійної головки – збірка (рис. 5.10).

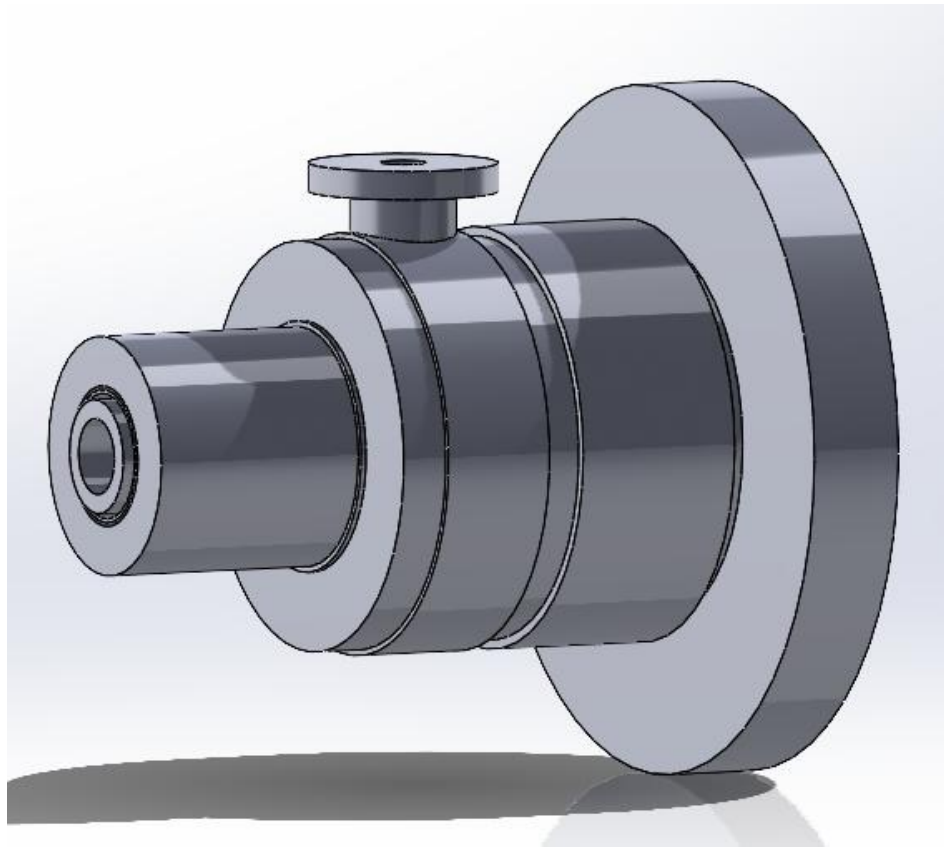


Рис. 5.10 – Базова екструзійна головка в збірці

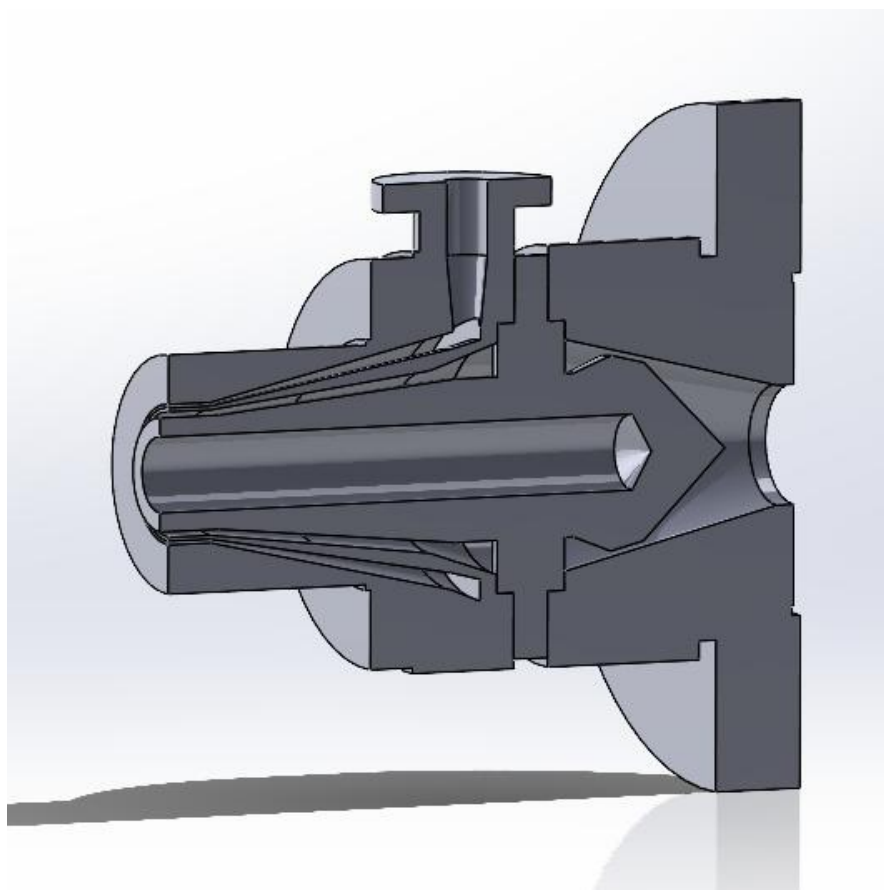


Рис. 5.11 – Розріз базової екструзійної головки в збірці

Моделювання матриці модернізованої головки екструдера. Основна ідея модернізованої головки полягає в Т-подібному заземленні, щоб отримати його потрібно створити матрицю з необхідною геометрією. Розпочнемо з ескізу модернізованої головки (рис. 5.11).

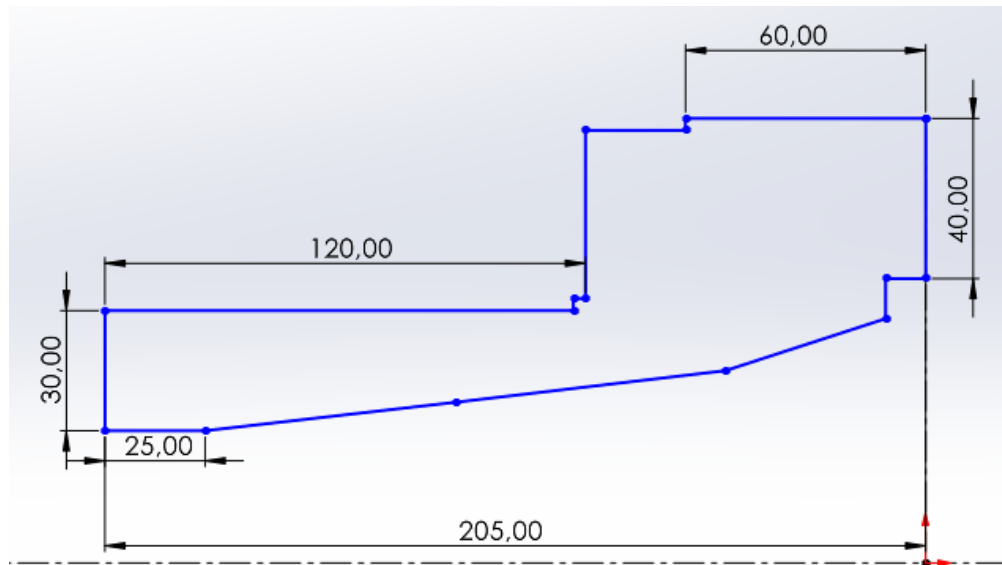


Рис. 5.11 - Ескіз модернізованої матриці

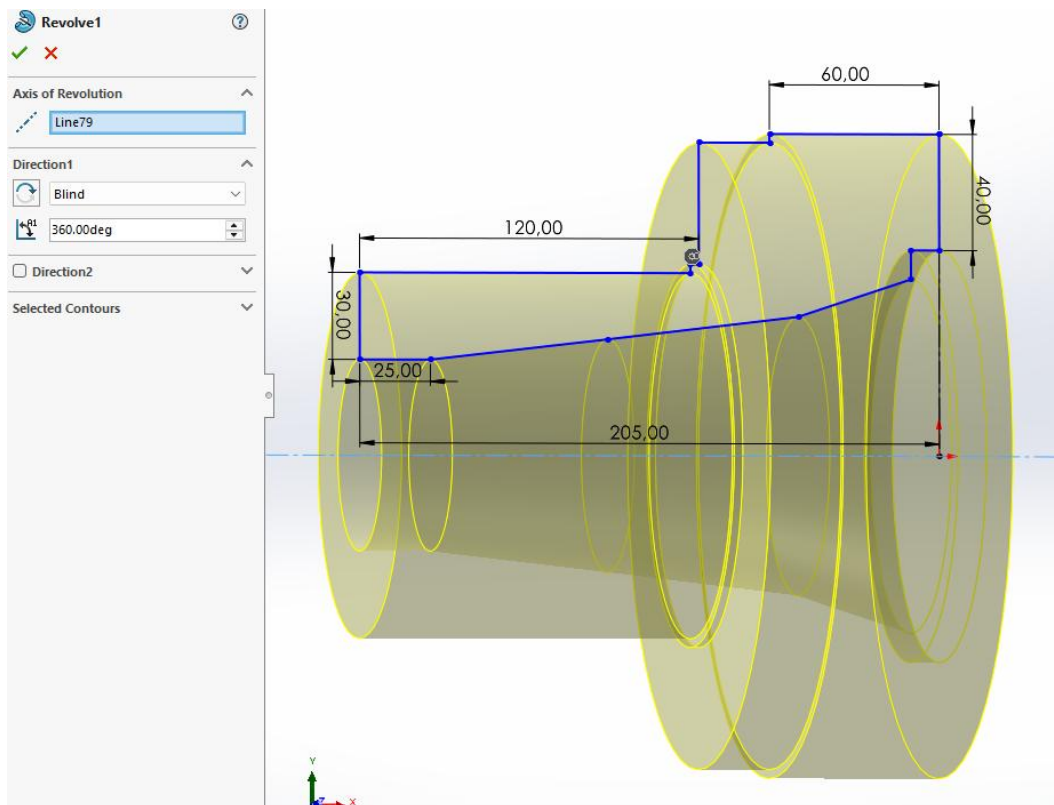


Рис. 5.12 - Модернізована матриця, операція «Revolve»

Після створення модернізованої матриці, в ній потрібно зробити канали для матеріалу. Для цього використаємо операцію «Loft Cut» та два Sketch, для зовнішнього каналу (рис. 5.13) та для внутрішнього (рис. 5.14).

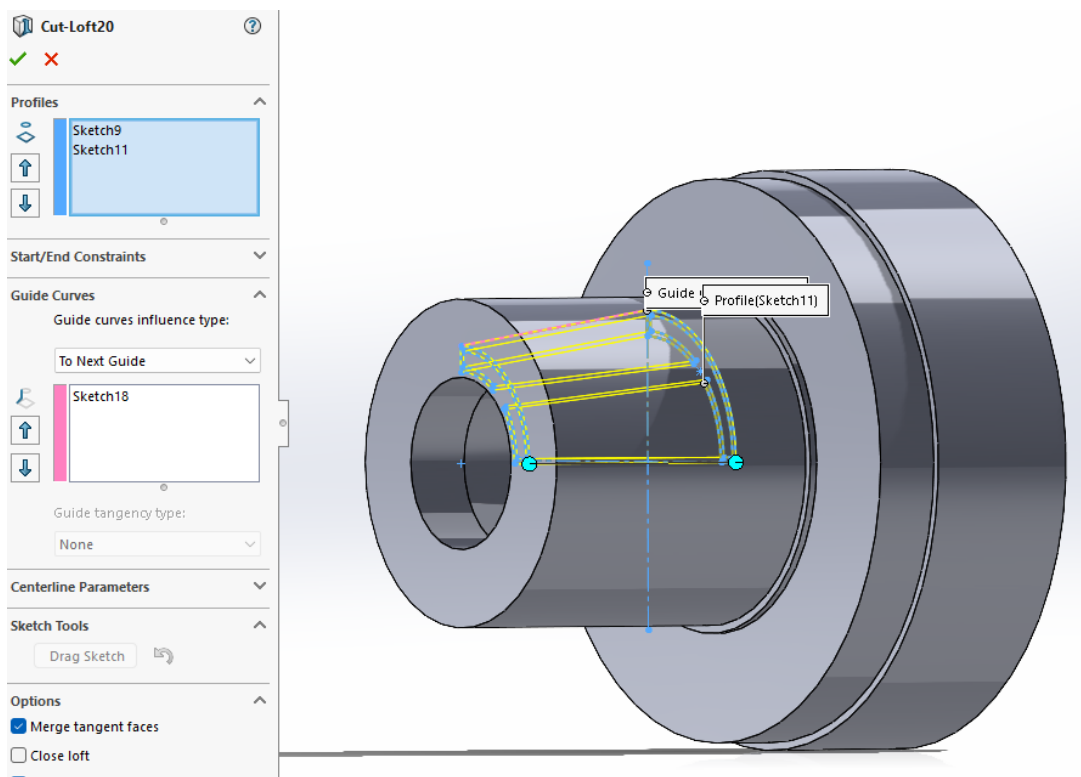


Рис. 5.13 – Зовнішній канал, операція «Loft Cut»

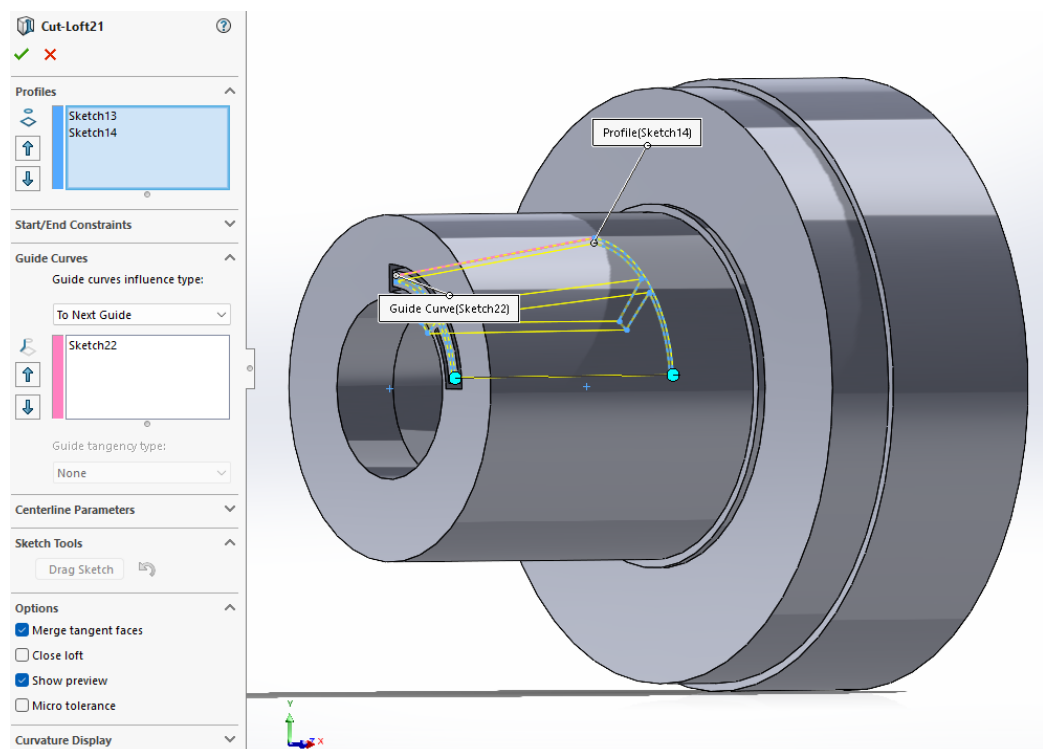


Рис. 5.14 – Внутрішній канал, операція «Loft Cut»

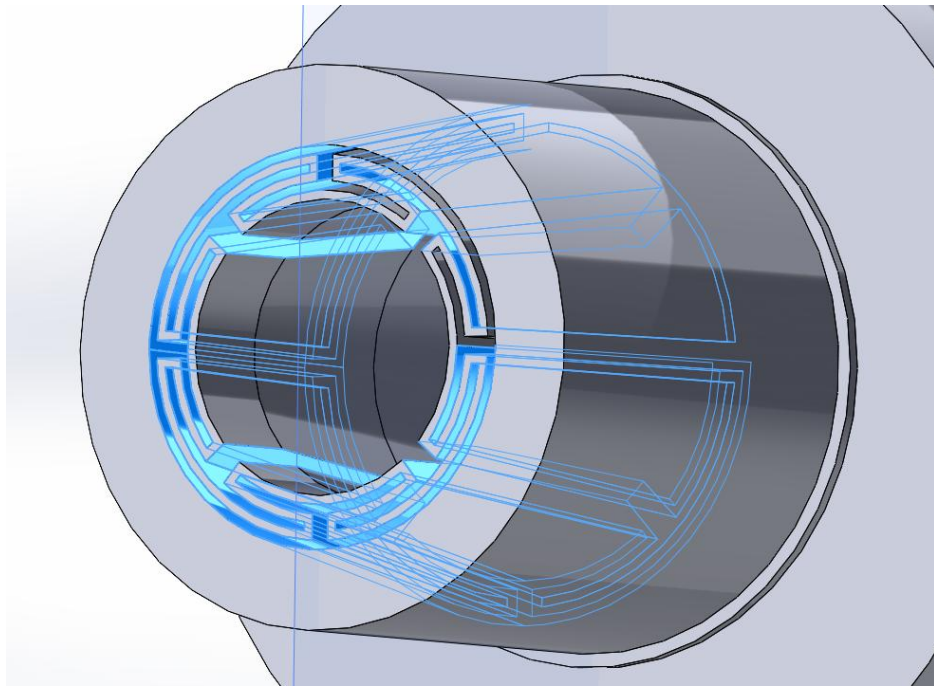


Рис. 6.15 – Модернізована матриця, Т-подібне заземлення

Наступний крок, додати корпус та фланець для додаткового каналу, використовуючи операцію «Boss Extrude» (рис. 5.16).

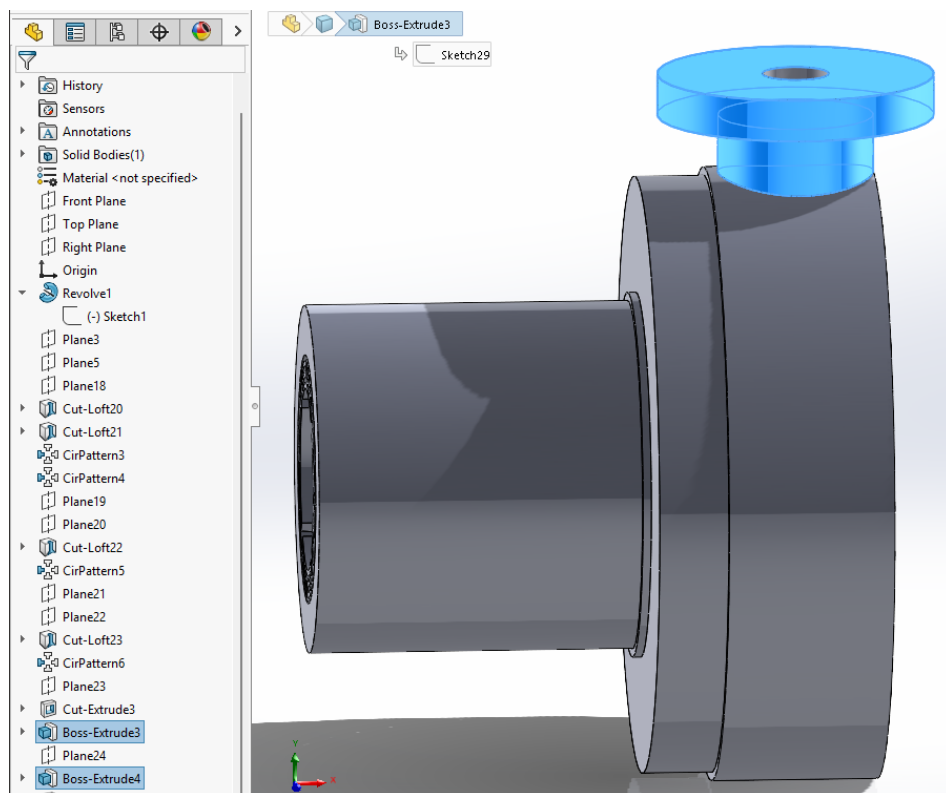


Рис. 6.16 – Корпус та фланець додаткового каналу, «Boss Extrude»

Останній крок для модернізованої екструзійної головки – збірка (рис. 5.17).

