

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

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«_____» _____ 2026 р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра

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

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: Екструдер для виробництва полімерних труб з модернізацією

формувальної головки

Студент IV к, групи ЛП-22

(шифр групи)

Єлінов Микола Максимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник проекту: асистент Гур'єва Л.Н.

(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 _____

Київ 2026 рік

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

Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 133 Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Олександр Сокольський**

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту
Єлінов Микола Максимович

1. Тема проекту «Екструдер для виробництва полімерних труб з модернізацією формувальної головки», керівник проекту Гур'єва Людмила Наумівна, асистент, затверджені наказом по університету від «19.05» 2026 р. № 1817-С
2. Термін подання студентом проекту 16.06.2026 р.
3. Вихідні дані до проекту: продуктивність лінії – 50 кг/год; характеристики виробів: зовнішній діаметр труб – 55 мм, товщина стінки $8,4 \pm 1$ мм, довжина труб у відрізках – 6000 ± 100 мм; габаритні розміри: довжина – 28500 ± 200 мм, ширина – 22600 ± 100 мм, висота – 2100 ± 100 мм; маса ≤ 6200 кг.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ; 1. Призначення та галузь застосування виробу, який проектується; 2. Технічна характеристика базової машини; 3. Опис базової конструкції, її основних частин та принципу дії; 4. Літературно-патентний огляд питання модернізації; 5. Розрахунки; 6. Охорона праці та навколишнього середовища; 7. Технологія машинобудування; Висновки; Перелік посилань; Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Технологічна схема лінії для виробництва полімерних труб; 2. Загальний вигляд екструдера ЧП45х25; 3. Складальний кресленик модернізованої формувальної головки; 4. Кресленик з деталюванням; 5. Плакат з 3D моделюванням модернізованої головки; 6. Плакат з числовим розрахунком модернізованої головки.

6. Консультанти розділів проекту*

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

7. Дата видачі завдання 18.05.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вступ; Призначення та галузь застосування виробу, який проектується.	18.05.26-19.05.26	
2	Технічна характеристика базової машини	20.05.26-21.05.26	
3	Опис базової конструкції, її основних частин та принципу дії	22.05.26-23.05.26	
4	Літературно-патентний огляд питання модернізації	24.05.26-26.05.26	
5	Розрахунки формувальної головки, які підтверджують доцільність модернізації та її працездатність; Оформлення креслень	27.05.26-02.06.26	
6	Охорона праці та навколишнього середовища	27.05.26-30.05.26	
7	Технологія машинобудування	31.05.26-02.06.26	
8	Оформлення пояснювальної записки	03.06.26-11.06.26	

Студент

Керівник проекту

Микола ЄЛІНОВ

Людмила ГУР'ЄВА

РЕФЕРАТ

Дипломний проект бакалавра на тему “Екструдер для виробництва полімерних труб з модернізацією формувальної головки” включає текстову і графічну частину. Текстова частина має 7 розділів і додатки. Загальний обсяг роботи – 111 сторінки, 61 ілюстрацію, 8 таблиць і 31 посилань.

Графічна частина містить 6 аркушів креслеників: 3 креслення формату А3, 2 плакати з 3D моделюванням та результатами розрахунку в ПЗ “ANSYS” та одне деталювання формату А1.

У цій роботі розглянуто лінію з виробництва труб з поліетилену та один з її агрегатів – одношнековий екструдер. Перед автором було поставлено завдання усунути проблему утворення спаїв у трубах під час проходження розплаву крізь дорнотримач. Запропоновано модернізацію формувальної головки – підвищення теплопровідності дорнотримача за рахунок встановлення в нього пластин, виготовлених з мідного сплаву.

Модернізований вузол було перевірено на працездатність з використанням вищезгаданого ПЗ “ANSYS”. Висновок щодо обчислень – запропоноване рішення покращує нагрівання деталі та не призводить до зменшення коефіцієнту запасу міцності нижче допустимого значення.

В розділі охорони праці було надано рекомендації щодо забезпечення безпечної роботи працівників виробничої ділянки згідно з чинними стандартами, нормами та законодавством України.

Також, було розроблено технологічний процес виготовлення деталі формувальної головки екструдера – вихідного сопла. В розділі наявні всі необхідні ілюстрації, маршрутна карта, ескізні карти та операційні карти.

За результатами проведеної роботи було написано доповідь на всеукраїнську конференцію та опубліковані тези.