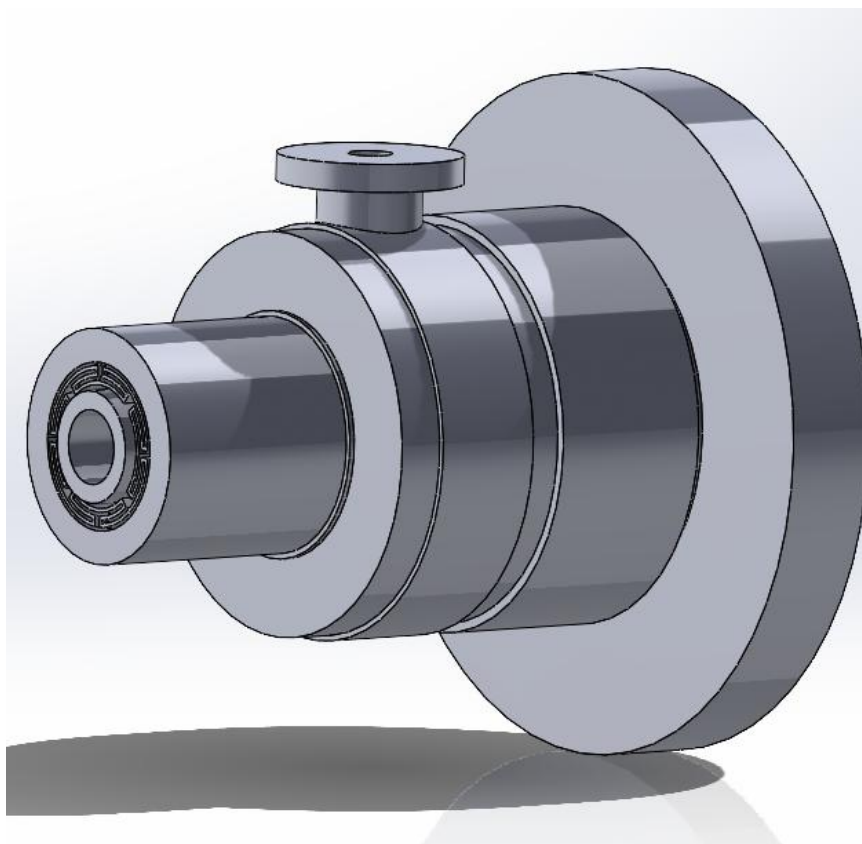


Рис. 5.17 – Базова екструзійна головка в збірці

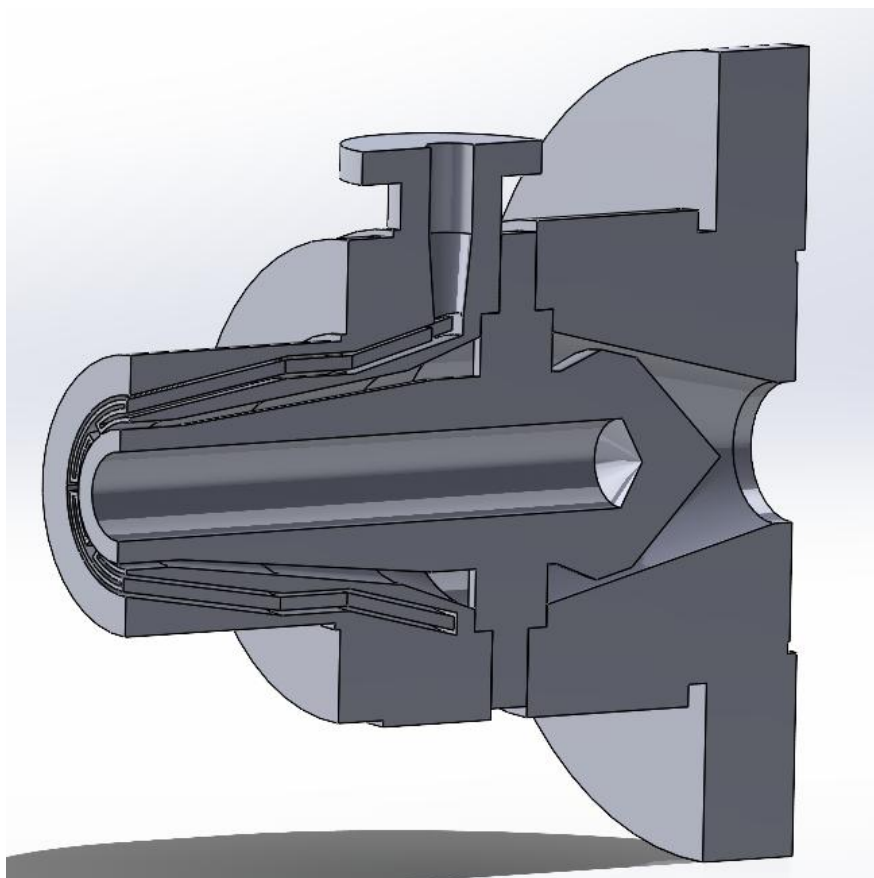


Рис. 5.18 – Розріз базової екструзійної головки в збірці

6 РОЗРАХУНКИ

6.1 Параметричні розрахунки

Параметричні розрахунки екструдера включають визначення геометричних характеристик черв'яка, продуктивності машини, перепаду тиску в формуючій головці та потужності приводу на основі заданих вихідних даних. Вихідними даними для розрахунку є діаметр черв'яка $D = 63$ мм, відношення робочої довжини до діаметра $\frac{L}{D} = 24$, матеріал переробки – полівінілхлорид, зовнішній діаметр труби $d_{\text{зовн}} = 32$ мм, товщина стінки $s = 3$ мм. Частота обертання черв'яка приймається $n = 90$ об/хв, що забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю та якістю перемішування ПВХ-композиту без ризику термодеструкції. Температура розплаву на виході з екструдера становить $T = 180^\circ\text{C}$, при якій динамічна в'язкість ПВХ $\eta = 1000$ Па·с, а густина розплаву $\rho = 1350$ кг/м³ [1].

Розрахунок геометричних параметрів черв'яка починається з визначення робочої довжини шнека, яка обчислюється множенням діаметра на задане відношення. Робоча довжина черв'яка визначається за формулою:

$$L = \left(\frac{L}{D}\right) \times D = 24 \times 0,063 = 1,512 \text{ м}$$

Крок нарізки черв'яка в зоні завантаження приймається рівним діаметру $t = D = 63$ мм, а кут підйому гвинтової лінії розраховується за формулою:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{t}{\pi D}\right) = \arctan\left(\frac{0,063}{3,14} \times 0,063\right) = \arctan(0,318) = 17,7^\circ$$

Глибина каналу в зоні завантаження для ПВХ приймається $h_1 = 0,13D = 0,13 \times 63 = 8,2$ мм, а в зоні дозування $h_3 = 0,055D = 0,055 \times 63 = 3,5$ мм, що забезпечує ступінь стиснення $\varepsilon = \frac{h^1}{h^3} = \frac{8,2}{3,5} = 2,34$. Ширина гребеня черв'яка приймається $e = 0,1D = 0,1 \times 63 = 6,3$ мм, а радіальний зазор між гребенем та внутрішньою поверхнею корпусу $\delta = 0,004D = 0,004 \times 63 = 0,25$ мм. Діаметр внутрішнього каналу черв'яка для розміщення системи терморегулювання становить $d_0 = 0,35D = 0,35 \times 63 = 22$ мм.

Розподіл довжини черв'яка за функціональними зонами здійснюється відповідно до рекомендацій [3] для переробки ПВХ, де зона завантаження становить 20-25% загальної довжини, зона плавлення 40-50%, зона дозування 30-35%. Довжина зони завантаження $L_1 = 0,25L = 0,25 \times 1,512 = 0,378$ м, що відповідає 6

виткам черв'яка. Довжина зони плавлення $L_2 = 0,45L = 0,45 \times 1,512 = 0,680$ м (10,8 витків), а довжина зони дозування $L_3 = 0,30L = 0,30 \times 1,512 = 0,454$ м (7,2 витка). Зміна глибини каналу в зоні плавлення відбувається за лінійним законом від $h_1 = 8,2$ мм до $h_3 = 3,5$ мм на довжині L_2 . Таблиця 6.1 наводить геометричні параметри черв'яка по зонах. [3]

Таблиця 6.1

Геометричні параметри черв'яка екструдера

Параметр	Зона 1 (завантаження)	Зона 2 (плавлення)	Зона 3 (дозування)
Довжина, мм	378	680	454
Кількість витків	6	10,8	7,2
Глибина каналу, мм	8,2	8,2→3,5	3,5
Крок нарізки, мм	63	63	63
Ширина гребеня, мм	6,3	6,3	6,3

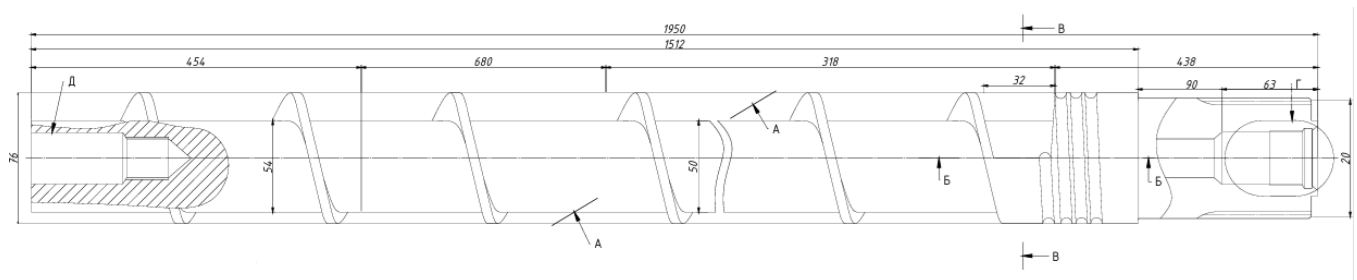


Рисунок 6.1 – Конструкція черв'яка екструдера з основними розмірами

На рисунку 6.1 представлено робоче креслення черв'яка з основними конструктивними розмірами. Загальна довжина черв'яка становить 1950 мм при робочій довжині 1512 мм. Діаметр черв'яка складає $\varnothing 400$ мм з діаметром кореня витків $\varnothing 600$ мм у зоні завантаження. Передня частина черв'яка має конічну форму з кутом $22 \times 45^\circ$ для забезпечення плавного переходу до формувальної головки. Внутрішній канал діаметром 30-25 мм призначений для циркуляції охолоджуючої рідини, що запобігає перегріву полімеру в зоні дозування. Геометрія черв'яка розрахована на забезпечення оптимальної продуктивності лінії та якості змішування поліетиленової композиції.

Розрахунок продуктивності екструдера [5] базується на визначенні об'ємної витрати розплаву, яка складається з прямого потоку, зворотного потоку та потоку

витікання через радіальний зазор. Теоретична об'ємна продуктивність в зоні дозування визначається за формулою:

$$Q_T = \frac{(\pi^2 \times D^2 \times h^3 \times n \times \sin(\varphi) \times \cos(\varphi))}{2} i$$
$$Q_T = \frac{(3,14^2 \times 0,063^2 \times 0,0035 \times 1,5 \times \sin(17,7^\circ) \times \cos(17,7^\circ))}{2} = 5,12 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$$

Де:

n переведено в об/с

$$n = 90/60 = 1,5 \text{ об/с}$$

Об'ємна витрата зворотного потоку, викликана перепадом тиску, розраховується за формулою:

$$Q_{\Pi} = \frac{(\pi \times D \times h^3 \times \Delta p \times \sin^2(\varphi))}{(12 \times \eta \times L^3)}$$

Де:

Δp – перепад тиску в зоні дозування, Па

Приймаючи $\Delta p = 35 \text{ МПа} = 35 \times 10^6 \text{ Па}$, отримуємо:

$$Q_{\Pi} = \frac{(3,14 \times 0,063 \times 0,0035^3 \times 35 \times 10^6 \times \sin^2(17,7^\circ))}{(12 \times 1000 \times 0,454)} = 1,24 \times 10^{-5} / \text{с}$$

Дійсна об'ємна продуктивність з урахуванням коефіцієнта $\varphi_K = 0,85$ для ПВХ становить:

$$Q = \varphi_K \times (Q_T - Q_{\Pi}) = 0,85 \times (5,12 \times 10^{-5} - 1,24 \times 10^{-5}) = 3,30 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$$

Масова продуктивність екструдера визначається множенням об'ємної продуктивності на густину розплаву:

$$G = Q \times \rho = 3,30 \times 10^{-5} \times 1350 = 0,0445 \text{ кг/с} = 160 \text{ кг/год}$$

Розрахунок коефіцієнта геометричної форми [3] формуючої головки необхідний для визначення перепаду тиску при течії розплаву через кільцеву щілину. Внутрішній діаметр труби розраховується як $d_{\text{вн}} = d_{\text{зовн}} - 2s = 32 - 2 \times 3 = 26 \text{ мм}$. Середній діаметр формуючого каналу $D_{\text{ср}} = \frac{d_{\text{зовн}} + d_{\text{вн}}}{2} = \frac{32 + 26}{2} = 29 \text{ мм} = 0,029 \text{ м}$. Висота кільцевого зазору з урахуванням коефіцієнта роздуття $K = 1,2$ для ПВХ визначається за формулою:

$$h^0 = \frac{s}{K} = \frac{0,003}{1,2} = 0,0025 \text{ м} = 2,5 \text{ мм}$$

Довжина формуючої зони головки приймається $L_r = 10h^0 = 10 \times 2,5 = 25$ мм = 0,025 м. Коефіцієнт геометричної форми головки для кільцевого каналу розраховується за формулою:

$$K_r = \frac{(\pi \times D_{cp} \times h^{03})}{(12 \times L_r)} = \frac{(3,14 \times 0,029 \times 0,0025^3)}{(12 \times 0,025)} = 1,50 \times 10^{-9} \text{ м}^3$$

Перепад тиску в формуючій головці визначається за рівнянням:

$$\Delta p_r = \frac{Q}{\left(\frac{K_r}{\eta}\right)} = 3,30 \times \frac{10^{-5}}{\left(1,50 \times \frac{10^{-9}}{1000}\right)} = 22 \times 10^6 \text{ Па} = 22 \text{ МПа}$$

Розрахунок потужності приводу екструдера включає визначення потужності на переміщення матеріалу вздовж черв'яка та потужності на продавлювання розплаву через головку. Потужність на тертя та переміщення матеріалу в зоні дозування визначається за формулою:

$$N^1 = \frac{(\pi^2 \times D^2 \times h^3 \times n^2 \times \eta \times L^3)}{(2 \times \cos(\varphi))} = \frac{(3,14^2 \times 0,063^2 \times 0,0035 \times 1,5^2 \times 1000 \times 0,454)}{(2 \times \cos(17,7^\circ))} = 1850 \text{ Вт}$$

Потужність на створення тиску розраховується за формулою:

$$N^2 = Q \times \Delta p = 3,30 \times 10^{-5} \times 35 \times 10^6 = 1155 \text{ Вт}$$

Загальна потужність на валу черв'яка з урахуванням коефіцієнта запасу $k = 1,2$ становить:

$$N = k \times (N^1 + N^2) = 1,2 \times (1850 + 1155) = 3606 \text{ Вт} \approx 3,6 \text{ кВт}$$

Потужність електродвигуна з урахуванням ККД редуктора $\eta_{ред} = 0,9$ визначається як:

$$N_{дв} = \frac{N}{\eta_{ред}} = \frac{3600}{0,9} = 4000 \text{ Вт} = 4 \text{ кВт}$$

Приймається електродвигун потужністю $N_{дв} = 5,5$ кВт з запасом на пускові режими.

Параметричні розрахунки екструдера дозволяють визначити основні конструктивні та технологічні характеристики обладнання, що забезпечують задану продуктивність та якість перероблення полівінілхлориду. Розрахунок геометричних параметрів черв'яка з урахуванням властивостей матеріалу та вимог до процесу екструзії визначає оптимальні значення глибини каналу, кроку нарізки та ступеня стиснення для ефективного плавлення без деструкції полімеру. Визначення продуктивності на основі теоретичних моделей течії розплаву в каналі черв'яка та з урахуванням зворотних потоків від перепаду тиску дозволяє прогнозувати масову

витрату матеріалу при різних режимах роботи обладнання. Розрахунок перепаду тиску в формуючій головці та потужності приводу забезпечує вибір електродвигуна з необхідними характеристиками для реалізації заданих технологічних параметрів. Результати параметричних розрахунків є основою для проєктування екструдера та подальшої перевірки вузлів на міцність і жорсткість.

6.2 Розрахунки черв'яка на міцність

Розрахунок черв'яка на міцність включає перевірку напружень від крутного моменту, осьової сили та згинальних навантажень, що виникають під час експлуатації екструдера. Матеріал черв'яка – азотована сталь 38Х2МЮА [8] з межею текучості $\sigma_T = 835$ МПа, межею міцності $\sigma_B = 1000$ МПа та допустимим напруженням $[\sigma] = 200$ МПа для робочих умов. Крутний момент на валу черв'яка визначається потужністю приводу та частотою обертання за формулою:

$$M_{кр} = \frac{(9550 \times N)}{n} = \frac{(9550 \times 3,6)}{90} = 382 \text{ Н} \times \text{м}$$

Осьова сила розпору, що діє на черв'як внаслідок тиску розплаву, розраховується за формулою:

$$F_a = \Delta p \times \pi \times \frac{D^2}{4} = 35 \times 10^6 \times 3,14 \times \frac{0,063^2}{4} = 109000 \text{ Н} = 109 \text{ кН}$$

Діаметр внутрішнього каналу черв'яка $d_0 = 22$ мм визначає площу поперечного перерізу стрижня, на який діють навантаження.

Перевірка черв'яка на міцність від дії крутного моменту здійснюється за гіпотезою найбільших дотичних напружень для порожнистого валу. Момент опору при крученні для кільцевого перерізу визначається за формулою:

$$W_{кр} = \pi \times \frac{(D^4 - d_0^4)}{(16 \times D)} = 3,14 \times \frac{(0,063^4 - 0,022^4)}{(16 \times 0,063)} = 1,89 \times 10^{-5} \text{ м}^3$$

Дотичні напруження від крутного моменту розраховуються за формулою:

$$\tau_{кр} = \frac{M_{кр}}{W_{кр}} = \frac{382}{(1,89 \times 10^{-5})} = 20,2 \times 10^6 \text{ Па} = 20,2 \text{ МПа}$$

Допустимі дотичні напруження для матеріалу черв'яка становлять $[\tau] = 0,5 \times [\sigma] = 0,5 \times 200 = 100$ МПа. Умова міцності $\tau_{кр} \leq [\tau]$ виконується: $20,2 \text{ МПа} < 100 \text{ МПа}$, що підтверджує достатність обраного діаметра внутрішнього каналу. Коефіцієнт

запасу міцності за дотичними напруженнями становить $n_\tau = \frac{[\tau]}{\tau_{кр}} = \frac{100}{20,2} = 4,95$, що є прийнятним для даного типу обладнання.

Нормальні напруження від дії осьової сили визначаються як відношення сили до площі поперечного перерізу черв'яка. Площа кільцевого перерізу розраховується за формулою:

$$A = \pi \times \frac{(D^2 - d^{02})}{4} = 3,14 \times \frac{(0,063^2 - 0,022^2)}{4} = 2,73 \times 10^{-3} \text{ м}^2$$

Нормальні напруження від осьової сили визначаються як:

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} = \frac{109000}{(2,73 \times 10^{-3})} = 39,9 \times 10^6 \text{ Па} = 39,9 \text{ МПа}$$

Умова міцності $\sigma_a \leq [\sigma]$ виконується: $39,9 \text{ МПа} < 200 \text{ МПа}$. Коефіцієнт запасу міцності за нормальними напруженнями $n_\sigma = \frac{[\sigma]}{\sigma_a} = \frac{200}{39,9} = 5,01$. Сумарні еквівалентні напруження за гіпотезою енергії формозміни визначаються за формулою:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3 \times \tau_{кр}^2} = \sqrt{39,9^2 + 3 \times 20,2^2} = \sqrt{1592 + 1224} = 53,0 \text{ МПа}$$

Умова міцності $\sigma_{\text{екв}} \leq [\sigma]$ виконується з коефіцієнтом запасу $n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\text{екв}}} = \frac{200}{53,0} = 3,77$.

Розрахунок черв'яка на стійкість необхідний для перевірки можливості втрати стійкості під дією стискаючої осьової сили. Черв'як розглядається як стрижень, защемлений одним кінцем та вільно обпертий другим, що відповідає коефіцієнту приведення довжини $\mu = 0,7$. Приведена довжина черв'яка визначається як $l_{\text{пр}} = \mu \times L = 0,7 \times 1,512 = 1,058 \text{ м}$. Момент інерції кільцевого перерізу відносно нейтральної осі розраховується за формулою:

$$I = \pi \times \frac{(D^4 - d^{04})}{64} = 3,14 \times \frac{(0,063^4 - 0,022^4)}{64} = 1,19 \times 10^{-7} \text{ м}^4$$

Радіус інерції перерізу визначається як:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{1,19 \times \frac{10^{-7}}{2,73} \times 10^{-3}} = 0,0066 \text{ м} = 6,6 \text{ мм}$$

Гнучкість стрижня розраховується за формулою:

$$\lambda = \frac{l_{\text{пр}}}{i} = \frac{1,058}{0,0066} = 160$$

Для сталі з $\sigma_T = 800$ МПа граничне значення гнучкості становить $\lambda_{гр} = 100$, отже $\lambda > \lambda_{гр}$, що означає необхідність розрахунку за формулою Ейлера. Ейлерова сила для випадку великої гнучкості визначається як:

$$F_{кр} = \frac{(\pi^2 \times E \times I)}{l_{пр}^2} = \frac{(3,14^2 \times 2,1 \times 10^{11} \times 1,19 \times 10^{-7})}{1,058^2} = 219000 \text{ Н} = 219 \text{ кН}$$

Де:

$E = 2,1 \times 10^{11}$ Па – модуль пружності сталі

Коефіцієнт запасу стійкості визначається як відношення критичної сили до діючої осьової сили:

$$n_{ст} = \frac{F_{кр}}{F_a} = \frac{219000}{109000} = 2,01$$

Нормативне значення коефіцієнта запасу стійкості для даного типу конструкцій становить $[n_{ст}] = 2,5\text{--}3,0$. Отриманий коефіцієнт $n_{ст} = 2,01$ є недостатнім, тому рекомендується збільшити діаметр внутрішнього каналу до $d_0 = 20$ мм або встановити проміжну опору черв'яка. При $d_0 = 20$ мм площа перерізу $A = 2,83 \times 10^{-3}$ м², момент інерції $I = 1,29 \times 10^{-7}$ м⁴, радіус інерції $i = 6,75$ мм, гнучкість $\lambda = 156,7$, критична сила $F_{кр} = 237$ кН, коефіцієнт запасу $n_{ст} = 2,17$. Для забезпечення нормативного коефіцієнта запасу рекомендується зменшити довжину вільного прольоту черв'яка шляхом встановлення проміжної опори в середині корпусу.

Перевірка черв'яка на жорсткість здійснюється визначенням кута закручування під дією крутного моменту та прогину від власної ваги. Кут закручування черв'яка на довжині L визначається за формулою:

$$\theta = \frac{(M_{кр} \times L)}{(G \times I_p)}$$

Де:

$G = 0,8 \times 10^{11}$ Па – модуль зсуву сталі

I_p – полярний момент інерції

Полярний момент інерції кільцевого перерізу розраховується як:

$$I_p = \pi \times \frac{(D^4 - d^4)}{32} = 3,14 \times \frac{(0,063^4 - 0,022^4)}{32} = 2,38 \times 10^{-7} \text{ м}^4$$

Кут закручування становить:

$$\theta = \frac{(382 \times 1,512)}{(0,8 \times 10^{11} \times 2,38 \times 10^{-7})} = 0,0303 \text{ рад} = 1,74^\circ$$

Допустимий кут закручування для черв'яків екструдерів становить $[\theta] = 0,25^\circ$ на 1 м довжини, тобто для $L = 1,512$ м допустимий кут $[\theta]_L = 0,25 \times 1,512 = 0,378^\circ$. Умова жорсткості не виконується: $\theta = 1,74^\circ > [\theta]_L = 0,378^\circ$, що вимагає збільшення діаметра внутрішнього каналу або використання жорсткішого матеріалу. Таблиця 6.2 наводить результати перевірочних розрахунків черв'яка при різних діаметрах внутрішнього каналу.

Таблиця 6.2

Результати розрахунків черв'яка на міцність та жорсткість

Параметр	d _o =22 мм	d _o =20 мм	d _o =18 мм	Норма
$\tau_{кр}$, МПа	20,2	19,5	18,7	≤ 100
σ_a , МПа	39,9	38,5	37,1	≤ 200
$\sigma_{екв}$, МПа	53,0	51,2	49,3	≤ 200
$n_{ст}$	2,01	2,17	2,35	$\geq 2,5$
θ , град	1,74	1,58	1,41	$\leq 0,378$

Розрахунок шліцьового з'єднання черв'яка з приводним валом виконується на зминання та зріз шліців при передачі крутного моменту. Приймається шліцьове з'єднання прямобічне з параметрами: $d = 32$ мм, $D_3 = 38$ мм, $b = 6$ мм, кількість шліців $z = 6$. Робоча висота шліца $h = 0,5 \times (D_3 - d) = 0,5 \times (38 - 32) = 3$ мм. Напруження зминання на бічних поверхнях шліців визначається за формулою:

$$\sigma_{зм} = \frac{(2 \times M_{кр})}{(z \times h \times l_{ш} \times d_{ср})}$$

Де:

$l_{ш} = 40$ мм – довжина шліцьового з'єднання

$d_{ср} = 0,5 \times (d + D_3) = 0,5 \times (32 + 38) = 35$ мм – середній діаметр

$$\sigma_{зм} = \frac{(2 \times 382)}{(6 \times 0,003 \times 0,040 \times 0,035)} = 30,3 \times 10^6 \text{ Па} = 30,3 \text{ МПа}$$

Допустиме напруження зминання для сталевого з'єднання $[\sigma_{зм}] = 100\text{--}150$ МПа. Умова міцності $\sigma_{зм} \leq [\sigma_{зм}]$ виконується: $30,3 \text{ МПа} < 100 \text{ МПа}$. Напруження зрізу шліців визначається як:

$$\tau_{зр} = \frac{M_{кр}}{(z \times b \times l_{ш} \times d_{ср})} = \frac{382}{(6 \times 0,006 \times 0,040 \times 0,035)} = 7,58 \times 10^6 \text{ Па} = 7,58 \text{ МПа}$$

Допустиме напруження зрізу $[\tau_{зр}] = 60\text{--}80$ МПа. Умова міцності $\tau_{зр} \leq [\tau_{зр}]$ виконується з великим запасом.

Перевірочні розрахунки черв'яка на міцність, стійкість та жорсткість підтверджують працездатність конструкції під дією експлуатаційних навантажень та відсутність ризику руйнування або недопустимих деформацій. Визначення напружень від крутного моменту, осьової сили розпору та їх комбінованої дії дозволяє оцінити запас міцності матеріалу черв'яка відносно допустимих значень для обраної сталі. Розрахунок на стійкість виявляє можливість втрати стійкості черв'яка як стрижня під дією стискаючої осьової сили та визначає необхідність встановлення проміжних опор для зменшення вільної довжини прогину. Перевірка на жорсткість показує величину кута закручування під дією крутного моменту та необхідність корекції діаметра внутрішнього каналу для забезпечення нормативних значень деформацій. Розрахунок шліцьового з'єднання на зминання та зріз підтверджує надійність передачі крутного моменту від приводного валу на черв'як без пошкодження елементів з'єднання під час тривалої експлуатації обладнання.

6.3 Тепловий розрахунок

Тепловий розрахунок екструдера включає визначення кількості теплоти, необхідної для нагрівання та плавлення полімеру, розподілу теплових потоків між зовнішнім нагріванням та внутрішнім тепловиділенням від дисипації енергії. Питома теплоємність твердого ПВХ становить $c_T = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{K}}$, питома теплоємність розплаву $c_p = 1900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times \text{K}}$, теплота плавлення $\lambda_{\text{пл}} = 100 \text{ кДж/кг}$, температура навколишнього середовища $T_0 = 20^\circ\text{C}$. Початкова температура гранул ПВХ приймається рівною температурі навколишнього середовища, кінцева температура розплаву $T_k = 180^\circ\text{C}$, температура плавлення $T_{\text{пл}} = 160^\circ\text{C}$. Масова продуктивність екструдера $G = 0,0445 \text{ кг/с}$ визначена в попередніх розрахунках [3].

Розрахунок загальної кількості теплоти для нагрівання та плавлення полімеру включає три етапи: нагрівання твердого матеріалу до температури плавлення, плавлення та нагрівання розплаву до робочої температури. Кількість теплоти на нагрівання твердого ПВХ від T_0 до $T_{\text{пл}}$ визначається за формулою:

$$Q^1 = G \times c_T \times (T_{\text{пл}} - T_0) = 0,0445 \times 1000 \times (160 - 20) = 6230 \text{ Вт}$$

Кількість теплоти на плавлення ПВХ при постійній температурі $T_{\text{пл}}$ розраховується за формулою:

$$Q^2 = G \times \lambda_{\text{пл}} = 0,0445 \times 100000 = 4450 \text{ Вт}$$

Кількість теплоти на нагрівання розплаву від $T_{\text{пл}}$ до $T_{\text{к}}$ визначається як:

$$Q^3 = G \times c_p \times (T_{\text{к}} - T_{\text{пл}}) = 0,0445 \times 1900 \times (180 - 160) = 1691 \text{ Вт}$$

Загальна кількість теплоти, необхідна для нагрівання та плавлення полімеру, становить:

$$Q_{\text{заг}} = Q^1 + Q^2 + Q^3 = 6230 + 4450 + 1691 = 12371 \text{ Вт} \approx 12,4 \text{ кВт}$$

Частина теплоти виділяється внаслідок дисипації механічної енергії при в'язкій течії розплаву в каналі черв'яка.

Визначення теплоти від дисипації енергії базується на розрахунку потужності, що витрачається на подолання в'язкого опору при переміщенні розплаву вздовж черв'яка. Потужність дисипації в зоні дозування визначається за формулою:

$$N_{\text{дис}} = \frac{(\pi^2 \times D^2 \times h^3 \times n^2 \times \eta \times L^3)}{(2 \times \cos(\varphi))}$$

що було розраховано раніше як $N_1 = 1850 \text{ Вт}$. Частка дисипаційної енергії, що переходить в теплоту нагрівання полімеру, становить $\varphi_{\text{т}} = 0,85\text{--}0,95$ для ПВХ. Теплота від дисипації енергії визначається як:

$$Q_{\text{дис}} = \varphi_{\text{т}} \times N_{\text{дис}} = 0,9 \times 1850 = 1665 \text{ Вт}$$

Таким чином, частка теплоти від дисипації в загальному тепловому балансі становить:

$$\eta_{\text{дис}} = \frac{Q_{\text{дис}}}{Q_{\text{заг}}} = \frac{1665}{12371} = 0,135 = 13,5\%$$

Решта теплоти $Q_{\text{зовн}} = Q_{\text{заг}} - Q_{\text{дис}} = 12371 - 1665 = 10706 \text{ Вт}$ має надходити від зовнішніх нагрівачів корпусу. Розподіл теплоти по зонах екструдера здійснюється пропорційно довжині зон та температурним градієнтам.

Розрахунок потужності нагрівачів для кожної температурної зони виконується з урахуванням теплових втрат в навколишнє середовище та розподілу теплового навантаження. Потужність нагрівача зони завантаження (зона 1) з температурою $T_1 = 145^\circ\text{C}$ та довжиною $L_1 = 0,378 \text{ м}$ визначається виходячи з теплового потоку через стінку корпусу. Зовнішній діаметр корпусу:

$$D_{\text{к}} = D + 2s_{\text{к}} = 0,063 + 2 \times 0,015 = 0,093 \text{ м},$$

Де:

$s_{\text{к}} = 15 \text{ мм}$ – товщина стінки корпусу

Коефіцієнт теплопровідності сталі $\lambda_{\text{ст}} = 45 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$, коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні в навколишнє середовище $\alpha = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{К}}$. Тепловий потік через циліндричну стінку корпусу визначається за формулою:

$$Q_{\text{вт1}} = \frac{(2 \times \pi \times \lambda_{\text{ст}} \times L^1 \times (T^1 - T_0))}{\ln\left(\frac{D_{\text{к}}}{D}\right)} = \frac{(2 \times 3,14 \times 45 \times 0,378 \times (145 - 20))}{\ln\left(\frac{0,093}{0,063}\right)} = 4190 \text{ Вт}$$

З урахуванням тепловіддачі в навколишнє середовище та коефіцієнта запасу $k_3 = 1,15$ потужність нагрівача зони 1 становить:

$$N_{\text{н1}} = k_3 \times Q_{\text{вт1}} = 1,15 \times 4190 = 4819 \text{ Вт} \approx 5,0 \text{ кВт}$$

Аналогічно розраховуються потужності нагрівачів для інших зон екструдера. Таблиця 6.3 наводить розподіл теплових потоків та потужностей нагрівачів по зонах.

Таблиця 6.3

Розподіл теплових потоків по зонах екструдера

Зона	Температура, °С	Довжина, м	Тепловтрати, Вт	Потужність нагрівача, кВт
1 (завантаження)	145	0,378	4190	5,0
2 (плавлення-1)	163	0,340	4680	5,5
3 (плавлення-2)	168	0,340	4850	5,5
4 (дозування)	175	0,454	6780	8,0
5 (головка)	183	0,150	2355	3,0
Разом	-	1,662	22855	27,0

Перевірка теплового балансу екструдера здійснюється шляхом порівняння теплоти, що надходить від нагрівачів та дисипації, з теплою, необхідною для нагрівання полімеру та компенсації втрат. Загальна потужність нагрівачів становить $N_{\text{н}} = 27 \text{ кВт}$, теплота від дисипації $Q_{\text{дис}} = 1,665 \text{ кВт}$, тобто сумарний тепловий потік $Q_{\text{сум}} = 27 + 1,665 = 28,665 \text{ кВт}$. Необхідна теплота для нагрівання полімеру $Q_{\text{заг}} = 12,4 \text{ кВт}$, теплові втрати в навколишнє середовище $Q_{\text{вт}} = 22,9 \text{ кВт}$, загальна потреба в теплоті $Q_{\text{потр}} = 12,4 + 22,9 = 35,3 \text{ кВт}$. Дефіцит теплоти становить $\Delta Q = Q_{\text{потр}} - Q_{\text{сум}} = 35,3 - 28,7 = 6,6 \text{ кВт}$, що вказує на недостатність потужності нагрівачів.

Для компенсації дефіциту теплоти рекомендується збільшити потужність нагрівачів зони плавлення та дозування або зменшити теплові втрати шляхом

встановлення теплоізоляції на зовнішню поверхню корпусу. При використанні теплоізоляції товщиною $\delta_{iz} = 30$ мм з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{iz} = 0,05 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$ теплові втрати зменшуються в 4-5 разів. Тепловий потік через ізольовану стінку визначається за формулою:

$$Q'_{\text{вт}} = \frac{(2 \times \pi \times L \times (T - T_0))}{\left(\frac{\ln\left(\frac{D_{iz}}{D_k}\right)}{\lambda_{iz}} + \frac{1}{\alpha \times D_{iz}} \right)}$$

Де:

$D_{iz} = D_k + 2\delta_{iz} = 0,093 + 2 \times 0,030 = 0,153$ м – зовнішній діаметр ізоляції.

Для зони 1 тепловий потік з ізоляцією становить:

$$Q'_{\text{вт1}} = \frac{(2 \times 3,14 \times 0,378 \times (145 - 20))}{\left(\frac{\ln\left(\frac{0,153}{0,093}\right)}{0,05} + \frac{1}{10 \times 0,153} \right)} = 920 \text{ Вт}$$

що в 4,55 рази менше, ніж без ізоляції [4]. З урахуванням ізоляції загальні теплові втрати зменшуються до $Q'_{\text{вт}} = \frac{22900}{4,55} = 5033 \text{ Вт} \approx 5 \text{ кВт}$, загальна потреба в теплоті $Q'_{\text{потр}} = 12,4 + 5,0 = 17,4 \text{ кВт}$, що менше за наявну потужність нагрівачів $N_n = 27 \text{ кВт}$. Таким чином, застосування теплоізоляції забезпечує позитивний тепловий баланс екструдера та знижує енергоспоживання на 15-20%.

Тепловий розрахунок екструдера забезпечує визначення балансу теплових потоків у системі та підбір потужності нагрівальних елементів для підтримання необхідних температурних режимів процесу екструзії. Розрахунок кількості теплоти для нагрівання полівінілхлориду від температури навколишнього середовища до температури формування включає витрати енергії на нагрівання твердої фази, плавлення та нагрівання розплаву до робочої температури. Визначення частки теплоти від дисипації механічної енергії при в'язкій течії розплаву в каналі черв'яка дозволяє встановити співвідношення між внутрішнім тепловиділенням та зовнішнім нагріванням від електричних нагрівачів корпусу. Розрахунок теплових втрат через стінки корпусу в навколишнє середовище показує необхідність застосування теплоізоляції для зменшення енергоспоживання та забезпечення позитивного теплового балансу системи. [4] Результати теплового розрахунку підтверджують

достатність потужності встановлених нагрівачів для забезпечення стабільного температурного режиму екструзії полівінілхлориду з мінімальними енергетичними витратами. [7]

6.4 Числове моделювання

Числове моделювання базової головки екструдера

Для виконання необхідних розрахунків тривимірної моделі базової деталі та модернізованої використовується програмне забезпечення ANSYS 2022.

На початковому етапі необхідно вибрати відповідні модулі для аналізу. У даній роботі застосовуються модулі Steady-State Thermal та Static Structural (рис. 6.2).

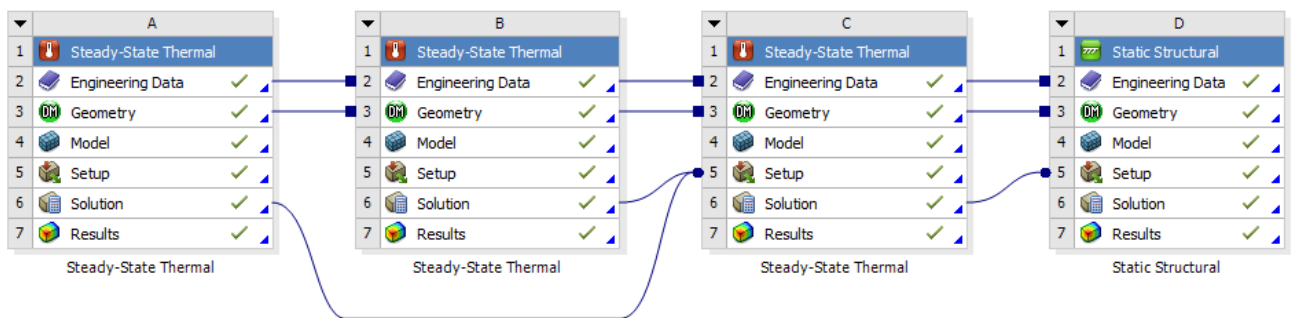


Рис. 6.2 – Дерево проекту Ansys

Перед початком розрахунків необхідно задати властивості матеріалу конструкції (рис. 6.3). Розглянутий вузол виготовлений зі сталі 38Х2МЮА.[6]

У параметрах матеріалу вводимо значення межі текучості $\sigma_t = 835$ МПа у поля Tensile Yield Strength та Compressive Yield Strength, які відповідають межі текучості матеріалу при розтягу та стиску.

Аналогічно вводимо значення межі міцності $\sigma_v = 980$ МПа у поля Tensile Ultimate Strength та Compressive Ultimate Strength, що характеризують граничну міцність матеріалу при розтягу і стиску.

Material Field Variables	Table	
Density	7730	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus...	
Young's Modulus	2,12E+05	MPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,7667E+11	Pa
Shear Modulus	8,1538E+10	Pa
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	835	MPa
Compressive Yield Strength	835	MPa
Tensile Ultimate Strength	980	MPa
Compressive Ultimate Strength	980	MPa
Isotropic Thermal Conductivity	36	W m ⁻¹ C ⁻¹

Рис. 6.3 - Задання характеристики для матеріалу 38Х2МЮА

Переходимо до розділу «Geometry», де спочатку імпортуємо нашу раніше створену 3D-модель (рис. 6.4).

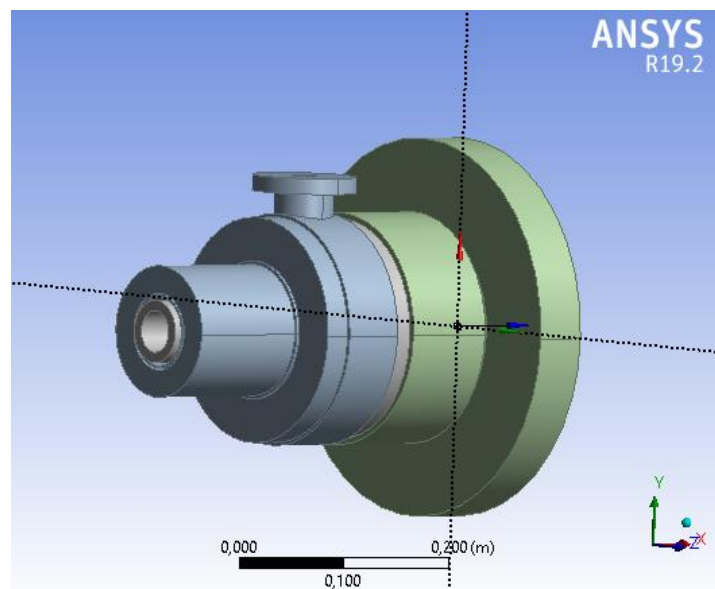


Рис. 6.4 - Імпортована модель

Розрізаємо головку екструдера на зони нагрівання (рис. 6.5)

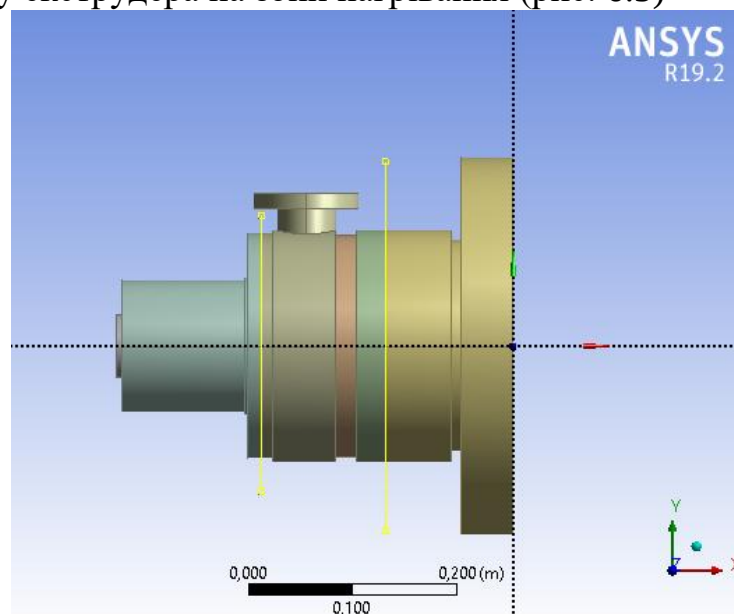


Рис. 6.5 - Додані розрізи

Після цього всі деталі об'єднуємо в одну деталь і переходимо до розділу «Model», де задаємо сітку з розміром елементів 8 мм (рис. 6.6 - 6.7). Такий розмір є оптимальним, оскільки забезпечує швидке обчислення, а подальше зменшення сітки майже не впливає на результати.

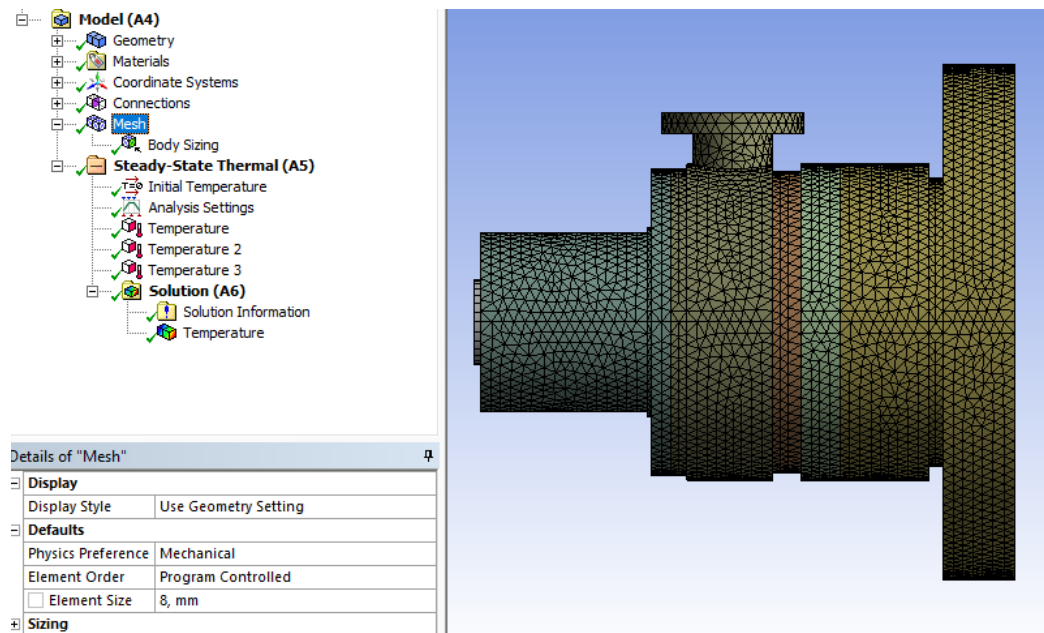


Рис. 6.6 - Задання сітки

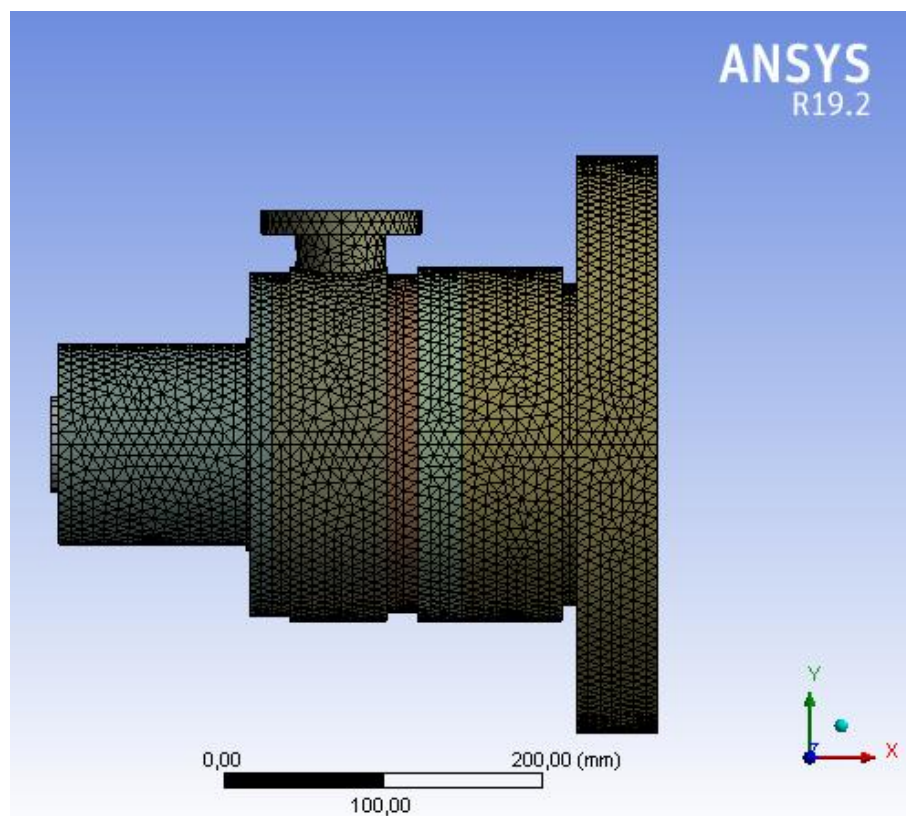


Рисунок 6.7 – Встановлення сітки 8 мм

Далі виставляємо зони нагрівання головки екструдера. Зони А-С, з температурами 175 °С -190 °С. (рис.6.8 та 6.9). Далі імпортуємо результати Solution, в новий Steady-State Thermal, щоб отримати середню температуру матеріалу та отримати точніші розрахунки (рис. 6.10).

Ділянка А – 180 °С (Температура поверхні з припущенням втрати температури) [5]

Ділянка В – 185 °С (Температура поверхні нагрітої нагрівником)

Ділянка С – 190 °С (Температура поверхні нагрітої нагрівником)

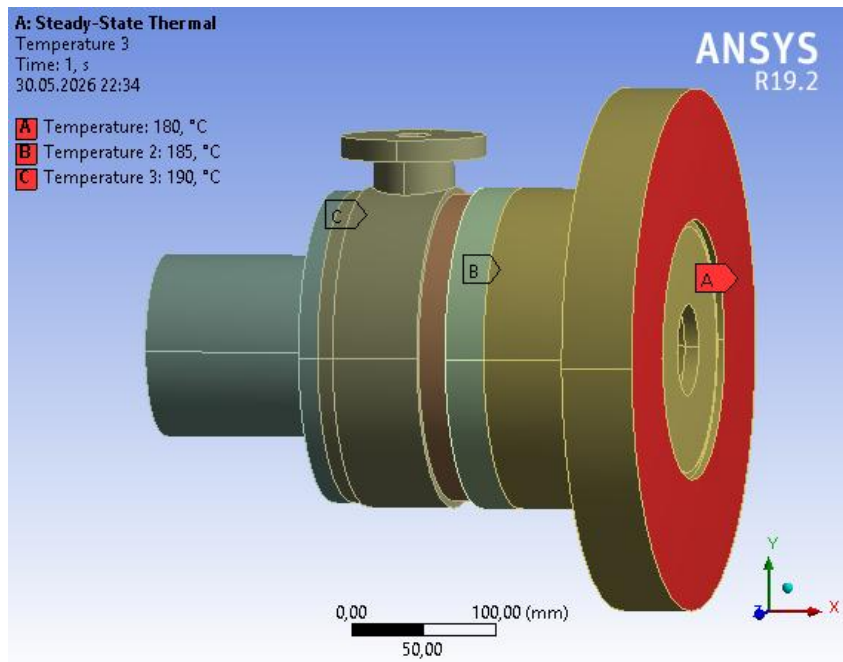


Рис. 6.8 - Накладені температур (ззовні)

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

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

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

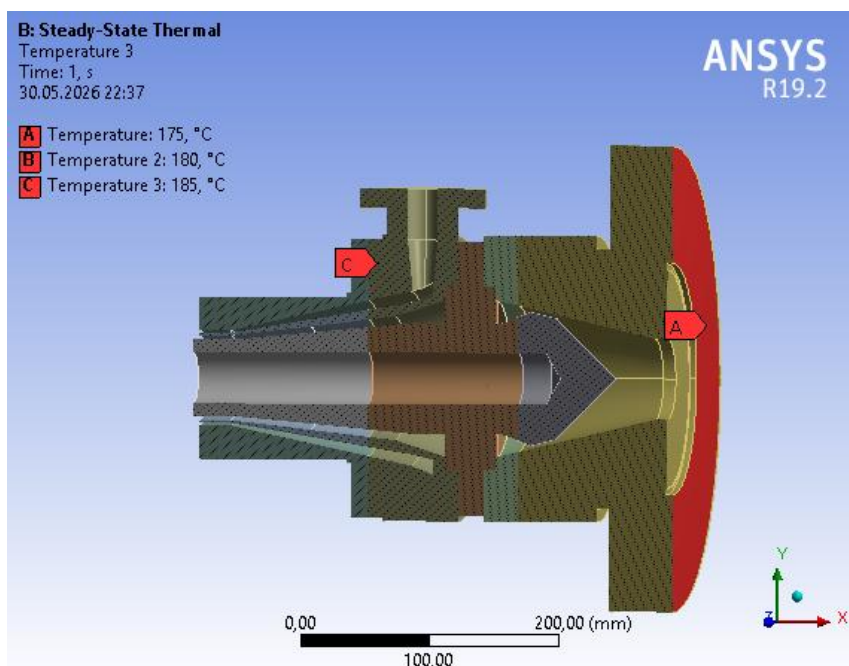


Рис. 6.9 - Накладені температури (всередині)

Імпортуємо результати Solution, в новий Steady-State Thermal, щоб отримати середню температуру всередині головки (рис. 6.10).

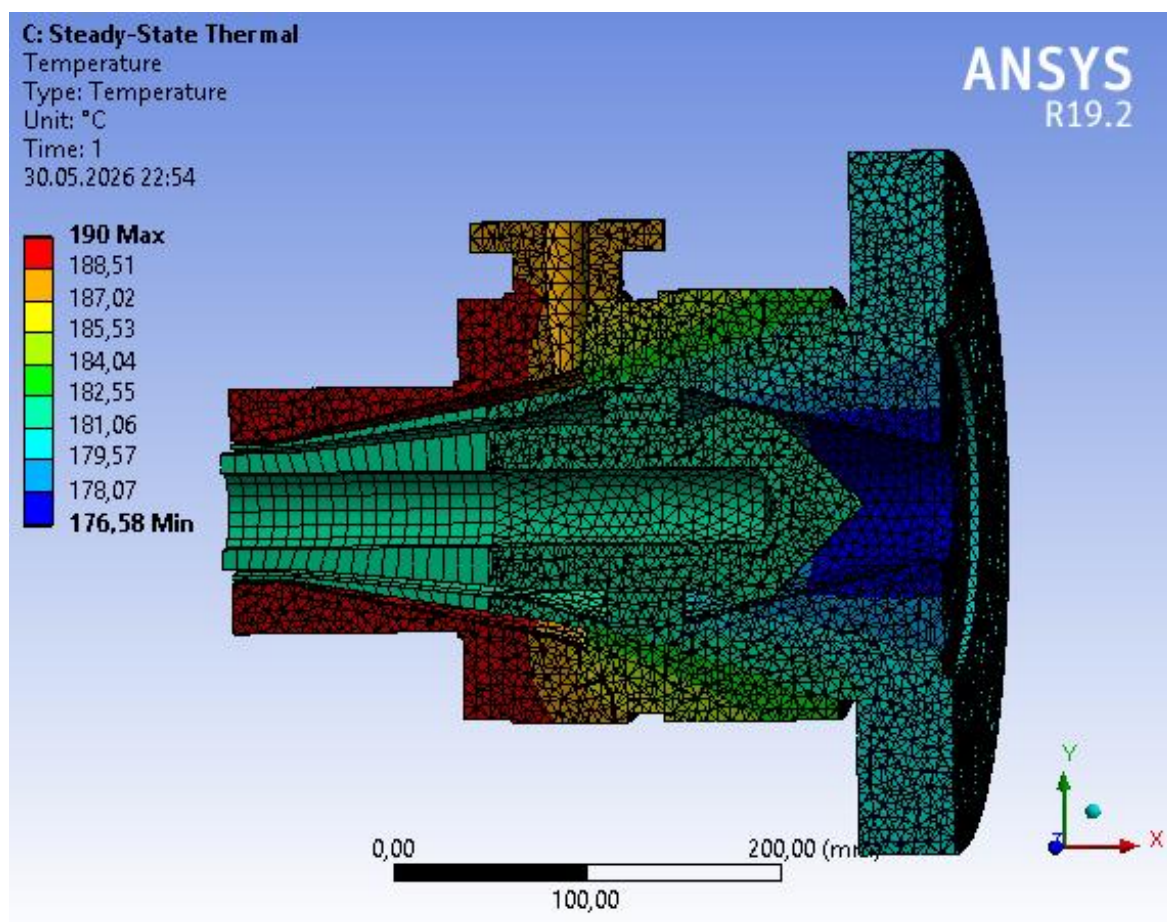


Рис. 6.10 – Середня температура

Після отримання середньої температури, переходимо до наступного модулю «Static Structural», переходимо в «Model» та задаємо закріплення та тиск (рис. 6.11).

Ділянка А – Задання тиску 25 МПа [6]

Ділянка В – Задання тиску 20 МПа

Ділянка С – Задання тиску 15 МПа

Ділянка D – Закріплення фланця по осі X

Ділянка Е – Закріплення фланця по осі Y

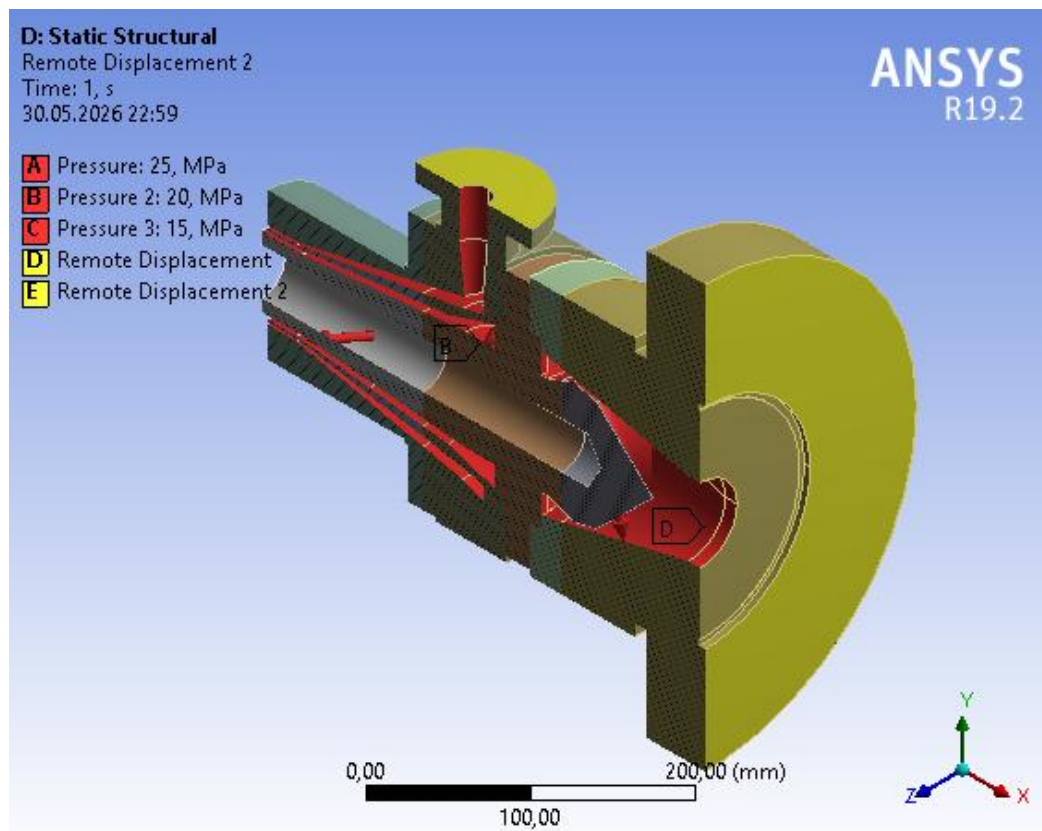


Рис. 6.11 - Задання тиску та закріплення

Після задання цих даних можна розрахувати максимальну сумарну деформацію (рис. 6.12), еквівалентне напруження за Мізесом (рис. 6.13) та запас міцності конструкції (рис. 6.14).

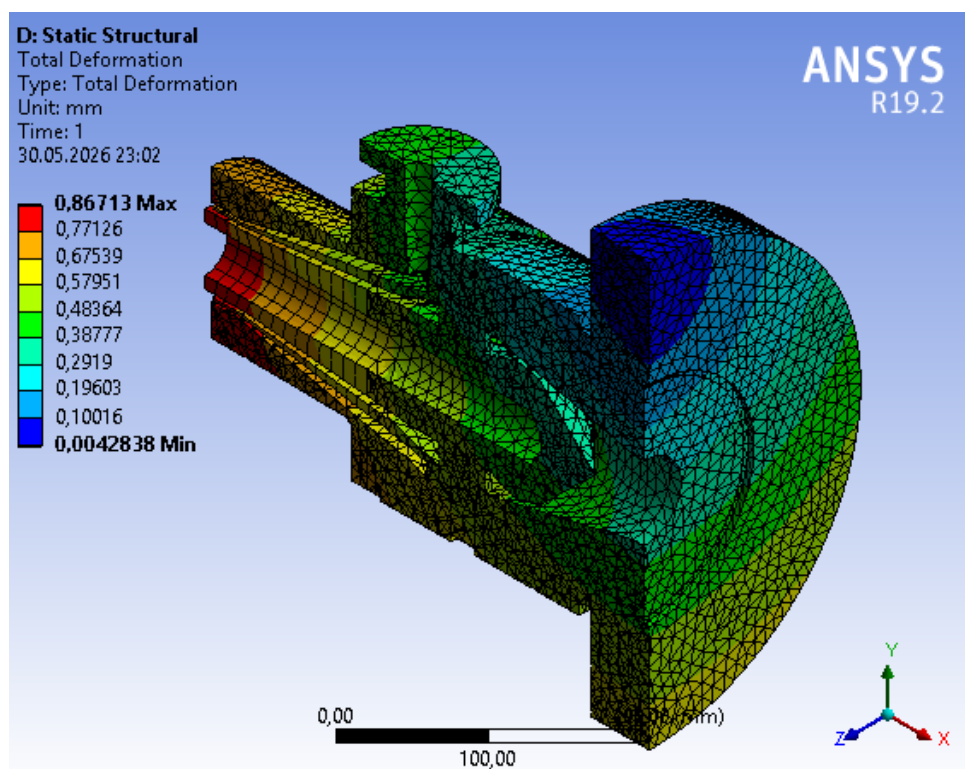


Рис. 6.12 – Масимальна сумарна деформація $\max = 0.867$ мм

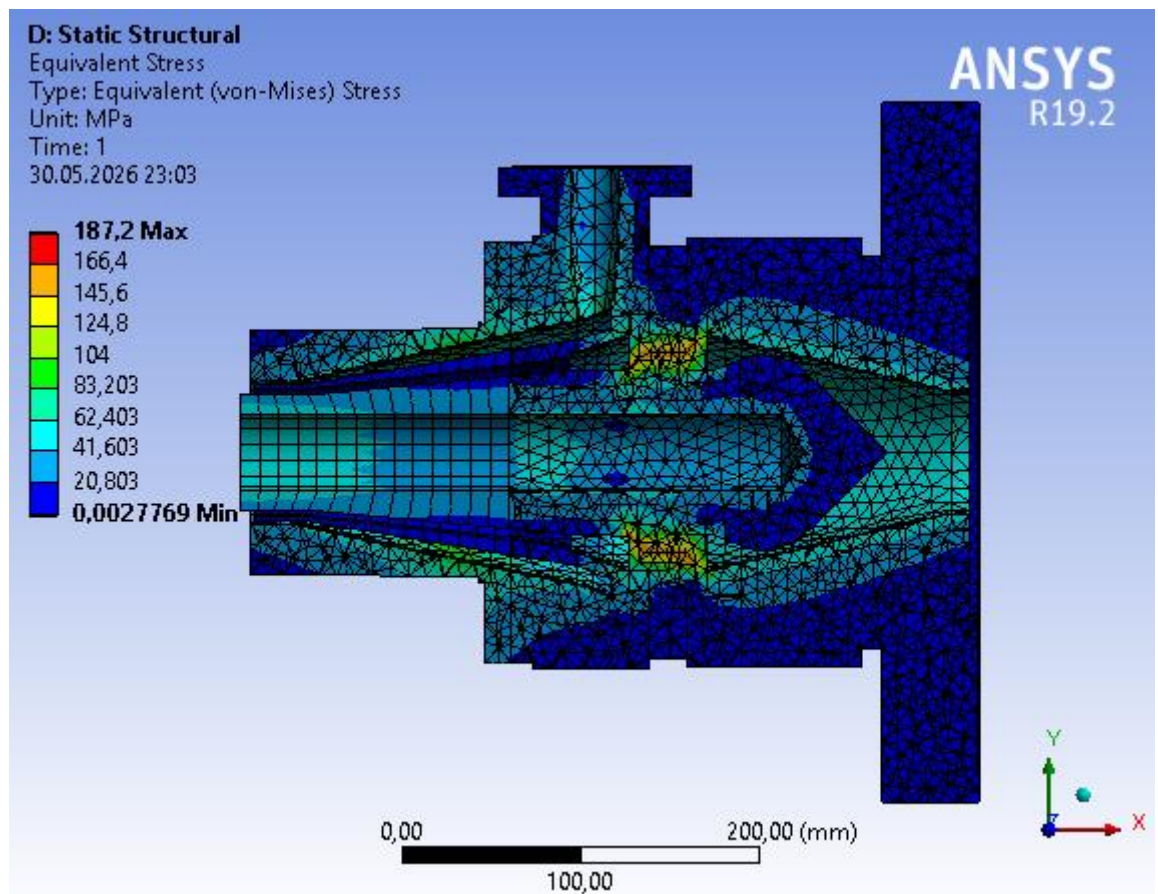


Рис. 6.13 – Масимальні еквівалентні напруження за Мізесом $\sigma_{\max} = 187$ МПа

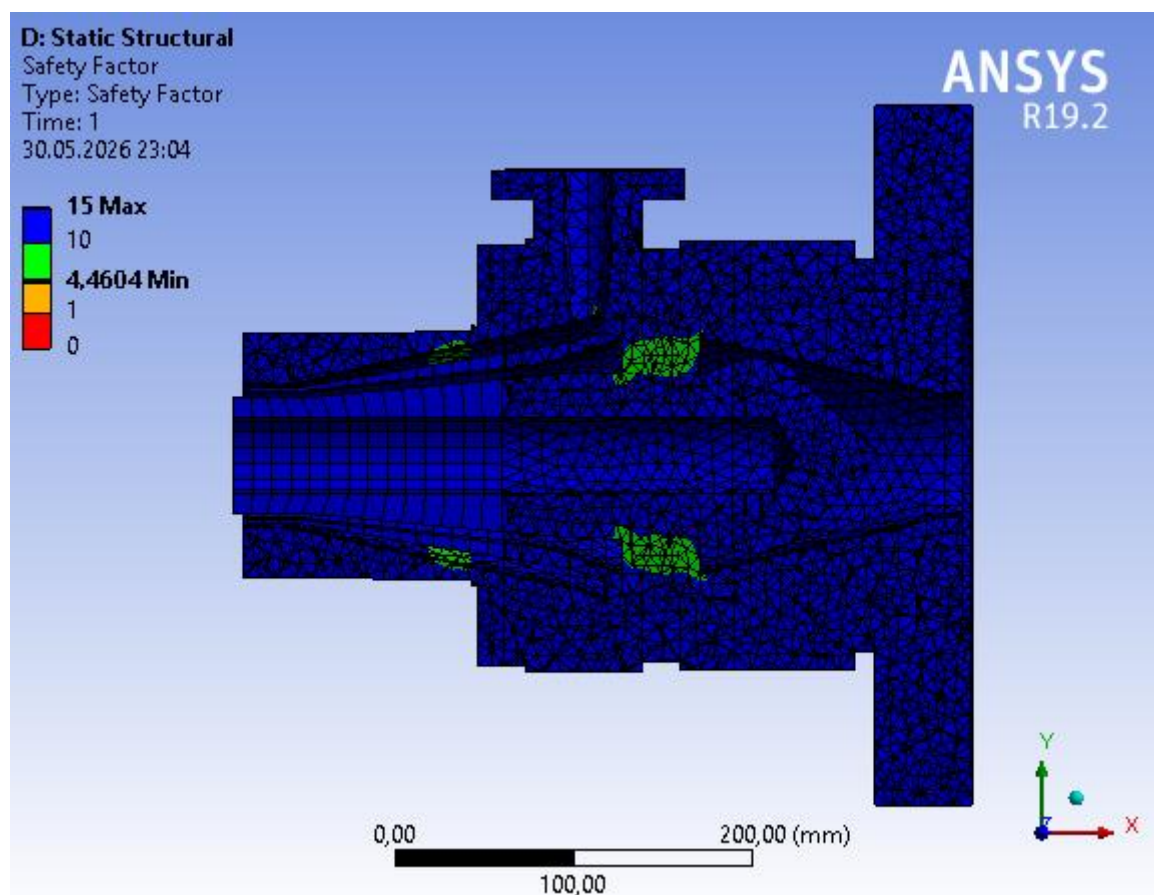


Рис. 6.14 – Запас міцності $n = 4.46$

Числове моделювання модернізованої головки екструдера

Для обчислення модернізованої головки екструдера потрібно виконати такі самі кроки, оскільки модернізована головка відрізняється тільки кінцевим продуктом та геометрією матриці (рис. 6.15-6.28). Матеріал залишається сталь 38Х2МЮА.

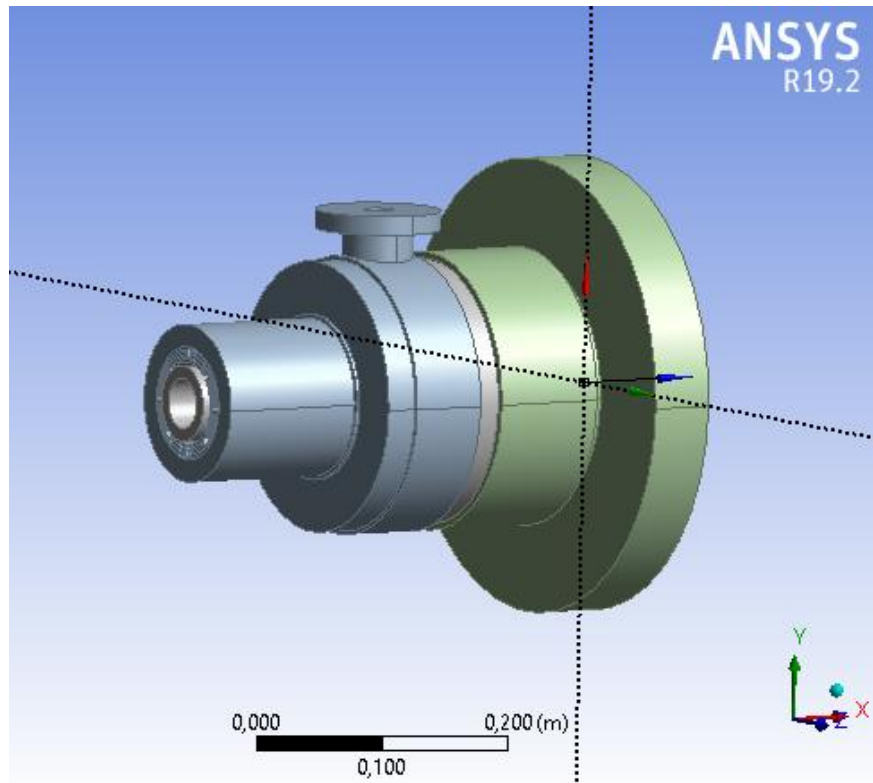


Рис. 6.15 - Імпортована модернізована модель

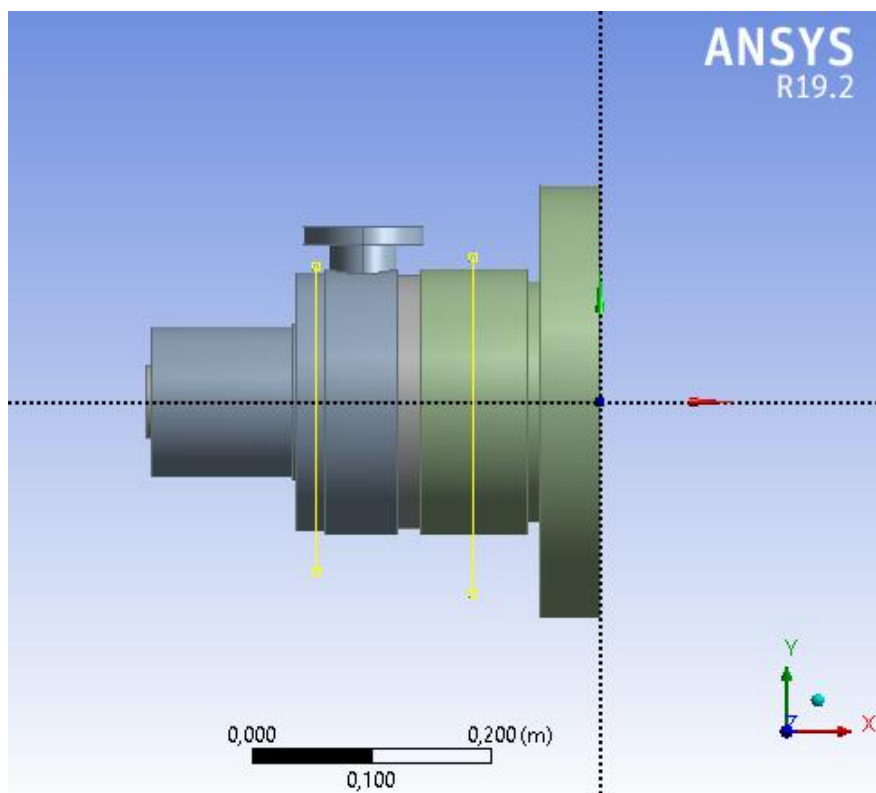


Рис. 6.16 - Додані розрізи

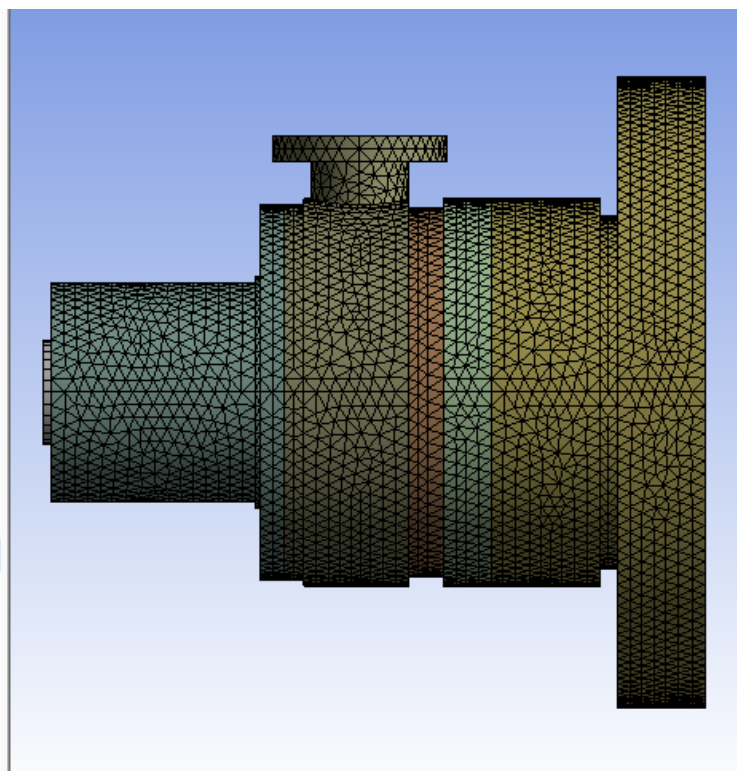
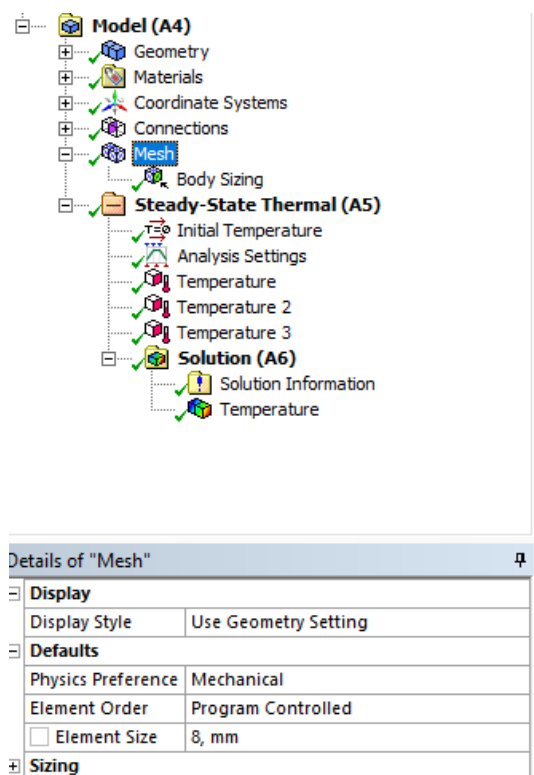


Рис. 6.17 - Задання сітки

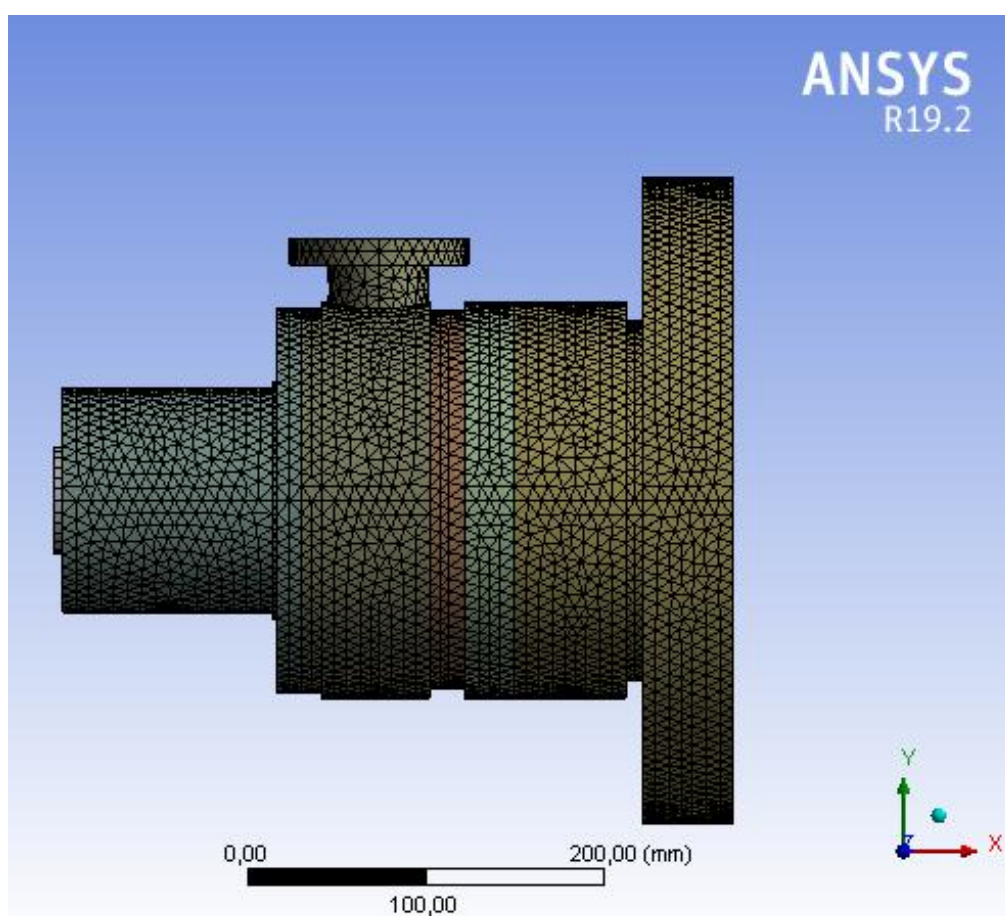


Рисунок 6.18 – Встановлення сітки 8 мм

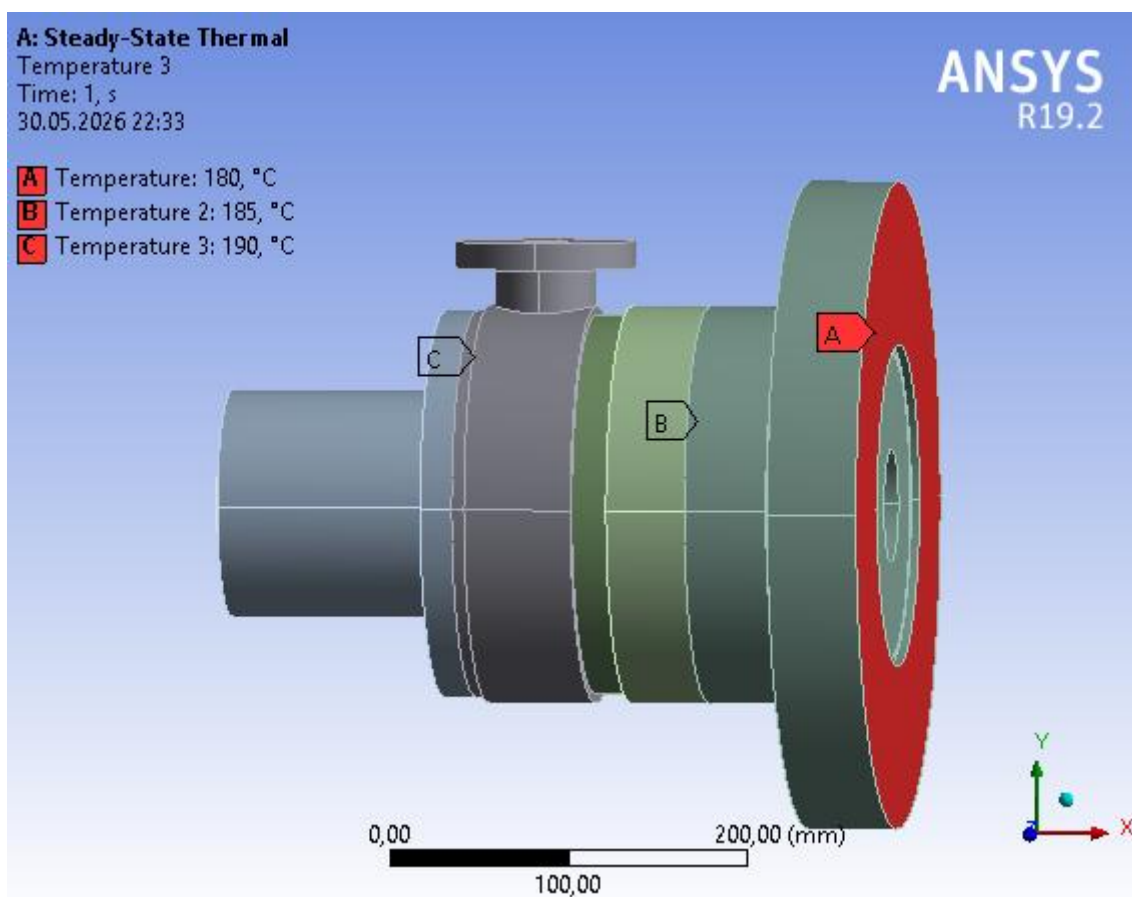


Рис. 6.19 - Накладені температур (зовні)

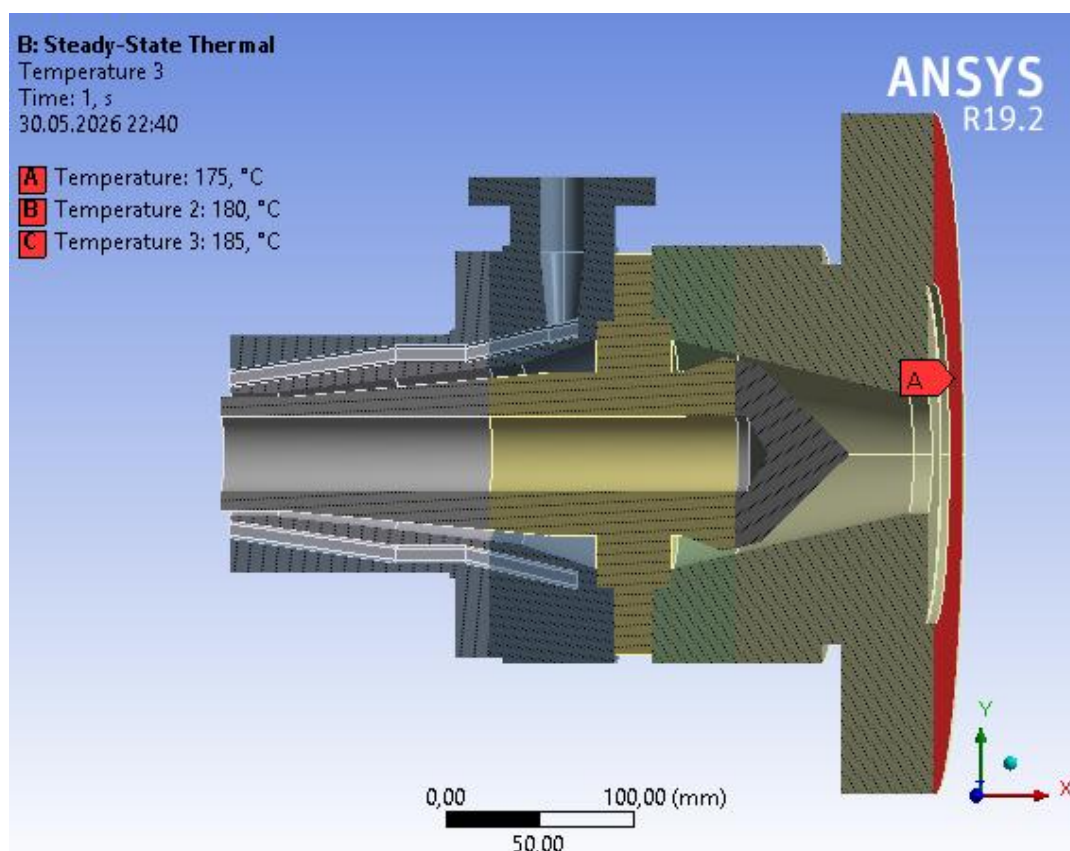


Рис. 6.20 - Накладені температури (всередині)

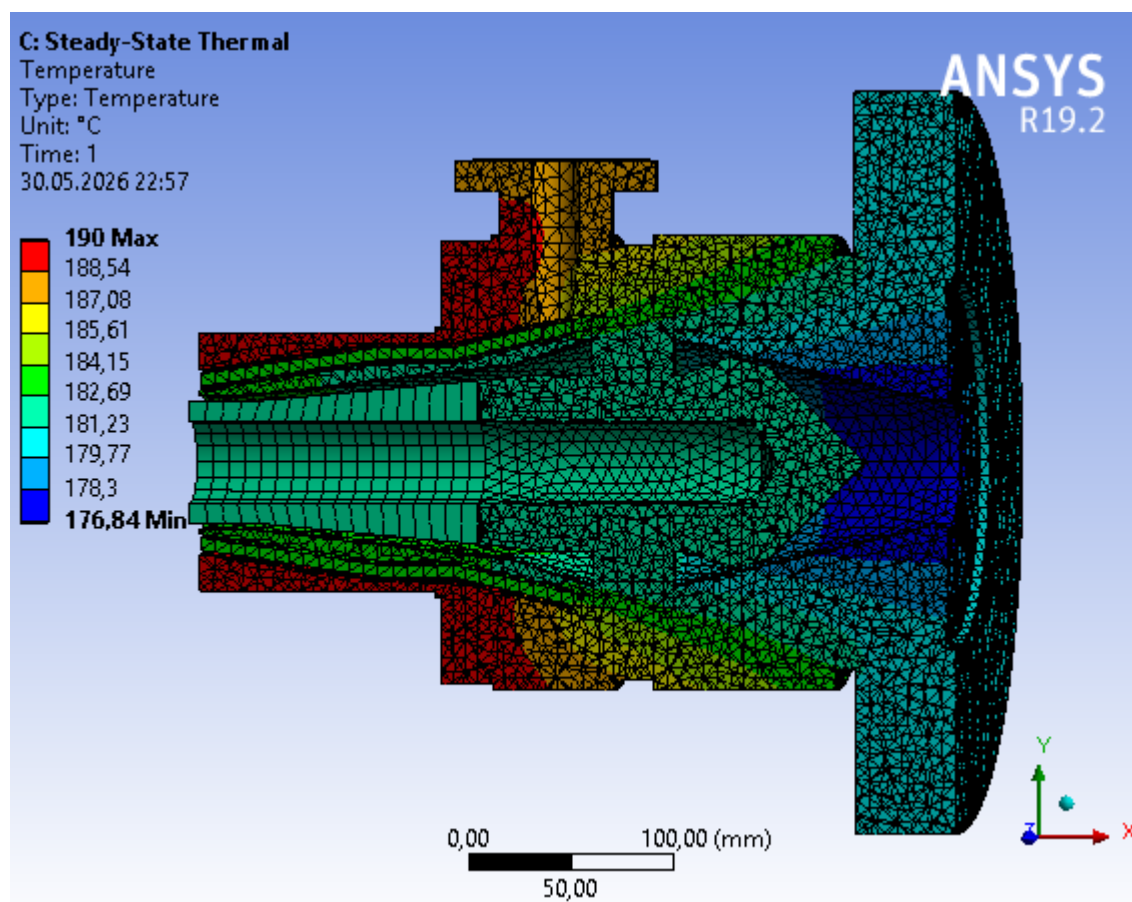


Рис. 6.21 – Середня температура

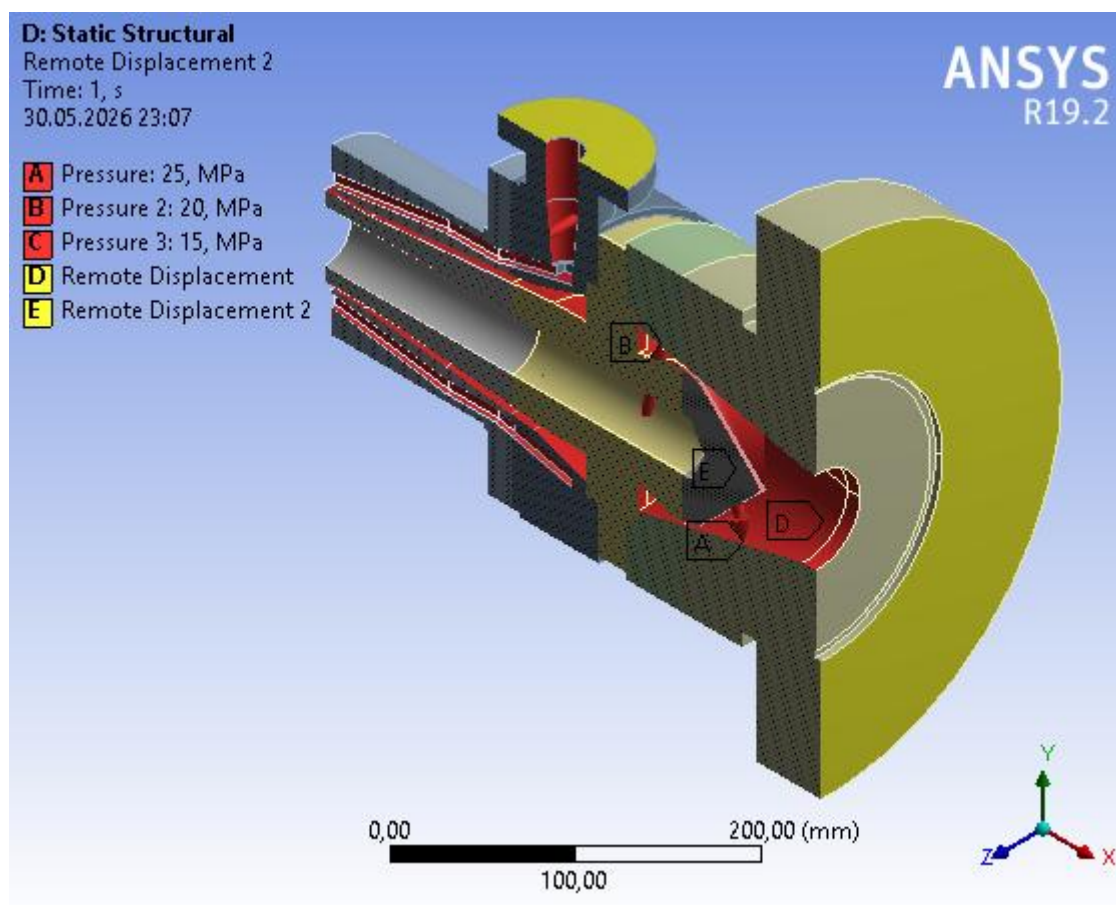


Рис. 6.22 - Задання тиску та закріплення

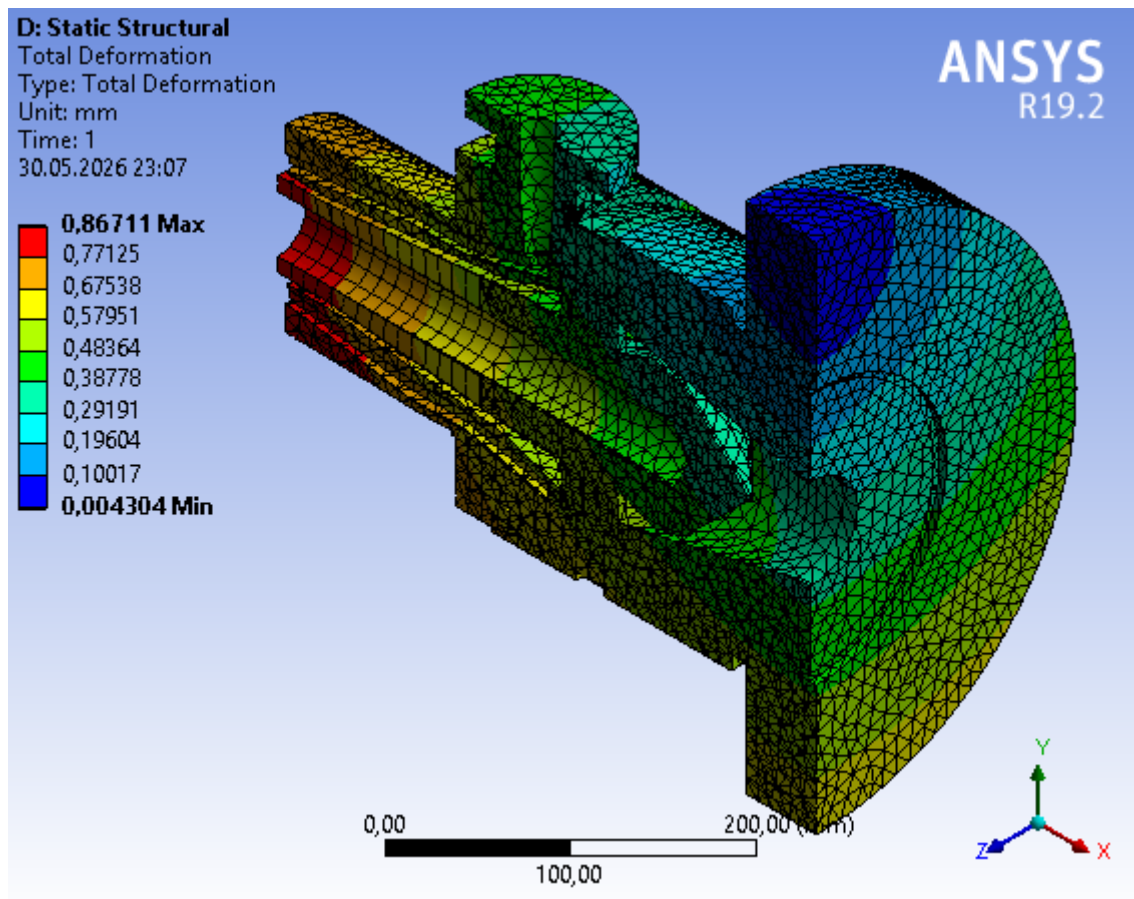


Рис. 6.23 – Масимальна сумарна деформація $\max = 0.86711$ мм

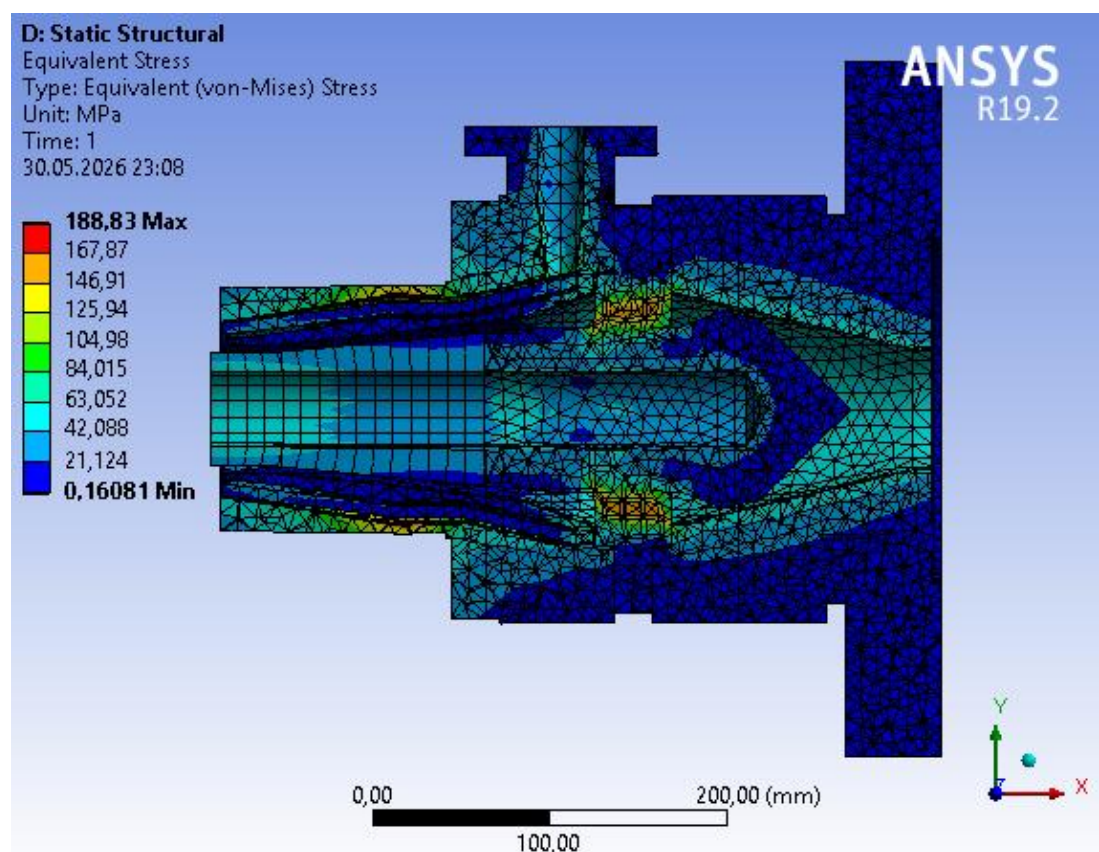


Рис. 6.24 – Масимальні еквівалентні напруження за Мізесом $\max = 189$ МПа

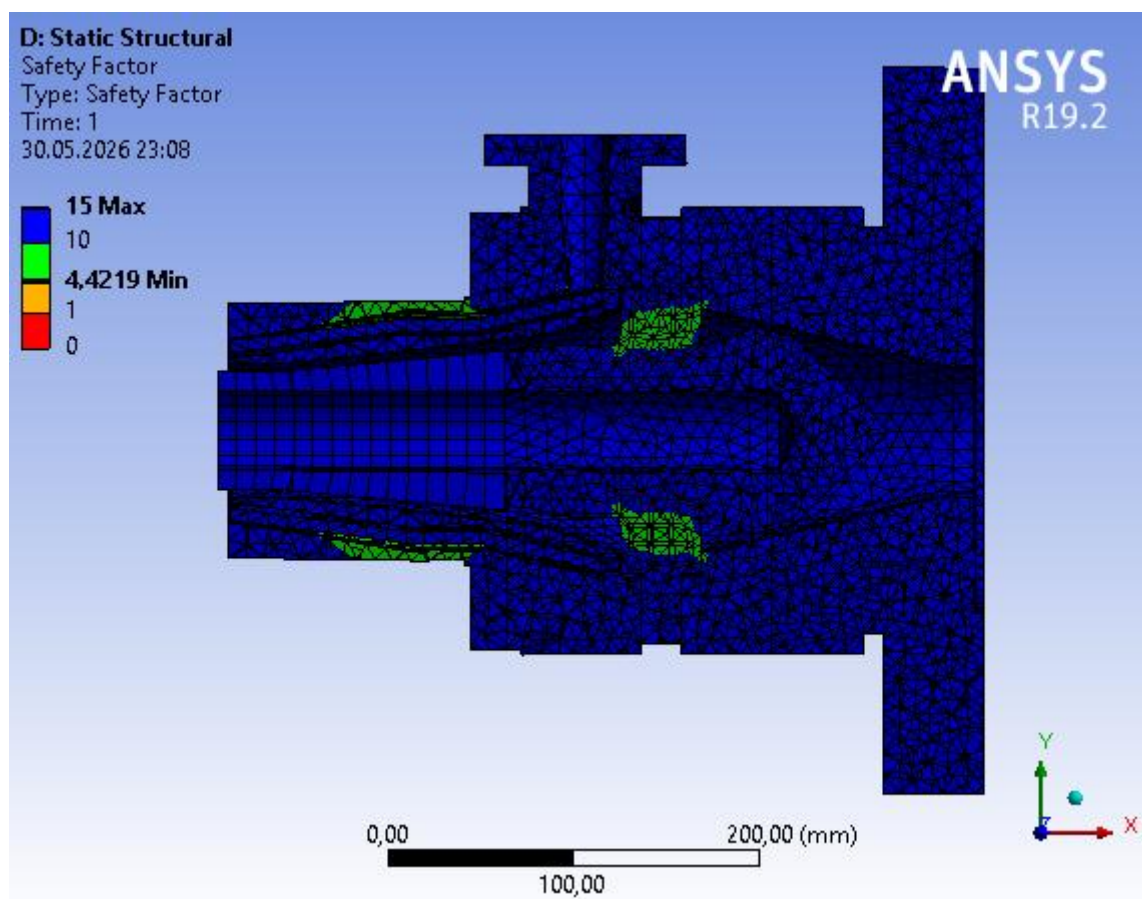


Рис. 6.25 – Запас міцності $n = 4.42$

6.5 Результати числового моделювання

Після числового моделювання обох головок, можна зробити висновок, що не модернізована головка екструдера та модернізована мають майже однаковий коефіцієнт міцності. Не модернізована головка має запас міцності $n = 4.46$ та максимальне еквівалентне напруження за Мізесом $\sigma_{\max} = 187$ МПа.

Розрахунок напружено-деформованого модернізованої головки показав, що максимальні еквівалентні напруження за Мізесом становлять 189 МПа. Дане значення локалізоване в зоні ребер дорнотримача, що пояснюється поєднанням механічного тиску розплаву та термічних напружень від градієнта температур.

Використана сталь 38Х2МЮА, отримане максимальне напруження (189 МПа) забезпечує запас міцності більше ніж у 4 рази $n = 4,42$, що свідчить про високу надійність конструкції в умовах тривалої експлуатації.

Максимальні сумарні переміщення вузла склали 0,86711 мм в модернізованій головці та 0.87613 мм в не модернізованій. Основні переміщення зафіксовані у вихідній частині головки, що є допустимим для даного класу обладнання і не вплине на точність геометричних розмірів отримуваної труби за умови правильного налаштування калібруючого пристрою.

Розроблена конструкція екструзійної головки дозволяє виробляти двошарові труби з механічним защемленням та повністю відповідає технологічним вимогам переробки жорсткого ПВХ, є механічно міцною та придатною для впровадження у лінію з виробництва труб.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Охорона праці являє собою комплексну систему правових, санітарно-гігієнічних та організаційно-технічних заходів, головною метою яких є збереження здоров'я, життя та працездатності людини під час її професійної діяльності. Забезпечення безпеки технологічних процесів, а також дотримання нормативних актів на робочих місцях регламентується Законом України «Про охорону праці» та відповідними нормами Кодексу законів про працю України, прийнятий Верховною Радою України 14 жовтня 1992 року, є основоположним законодавчим документом в цій сфері.

Відповідно до теми дипломного проєкту «Екструдер для виробництва труб з ПВХ з модернізованою головою», об'єктом аналізу в цьому розділі є виробнича дільниця, де здійснюється експлуатація черв'ячного преса. Обладнання розміщено у виробничому приміщенні з площею 54 м² та загальним просторовим об'ємом 256 м³. Саме ці просторові характеристики враховуються мною при нормуванні впливу виробничих факторів.

Під час роботи екструзійної лінії на персонал впливає низка небезпечних та шкідливих виробничих факторів, перелік яких та їхні нормативні обмеження наведені у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 — Небезпечні і шкідливі виробничі фактори

Фактор	Характеристика та норматив
Повітря робочої зони	ГДК шкідливих хімічних речовин при плавленні ПВХ регламентується ДСТУ EN 482:2022
Шум і вібрація	Еквівалентний шум — не більше 80 дБА (згідно з ДСН 3.3.6.037-99)
Мікроклімат	Оптимальні параметри за ДСН 3.3.6.042-99 (для категорії робіт ІІа)
Пожежна безпека	Категорія В, клас зони П-ІІа (ПУЕ); вогнестійкість І ступеня за ДБН В.1.1-7:2016
Електробезпека	ДСТУ Б В.2.5-82:2016, мережа 220/380 В з обов'язковим заземленням
Освітлення	Забезпечення фактичної освітленості не менше 300 лк (ДСТУ EN 12464-1:2016)

7.1 Повітря робочої зони та мікроклімат

Робота з обслуговування екструзійної лінії класифікується як діяльність середньої важкості (категорія ІІа), оскільки енерговитрати працівника становлять 151...200 ккал/год. Згідно з нормами мікроклімату, стан повітря робочої зони безпосередньо залежить від процесу плавлення полімеру, що відбувається при високій температурі близько 170 °С. Під час цього процесу у виробниче середовище можуть виділятися токсичні речовини, зокрема оксид вуглецю, альдегіди, органічні кислоти та неграничні вуглеводні.

Для забезпечення безпечних умов і відведення шкідливих газів з місця їх утворення, я рекомендую встановити вентиляційний ковпак закритого типу безпосередньо під формуючою головкою черв'ячного екструдера. Продуктивність

такої місцевої аспірації має становити 360 м³/год із обов'язковим використанням повітряних фільтрів.

Я зробив висновок, що впровадження ефективної вентиляції з подальшим очищенням повітря відповідно до вимог ДСТУ EN 482:2022 повністю нейтралізує негативний вплив токсичних речовин на дихальні шляхи персоналу та нормалізує мікроклімат.

7.2 Виробничий шум та вібрація

Відповідно до санітарних норм ДСН 3.3.6.037-99, допустимий еквівалентний рівень шуму у виробничому приміщенні не повинен перевищувати 80 дБА. Під час роботи екструдера генерується постійний шум гідроаеродинамічного та механічного походження від електродвигунів, вентиляторів, обертання черв'яка та валів. Фактичний рівень шуму від цих джерел сягає 90 дБА, що на 10 дБА перевищує норму.

Як засоби колективного захисту для зниження шумового навантаження, я рекомендую застосувати звукопоглинальне облицювання з перфорованими плитами, яке має покривати не менше 60 % внутрішньої площі приміщення. Крім того, стіни та перекриття необхідно обладнати звукоізоляцією (здатність не менше 50 дБА) з коефіцієнтом звукопоглинання 0,7, а дверні отвори повинні забезпечувати ізоляцію щонайменше 30 дБА. Також я рекомендую ізолювати вихлопні патрубки насосів у герметичному каналі та регулярно контролювати рівень мастила у підшипникових вузлах обертових елементів.

Для індивідуального захисту я рекомендую використовувати протишумові навушники з достатнім рівнем зниження шуму. Я зробив висновок, що після комплексної звукоізоляції рівень шуму на робочих місцях знижується до безпечних 75 дБА, що повністю відповідає нормативним вимогам ДСН 3.3.6.037-99.

7.3 Електробезпека

Виробниче приміщення, де встановлено екструзійну лінію, належить до класу приміщень з підвищеною небезпекою ураження струмом через високу відносну вологість повітря, яка становить близько 75 %. Агрегат працює від мережі з напругою 220/380 В і частотою 50 Гц.

Для максимального захисту персоналу я рекомендую використовувати трифазну трипровідну мережу з ізолюваною нейтраллю. Додатково я рекомендую ізолювати всі струмопровідні деталі, розмістити небезпечні вузли на недосяжній висоті (понад 2,5 м), передбачити подвійну ізоляцію та нанести відповідні кольорові позначки й попереджувальні написи. Електробезпека також повинна гарантуватися надійним захисним заземленням на випадок аварійного режиму, згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.5-82:2016 та ПУЕ.

Перед технічним обслуговуванням або усуненням несправностей я рекомендую повне знеструмлення обладнання, а також обов'язкове використання засобів індивідуального захисту (діелектричних рукавиць та ізолювальних килимків).

7.4 Пожежна безпека

Використання горючих змащувальних матеріалів та процес розплавлення ПВХ-пластикату створюють ризик виникнення пожежі при порушенні технологічного режиму, несправності електромережі або палінні у невстановлених місцях. Згідно з будівельними нормами, приміщення належить до пожежонебезпечної категорії В, клас зони — П-Па. Ступінь вогнестійкості будівлі — перший (відповідно до ДБН В.1.1-7:2016).

Для забезпечення безпеки я рекомендую облаштувати евакуаційні виходи шириною не менше 0,9 м. Під стелею приміщення я рекомендую встановити теплові пожежні сповіщувачі, налаштовані на автоматичне спрацювання при підвищенні температури до 72 °С. Як первинні засоби пожежогасіння я рекомендую розмістити вогнегасники ОУБ-3А (2 шт.), пожежний гідрант (1 шт.) та ящик з піском (1 шт.).

Я зробив висновок, що виконання цих заходів, разом із заземленням для захисту від статичної електрики, гарантує високий рівень протипожежної безпеки.

7.5 Освітлення на робочих місцях

Для забезпечення комфортної видимості та безпечної роботи в цеху використовується комбіноване освітлення: природне бокове (через отвори у зовнішніх стінах) та штучне загальне.

Як джерела штучного світла я рекомендую використовувати 10 світильників типу ДРЛ 400 (потужність 250 Вт, світловий потік 19000 Лм). Такі лампи генерують спектр, наближений за яскравістю до природного освітлення, і гарантують фактичну ефективність на рівні 300 лк. Розташування світильників має бути симетричним та забезпечувати зручність їх обслуговування згідно з європейським стандартом ДСТУ EN 12464-1:2016.

7.6 Охорона навколишнього середовища

Експлуатація екструдера супроводжується ризиком негативного впливу на довкілля через можливі газові викиди у повітря від розплавленого ПВХ та утворення відпрацьованих мастил під час технічного обслуговування. Норми у цій сфері жорстко регулюються Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища».

Для захисту атмосферного повітря я рекомендую використовувати вищезгадану систему аспірації з закритим вентиляційним ковпаком та фільтрами, що здатні ефективно затримувати токсичні випаровування до їх потрапляння у зовнішнє середовище. Відпрацьовані під час змащення редукторів та обертових валів мастильні матеріали я рекомендую збирати виключно у герметичну промарковану тару для подальшої передачі спеціалізованим підрядникам на безпечну утилізацію.

Я зробив висновок, що таке поводження з виробничими відходами та газами мінімізує негативний вплив лінії на екологію та повністю відповідає вимогам чинного природоохоронного законодавства.

Висновки до розділу

У даному розділі було проведено аналіз умов праці на ділянці експлуатації екструдера для виробництва трубок з ПВХ-пластикату та виділено основні небезпечні й шкідливі виробничі фактори. Встановлено, що ключову небезпеку становлять виділення токсичних речовин у повітря робочої зони та високий рівень генерації промислового шуму (перевищення на 10 дБА). Пожежні та електричні небезпеки за відсутності належного захисту також можуть створювати критичні ризики для робітників. Окремим блоком розглянуто екологічні аспекти роботи виробництва.

Для нівелювання кожного шкідливого фактора мною були розроблені рекомендації щодо впровадження засобів колективного та індивідуального захисту, що спираються на актуальні державні стандарти (ДСТУ EN 482:2022, ДСН 3.3.6.037-99, ДСН 3.3.6.042-99, ПУЕ, ДСТУ Б В.2.5-82:2016 тощо).

Я зробив висновок, що комплексне впровадження запропонованих організаційно-технічних рішень (розміщення місцевої витяжки, монтаж звукопоглинальних панелей, заземлення та встановлення теплових сповіщувачів) надійно знижує вплив шкідливих факторів до нормативних показників і створює абсолютно безпечні умови праці на ділянці.

8 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

8.1 Опис та призначення

Дорн (рис 8.1) є складовою частиною екструзійної головки та призначений для формування внутрішньої поверхні виробу під час процесу екструзії. Деталь працює в умовах значних механічних навантажень, підвищених температур та тертя, тому до неї висуваються високі вимоги щодо міцності, зносостійкості та точності виготовлення.

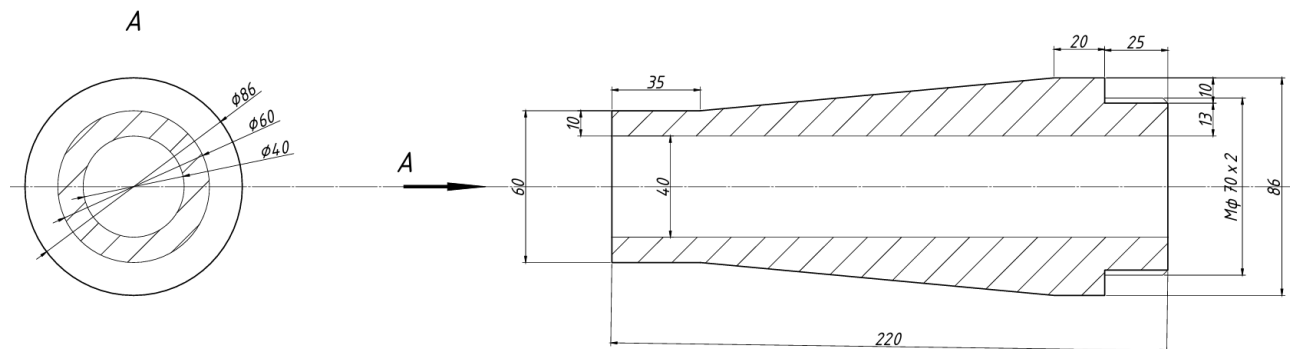


Рис 8.1 – Ескіз дорна

Конструкція деталі являє собою ступінчастий вал із зовнішніми циліндричними поверхнями, конічною ділянкою, центральним осьовим отвором та різьбою $M70 \times 2$. Основними технологічними поверхнями є зовнішні циліндричні поверхні $\varnothing 60$, $\varnothing 86$, конічна поверхня, різьбова частина та центральний отвір $\varnothing 40$.

Матеріал деталі – сталь 38ХМЮА згідно з ГОСТ 4543-71. Матеріал характеризується високою міцністю, достатньою в'язкістю та хорошими експлуатаційними властивостями, що забезпечує надійну роботу дорна в складі екструзійної головки.

Заготовкою (рис 8.2) для виготовлення деталі є гарячекатаний круглий прокат діаметром 90 мм. Обрана заготовка забезпечує необхідний запас матеріалу для механічної обробки та отримання всіх поверхонь відповідно до вимог креслення. Під час механічної обробки усуваються відхилення форми та розмірів заготовки і забезпечуються необхідні показники точності та шорсткості поверхонь.

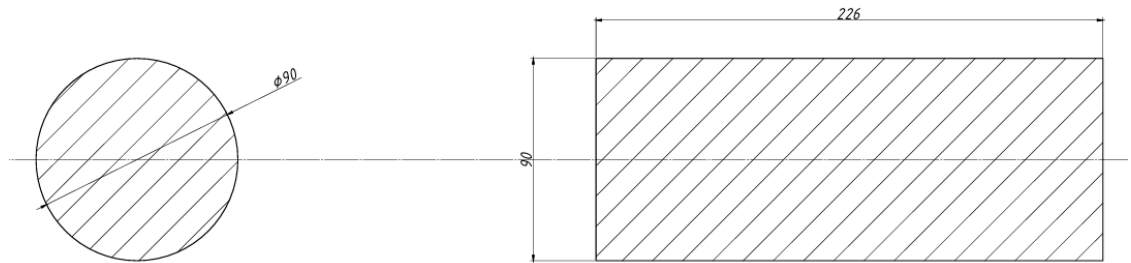


Рис. 8.2 – Заготовка дорну

8.2 Вибір та розрахунок

Розроблений технологічний процес виготовлення дорна складається переважно з токарних, свердлильних та різьбонарізних операцій.

Технологічний процес передбачає послідовне отримання всіх поверхонь деталі відповідно до креслення. Основними базовими поверхнями є зовнішні циліндричні поверхні та торці заготовки.

Спочатку виконують підготовку заготовки та підрізання торців. Далі проводять центрування та встановлення заготовки в центрах токарного верстата. Наступними операціями виконують чорнове та чистове точіння зовнішніх циліндричних поверхонь і кінчної частини деталі. Після обробки зовнішніх поверхонь виконують свердління та розточування центрального отвору до

діаметра Ø40 мм. Завершальними операціями є нарізання різьби M70×2 та контроль основних геометричних параметрів деталі.

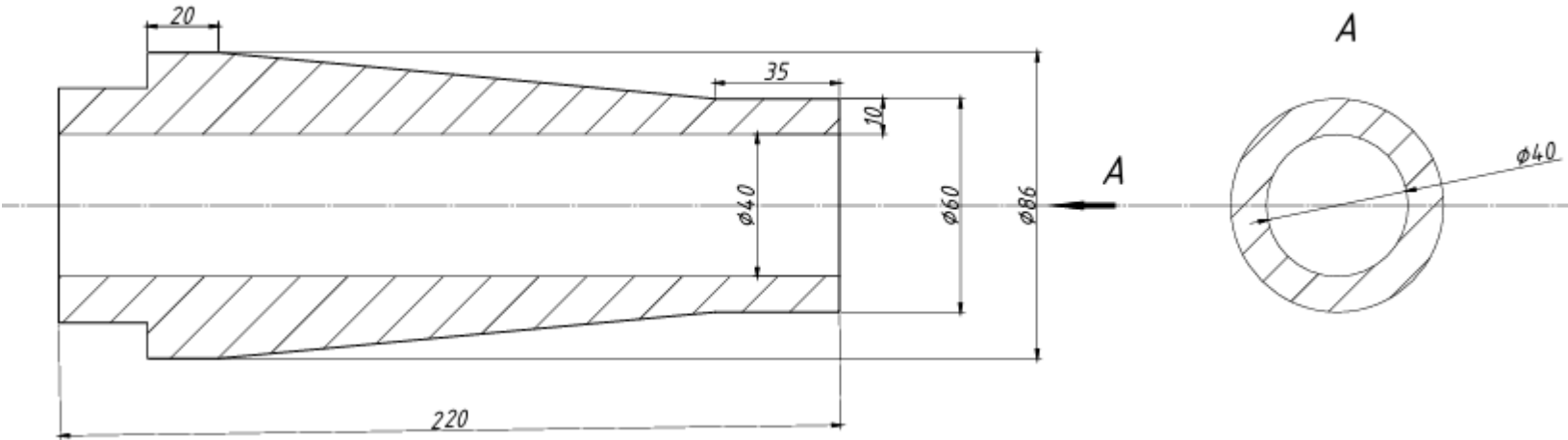
Розроблений технологічний процес забезпечує отримання деталі необхідної точності при мінімальних витратах часу на механічну обробку.

Детально технологічний процес наведений у маршрутній карті (МК), операційній карті (ОК) та карті ескізів (КЕ).

[illegible]

Дубл.														
Взамін.														
Підпис									Зм	Ар	Недок.	Підпис	Дата	

Розробив	Дунін К.Д.			КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ					005			
Перевірів	Борщик С.О.											
				Дорн						Н		
Н. контр.												

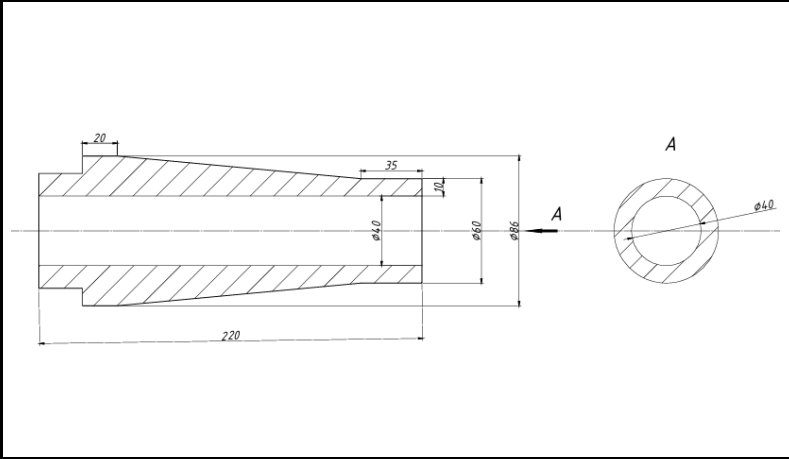


Дубл.										
Взамін.										
Підпис							Зм	Ар	Недок.	Підпис

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

Розробив	Дунін К. Д.			КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІХФ						
Перевірів	Борщук С.О.									

Н. контр.				Дорн				Н		005
-----------	--	--	--	------	--	--	--	---	--	-----



Назва операції				Матеріал	
Токарна				Сталь 38Х2МЮА ГОСТ 4543-71	
Твердість	ОВ	МД	Профіль і розміри		МЗ
	кг				1
Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми	
Токарний верстат, ЧПК 16К20Ф3					
То	Тд	Тп.з	Тшт.	МОР	
				Емульсія	

Р		ПН	Дабо В	L	t	i	s	n	v
P01	1. Точити Ø60 начорно, начисто;								
T02	2. Точити конусну поверхню начорно, начисто;								
O3	3. Точити Ø86 начорно, начисто;								
O04	4. Свердлити Ø40 начорно, начисто;								
T05	5. Відрізати 220 мм								
T06	6. Підрізати торець Ø60.								
P07									
O8									
O9									
O10									

ОК	Обробка різанням								
----	------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

<i>Зм</i>	<i>Ар</i>	<i>№ док.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>

8.3 Призначення пристосування для обробки деталі

Для встановлення дорна під час токарної обробки використовується універсальне пристосування у вигляді трикулачкового самоцентрувального патрона з підтисканням заднім центром.

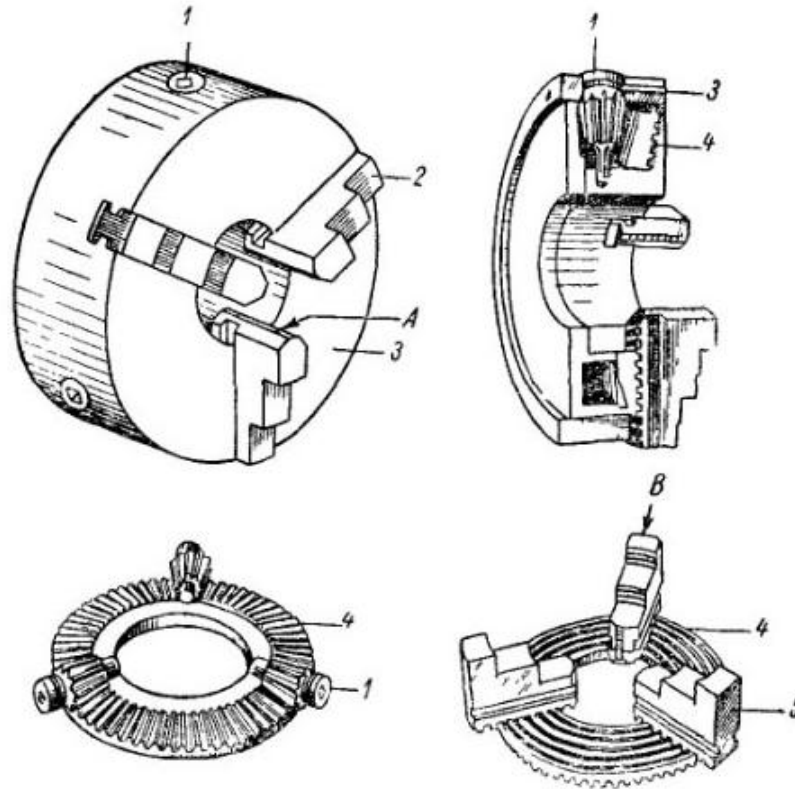


Рис. 8.3 - Трикулачковий самоцентрувальний патрон

Мала конічна шестерня (1), елемент привода патрона. Має внутрішній чотиригранний отвір на торці під спеціальний Т-подібний ключ. У корпусі патрона симетрично розташовано три такі шестерні. При повертанні ключа шестерня передає обертовий момент на велике конічне колесо. Затискний кулачок (2) робочий орган патрона, що безпосередньо контактує із заготовкою та затискає її. На схемі зображено три кулачки, які встановлюються у відповідні Т-подібні пази корпусу. Корпус патрона 3() масивна циліндрична основа пристосування, яка монтується на шпиндель токарного верстата. У корпусі виконано точні радіальні пази для напрямку руху кулачків та внутрішні розточки

для розміщення приводного механізму. Спіральний диск (4), центральний двобічний передавальний елемент. На його конічному боці нарізано кругові конічні зубці, які знаходяться в постійному зачепленні з малими шестернями 1. На зворотному (пласкому) боці диска виконано торцеву спіральну канавку. Нижня частина кулачка (5) основа кулачка зі спеціальними радіусними виступами (зубцями), які входять у зачеплення зі спіральними канавками диска 4. Завдяки цьому обертання диска перетворюється на лінійне переміщення кулачків.

Під час налагодження або закріплення деталі оператор обертає ключем одну з малих конічних шестерень 1. Вона приводить в рух спіральний диск 4. Диск починає обертатися навколо центральної осі всередині корпусу 3. Оскільки архімедова спіраль на зворотному боці диска зчеплена із зубцями 5 усіх трьох кулачків одночасно, обертання диска змушує кулачки 2 синхронно та з однаковою швидкістю ковзати по пазах «А» до центра (для затискання) або від центра (для розтискання), автоматично забезпечуючи точне центрування деталі відносно осі обертання шпинделя.

Застосування такого пристосування забезпечує надійне закріплення заготовки та необхідну співвісність усіх оброблюваних поверхонь. Під час виконання токарних операцій деталей базується по зовнішній циліндричній поверхні та додатково підтримується центром задньої бабки, що підвищує жорсткість технологічної системи та точність обробки.

Під час свердління осьового отвору деталей встановлюється в патроні токарного верстата. Такий спосіб базування забезпечує точне розташування отвору відносно осі деталі та необхідну точність його виконання.

ВИСНОВКИ

У даному дипломному проєкті було вирішено актуальну інженерну задачу - підвищення ефективності виробництва та якості двошарових труб з жорсткого полівінілхлориду шляхом модернізації трубної екструзійної головки.

Проведено аналіз існуючого технологічного процесу та конструкції базового екструдера 63x24. Виявлено, що стандартні головки не завжди забезпечують достатню міцність з'єднання шарів при виробництві багатошарових ПВХ-труб.

На основі патентного пошуку (зокрема, патенту CN 118219528 A) було обґрунтовано та розроблено модернізовану конструкцію головки для спільної екструзії. Впровадження Т-подібного защемлення шляхом створення на внутрішньому шарі виступів, а на зовнішньому - відповідних пазів, забезпечує надійне механічне блокування шарів безпосередньо в процесі екструзії, що критично важливо для уникнення деламінації.

Виконані параметричні та теплові розрахунки підтвердили, що електродвигун потужністю 5,5 кВт та існуюча система нагрівачів є достатніми для забезпечення стабільного формування розплаву ПВХ з продуктивністю 160 кг/год. Перевірка черв'яка на міцність показала достатній запас стійкості.

За допомогою системи ANSYS проведено числове моделювання базової та модернізованої головок. Встановлено, що максимальне еквівалентне напруження у модернізованій деталі (зі сталі 38Х2МЮА, що має межу міцності 835 МПа) становить 189 МПа. Це гарантує надійний коефіцієнт запасу міцності $n = 4,42$, що підтверджує працездатність та довговічність нової конструкції при робочому тиску розплаву.

Розроблено заходи з охорони праці, які враховують специфіку переробки ПВХ, зокрема, встановлення місцевої витяжної вентиляції над головкою екструдера для відведення токсичних газів, а також заходи зі зниження шуму та вібрації.

Складено технологічну документацію на виготовлення дорну, підібрано відповідне обладнання та різальний інструмент.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів : навч. посіб. / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, Л. Б. Радченко. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 200 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6d44e031-7386-4afe-94d8-72f0c90ceb33/content>
2. Дзюбан О. Р. Черв'ячний прес для виробництва труб з ПВХ з модернізацією черв'яка : кваліфікаційна робота. Київ, 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/8ecf0947-3ccf-462b-a602-d15f219fefb4>
3. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів [Електронний ресурс]. — Київ: НТУУ «КПІ», 2024 (або попередні видання). URL: <https://ela.kpi.ua/items/f83192bc-9003-4824-87df-11ace8be232a> (або актуальне).
4. Сокольський О. Л., Мікульонок І. О. Моделювання обладнання і процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії: монографія. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. URL: <https://ela.kpi.ua/items/23af6060-7e42-4afa-b5e7-1ae9d249dbcf>
5. Петренко В. П. Екструзійна трубна лінія з модернізацією черв'ячного преса : кваліфікаційна робота. Київ, 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/7ea5113d-4415-4ac4-9978-c1fb27941b9d>
6. Витвицький В. М. Екструдер для виробництва труб з модернізацією корпусу : кваліфікаційна робота. Київ, 2023. URL: <https://ela.kpi.ua/items/a245d054-4a16-4d67-8aac-4fba99134367>
7. Довідник переробника пластмас: Температурні режими екструзії ПВХ—
Режим доступу:
https://www.dynisco.com/userfiles/files/27429_Legacy_Txt.pdf
8. Марочник сталей та сплавів: Сталь 38Х2МЮА — Режим доступу:
http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=42
9. Патент UA 118513 U. Профільна екструзійна головка / заявник і патентовласник не зазначено. — Опубл. 10.08.2020. — Бюл. № 15. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/792362/>

10. Патент UA 82157 U. Головка екструзійна / заявник і патентовласник не зазначено. – Опубл. 25.06.2018. – Бюл. № 12. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1138116/>
11. Патент UA 16817 U. Кільцева екструзійна головка / заявник і патентовласник не зазначено. – Опубл. 25.02.2011. – Бюл. № 3. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/299014/>
12. Патент CN 118219528 A. Форма для спільної екструзії двошарових труб та спосіб формування труб / заявник не зазначено. – Опубл. 2024. – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/CN118219528A> (дата звернення: 28.05.2026).
13. Сокольський О. Л. Наукові засади розроблення обладнання... : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2020. URL: <https://ela.kpi.ua/items/7c0db709-d9f2-45a9-b334-bd6f84d75aba>
14. 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>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ТАБЛИЦЯ РОЗГЛЯНУТИХ ПАТЕНТІВ

№ п/п	Предмет пошуку	Країна видачі, вид і номер документа	Мета заявленого технологічного рішення та його використання
1	ЕКСТРУЗІЙНА ГРАНУЛЮВАЛЬНА ГОЛОВКА ДЛЯ ТЕРМОПЛАСТІВ	UA 93664 U	Винахід відноситься до переробки полімерів у вироби і може бути використана при отриманні плівок. Мета винаходу — вдосконалення конструкції головки екструдера для рівномірного розподілу розплаву по ширині щілини та зниження енергоспоживання.
2	ФОРМУЮЧИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВВОДУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПОНЕНТІВ В ЕКСТРУДОВАНИЙ МАТЕРІАЛ	UA 102591 U	Винахід відноситься до переробки полімерів у вироби і може бути використана при отриманні плівок. Мета винаходу — вдосконалення екструзійної головки для введення компонентів безпосередньо в об'єм розплаву під час виготовлення виробів, що розширює технологічні можливості головки.
3	ПРОФІЛЬНА ЕКСТРУЗІЙНА ГОЛОВКА	UA 118513 U	Винахід відноситься до переробки полімерів у вироби і може бути використана при отриманні плівок. Мета винаходу — підвищення якості екструдованої плівки шляхом усунення застійних зон і регулювання товщини листа.
4	УСТАНОВКА ДЛЯ	UA 29932 U	Винахід відноситься до

№ п/п	Предмет пошуку	Країна видачі, вид і номер документа	Мета заявленого технологічного рішення та його використання
	ВИГОТОВЛЕННЯ РУКАВНИХ ПЛІВОК З ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ		переробки полімерів у вироби і може бути використана при отриманні плівок. Мета винаходу — забезпечення рівномірного потoku розплаву по ширині щілини та зменшення дефектів краю плівки.
5	ФОРМУЮЧА ГОЛОВКА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ РУКАВНОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ	UA 138580 U	Винахід відноситься до переробки полімерних матеріалів і може бути використана при виробництві плівок. Мета винаходу — підвищення продуктивності та якості плівки за рахунок вдосконалення формуванняльної щілини.
6	ГОЛОВКА ЕКСТРУЗІЙНА	UA 82157 U	Винахід відноситься до переробки полімерів у вироби і може бути використана при отриманні листів. Мета винаходу — покращення регулювання товщини плівки та зниження тиску в головці.
7	КІЛЬЦЕВА ЕКСТРУЗІЙНА ГОЛОВКА	UA 16817 U	Винахід відноситься до переробки полімерів у вироби і може бути використана при отриманні плівок. Мета винаходу — забезпечення стабільного тиску на вході в формуванняльну головку та зменшення браку.
8	ПЛОСКОЩІЛИННА	UA 2046 U	Винахід відноситься до

№ п/п	Предмет пошуку	Країна видачі, вид і номер документа	Мета заявленого технологічного рішення та його використання
	ЕКСТРУЗІЙНА ГОЛОВКА		переробки полімерів у вироби і може бути використана при отриманні плівок. Мета винаходу — створення профільної екструзійної головки для рівномірного розподілу розплаву по ширині та підвищення якості профільних виробів.
9	ПЛОСКОЩЛИННА ЕКСТРУЗІЙНА ГОЛОВКА	UA 91484 U	Винахід відноситься до переробки полімерів у вироби і може бути використана при отриманні плівок. Мета винаходу — підвищення рівномірності товщини плівки за рахунок вдосконалення губок формувальної щілини.
10	ФОРМА ДЛЯ СПІЛЬНОЇ ЕКСТРУЗІЇ ДВОШАРОВИХ ТРУБ ТА СПОСІБ ФОРМУВАННЯ ТРУБ	CN 118219528 A	Винахід відноситься до технології виробництва двошарових труб з полімерних матеріалів і може бути використана при отриманні трубної продукції. Мета заявленого технологічного рішення — створення співекструзійної головки з механізмом механічного зачеплення (bite lock) внутрішнього і зовнішнього шарів за рахунок спеціальної конструкції направляючого циліндра з пазами та замковими частинами. Це

№ п/п	Предмет пошуку	Країна видачі, вид і номер документа	Мета заявленого технологічного рішення та його використання
			забезпечує надійне з'єднання шарів, запобігає їх відшаруванню, підвищує міцність і якість кінцевої продукції.

ДОДАТОК Б

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кільк	Примітка	
				Документація			
A 1			ЛП 21.01724.000-01 СК	Екструдер одночерв'ячний	1		
				Складальні одиниці			
	1		ЛП 21.01724.001-01 СК	Циліндр екструдера	1		
	2		ЛП 21.01724.002-01 СК	Рама	1		
	3		ЛП 21.01724.003-01 СК	Черв'як	1		
	4		ЛП 21.01724.004-01 СК	Кожух	1		
	5		ЛП 21.01724.005-01 СК	Лійка завантажувальна	1		
	6		ЛП 21.01724.006-01 СК	Бункер	1		
	7		ЛП 21.01724.007-01 СК	Індукційний нагрівник	1		
	8		ЛП 21.01724.008-01 СК	Кільцева головка	1		
				Стандартні вироби			
	9		ЛП 21.01724.009-01 СК	Редуктор	1		
	10		ЛП 21.01724.010-01 СК	Електродвигун	1		
	11		ЛП 21.01724.011-01 СК	Вентилятор	4		
	12		ЛП 21.01724.012-01 СК	Болт ГОСТ 7798-70	20		
	13		ЛП 21.01724.013-01 СК	Гайка ГОСТ 5915-70	14		
	14		ЛП 21.01724.014-01 СК	Шайба ГОСТ 11598-80	34		
				ЛП 21.05141546.002-70 СП			
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	Екструдер для виробництва труб з ПВХ		
Розроб.	Дунін К. Д.						
Перевірив	Гондляр О. В.						
Н.контр.							
Затвердив	Сокольський О. Л.						
					Літера	Аркуш	Аркушів
						1	1
					КПІ ім. Ігоря Сікорського		

[illegible]

ДОДАТОК Ц

```

#include <iostream>
#include <cmath>
#include <iomanip>

using namespace std;

int main() {
    // Вихідні дані
    double D = 0.063;      //Діаметр черв'яка
    double n_rpm = 90.0;    // Частота обертання
    double h = 0.0035;     // Глибина каналу в зоні дозування
    double phi_deg = 17.7; // Кут нахилу гвинтової лінії
    double delta_p = 35e6;  // Перепад тиску в зоні дозування
    double L_z = 0.454;     // Довжина зони дозування
    double eta = 3500.0;    // Ефективна в'язкість розплаву
    double k_zap = 1.2;     // Коефіцієнт запасу потужності
    double eta_red = 0.9;   // ККД редуктора

    double PI = acos(-1.0);
    double n_sec = n_rpm / 60.0;
    double phi_rad = phi_deg * PI / 180.0;

    double Qt = (pow(PI, 2) * pow(D, 2) * h * n_sec * sin(phi_rad) * cos(phi_rad)) / 2.0;

    double Qp = (PI * D * pow(h, 3) * delta_p * pow(sin(phi_rad), 2)) / (12.0 * eta * L_z);

    double Q_real = Qt - Qp;

    double N2 = Q_real * delta_p;

    double N1 = 1850.0;
    double N_shaft = k_zap * N1 + N2;
    double N_motor = N_shaft / eta_red;

    // Вивід результатів
    cout << fixed << setprecision(6);
    cout << "--- Розрахунок продуктивності екструдера (D=" << D*1000 << " mm) ---" << endl;
    cout << "Теоретична продуктивність (Qt): " << Qt << " m^3/s" << endl;
    cout << "Зворотний потік (Qp):      " << Qp << " m^3/s" << endl;
    cout << "Реальна витрата (Q_real):    " << Q_real << " m^3/s" << endl;
    cout << "-----" << endl;
    cout << setprecision(2);
    cout << "Потужність на створення тиску: " << N2 << " W" << endl;
    cout << "Необхідна потужність двигуна: " << N_motor / 1000.0 << " kW" << endl;
    cout << "Прийнята потужність двигуна:  5.5 kW" << endl;

    return 0;
}

```

ДОДАТОК Д

Co-extrusion Head for the Production of Double-Layer Pipes with Enhanced Interlayer Adhesion

Dunin K. D., student, Hondliakh O. V., Doctor of Technical Sciences, Professor
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv

This paper presents a design of a co-extrusion head that addresses the issue of delamination in double-layer pipes by creating a mechanical interlocking connection between the inner and outer layers directly during the forming process.

Keywords: co-extrusion, double-layer pipe, adhesion, mechanical interlocking, forming head, polymers

Introduction. In the production of double-layer pipes from dissimilar materials, the problem of insufficient adhesion at the interlayer interface often arises. Standard extrusion methods do not provide a reliable bond, which leads to delamination of the product during cooling or operation. This issue is particularly acute when using recycled raw materials or materials with differing physicochemical properties.

The proposed design of the co-extrusion head (Fig. 1) is based on creating a structure of mutual «biting» of the layers. The main components of the device are: The adapter sleeve (1) and the distribution plate (2), which provide the melt supply for the inner layer. The interlocking mold (3), which is the key element of the modernization. The compression sleeve (4) and the outer die (5), which form the outer profile of the pipe [1].

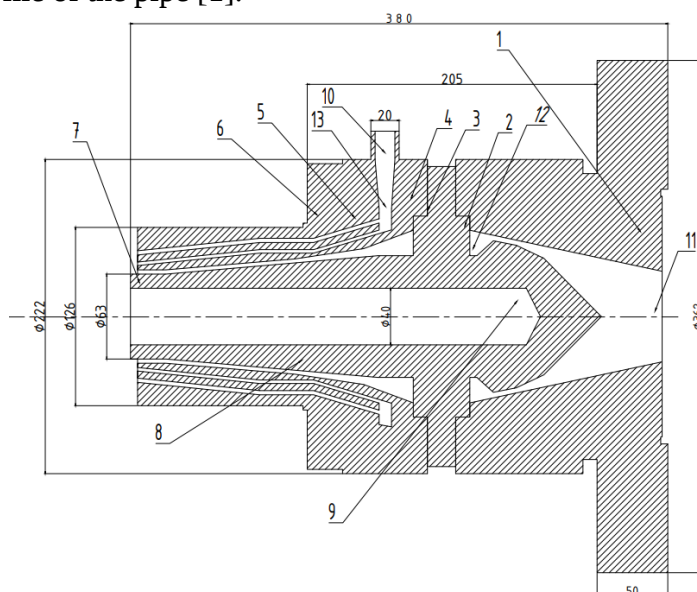


Figure 1 – Schematic representation of the extruder head for double-layer pipes: 1 – adapter sleeve; 2 – distribution plate; 3 – interlocking mold; 4 – compression sleeve; 5 – outer die; 6 – die adjustment screw; 7 – mandrel; 8 – fixed mandrel; 9 – lock nut; 10 – support plate; 11 – inlet channel; 12 – distribution holes; 13 – auxiliary extruder channel

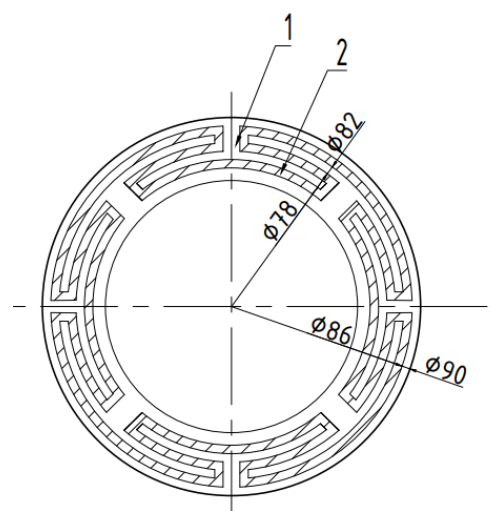


Figure 2 – Schematic representation of the geometry of the channels for the mechanical connection of pipe layers: 1 – groove; 2 – protrusion

A feature of the geometry is that the gap between the interlocking mold (3) and the fixed mandrel (8) gradually contracts, forming a specific relief on the surface of the inner layer before its contact with the melt of the outer layer.

The forming process occurs in the following way.

The melt of the inner layer passes through the distribution plate (2) into the zone of the interlocking mold (3). Simultaneously, the melt of the outer layer is supplied through the space between the

compression sleeve (4) and the mold (3). At the contact boundary of the two flows, a "mechanical lock" structure is created, where the layers penetrate into each other (Fig. 2).

The implementation of the proposed modernization of the co-extrusion head allows for a radical change in the physics of the polymer layer connection process, which yields the following results:

The introduction of a guide sleeve with a special geometry of grooves transforms the interlayer interface from a traditionally flat to a complex relief structure. Thanks to the longitudinal recesses and protrusions, the actual area of the contact surface, where adhesive interaction occurs, increases by 60%–85% compared to standard forming heads. This provides significantly higher tensile and shear strength between the layers [2].

The main achievement is the creation of a mechanical interlocking effect. Since the melt of the outer layer under pressure fills the T-shaped cavities in the still hot inner layer, an inseparable "lock" is formed after cooling. This completely eliminates the risk of pipe delamination, which often occurs due to different thermal shrinkage of materials or during mechanical bending of the product during installation [2].

From a practical point of view, such technology allows for the successful combination of materials that have low chemical affinity, for example, using a virgin polymer for the outer protective layer and cheap recycled raw materials for the inner one. This ensures high reliability of the finished system without the need to introduce additional adhesive layers into the design, which significantly simplifies the technological scheme and reduces the production cost [2].

3D modeling. The co-extrusion head with a mechanical interlocking mechanism was created in the SolidWorks environment (Fig. 3-4).

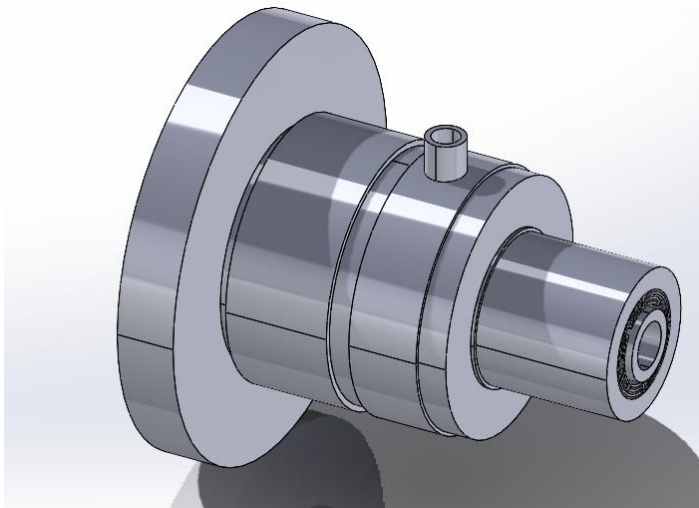


Figure 3 – Co-extrusion head general view

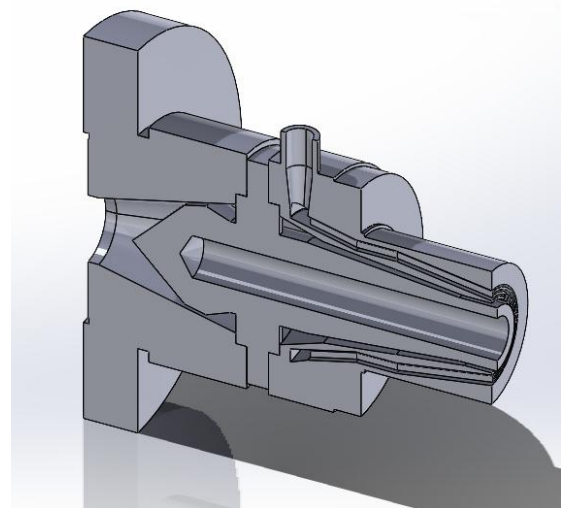


Figure 4 – Co-extrusion head cross-section

Numerical modeling. Numerical modeling was performed in the Ansys environment. Material of the extrusion head is 38Kh2MYuA steel. The choice of 38Kh2MYuA steel is due to the need to ensure maximum durability of the extrusion head. This allows for the guarantee of the stability of the geometric dimensions of the parts under high contact loads, abrasive influence of composite materials, and increased operating temperatures.

Used the Remote Displacement fixture, which rigidly secures the extruder head, but allows the material to expand (Fig. 5).

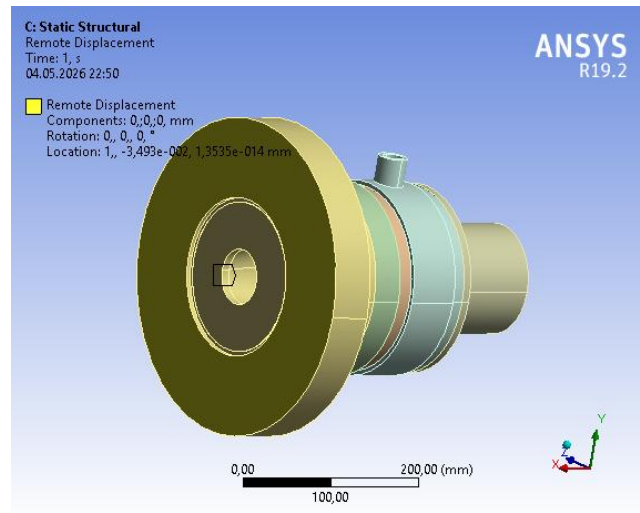


Figure 5 – Remote Displacement fixture

Inside the head, Pressure loads were set in three zones. Load values (Fig. 6):

Pressure A = 25 MPa (Inlet opening);

Pressure B = 20 MPa (Middle part);

Pressure C = 15 MPa (Mandrel).

The material temperature is 175 °...180 °C. This temperature is optimal for PVC, at which the material does not lose its properties (Fig. 7).

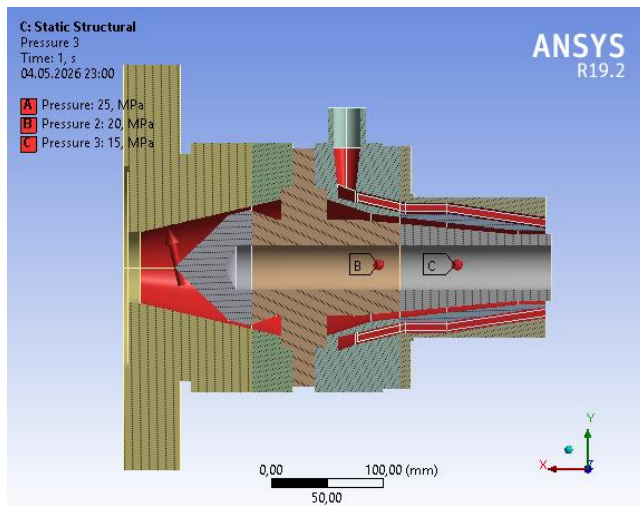


Figure 6 - Internal loads

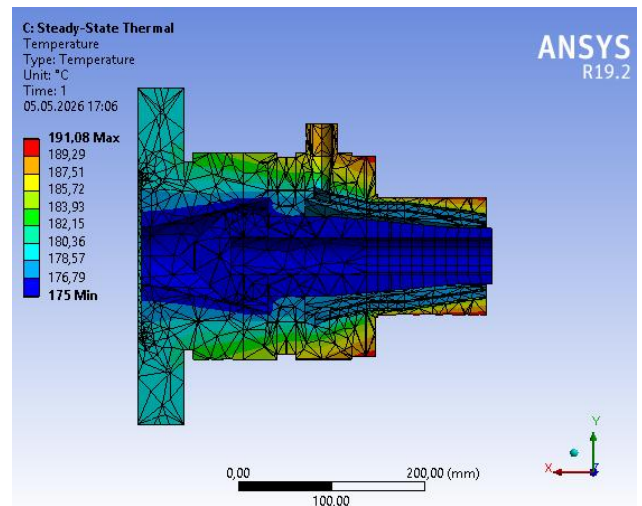


Figure 7 - Temperature regime

At these temperatures and loads, the maximum equivalent von Mises stresses are $\sigma_{max} = 275$ MPa, and the safety factor is $n = 3.03$ (Fig. 8-9).

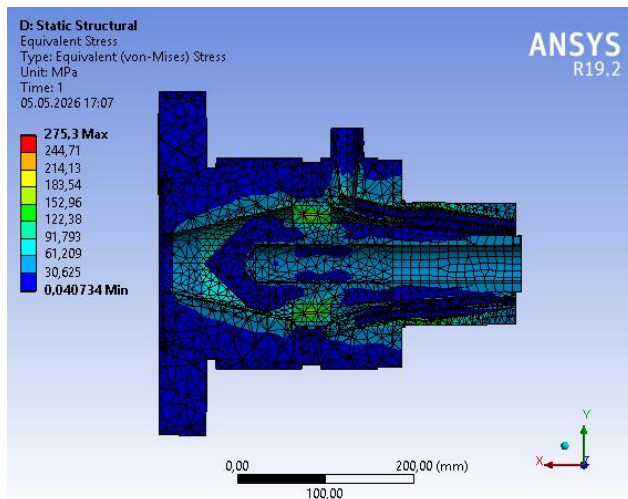


Figure 8 – Maximum equivalent von Mises stresses

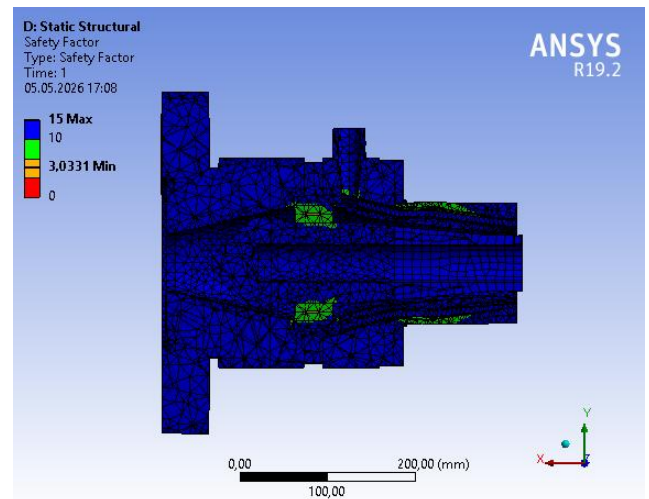


Figure 9 – Safety factor

Conclusion. The application of the proposed co-extrusion head with a mechanical interlocking mechanism significantly improves the quality of double-layer pipes. This technology is promising for the production of multi-layer systems where high reliability of interlayer bonding is required without the use of additional adhesives. Calculations showed that the maximum stresses in the body of the modernized head, $\sigma_{\max} = 275$ MPa, do not exceed the permissible values for 38Kh2MYuA steel. The resulting safety factor $n = 3.03$ confirms the reliability of the design and its ability to operate for extended periods under pressures up to 25 MPa and operating temperatures up to 200°C. Therefore, the modernized head is functional.

List of References

1. Zeng Li; Zhang Zheng; Zhang Lijuan; Wang Ying; Chen Siyuan URL: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/091502837/publication/CN118219528A?q=CN%20118219528>
2. Sivetsky, V. I., Kurylenko, V. M., & Ivitsky, I. I. (2018). Technological Equipment for the Production of Building and Polymer Products - 2. Equipment for Polymer Processing. Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/4cd4fd11-cd29-45be-8aaf-2fa1e2b5098b/content>