Ключові слова: ЕКСТРУДЕР, ГОЛОВКА, ДОРНОТРИМАЧ, ТРУБИ, ANSYS.

ABSTRACT

The bachelor's project for diploma on the topic of "Extruder for the production of polymer pipes with a modernization of an extrusion head" consists of text and graphical parts. Text part has 7 chapters and appendices. Total volume of project is 111 pages, 61 images, 8 tables and 29 references.

Graphical part has 6 drawings: 3 drawings of A1, 2 posters of 3D modeling and "ANSYS" calculations results, and one detailing drawing of A1.

This paper examines a polyethylene pipe production line and one of its machines – a single-screw extruder. The author was tasked with solving the problem of welds forming in the pipes as the melt passes through the mandrel holder. It is proposed to modernize the extrusion head by improving the thermal conductivity of the mandrel holder through the installation of copper alloy plates inside of it.

The upgraded assembly was tested for functionality using the aforementioned "ANSYS" software. The conclusion based on the calculations is that the proposed solution improves heat transfer in the component and does not reduce the safety factor below the permissible value.

In the section of occupational safety, the recommendations for ensuring the safety of production site employees were provided in accordance with applicable standards, regulations, and Ukrainian law.

In addition, the manufacturing process was developed to create one of the extrusion head's parts – the output nozzle. The chapter includes all the essential images, routing and process sheets.

Based on the results of the work conducted, a report was prepared for the national conference and abstracts were published.

Key words: EXTRUDER, EXTRUSION HEAD, MANDREL HOLDER, PIPES, ANSYS.

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

L – довжина черв'яка, мм

D – діаметр черв'яка, мм

d – діаметр отвору або каналу, мм

δ – зазор між корпусом і витком, мм

e – ширина витка, мм

t – крок гвинтової нарізки, мм

μ_c – коеф. Пуассона

E – модуль Юнга, МПа

λ – коефіцієнт ізотропної теплопровідності, Вт/(м*К)

σ – нормальне напруження, МПа

τ – дотичне напруження, МПа

G – вага черв'яка, Н

$M_{зг}$ – згинальний момент, Н*м

$M_{кр}$ – крутний момент, Н*м

p – тиск, Па

A – площа поперечного перерізу, мм²

I – момент інерції, мм⁴

W – момент опору, мм³

ν – об'ємна витрата, см³/с

q – тепловий потік, Вт/м²

N – потужність, кВт

Re – критерій Рейнольдса

Nu – критерій Нусельта

Pr – критерій Прандтля

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ, ЯКИЙ ПРОЕКТУЄТЬСЯ	10
2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ.....	12
3 ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ	13
4 ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД ПИТАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	15
4.1 Огляд літератури	15
4.2 Патентний огляд варіантів модернізації головки екструдера	15
4.3 Обґрунтування вибору модернізації головки екструдера	23
5 РОЗРАХУНКИ	25
5.1 ПАРАМЕТРИЧНІ РОЗРАХУНКИ.....	25
5.1.1 Розрахунок геометричних параметрів черв'яка	25
5.1.2 Визначення коефіцієнта геометричної форми головки.....	26
5.1.3 Продуктивність машини по зоні дозування з урахуванням впливу головки.....	29
5.1.4 Розрахунок потужності приводу	32
5.2 РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ, ЖОРСТКІСТЬ ТА СТІЙКІСТЬ	35
5.2.1 Визначення навантаження на черв'як	35
5.2.2 Розрахунок діючих нормальних напружень	39
5.2.3 Розрахунок діючих дотичних напружень.....	41
5.2.4 Аналіз результатів розрахунку на міцність	43
5.2.5 Розрахунок черв'яка на жорсткість.....	43
5.2.6 Розрахунок черв'яка на стійкість	44
5.3 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ЧЕРВ'ЯЧНОГО ПРЕСА	45
5.3.1 Енергетичний баланс	45
5.3.2 Основний тепловий розрахунок.....	46
5.4 РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ ТА ЖОРСТКІСТЬ В ПЗ ANSYS	49
5.4.1 Вихідні дані.....	50
5.4.2 Температурні навантаження	51
5.4.3 Механічні навантаження та граничні умови	55
5.4.4 Результати розрахунків базового вузла	56
5.4.5 Результати розрахунків модернізованого вузла.....	61
5.5 РОЗРАХУНОК НАГРІВАННЯ ВУЗЛУ З ПЛИНОМ ЧАСУ	66
5.5.1 Джерела температури	66
5.5.2 Параметри розрахунку	68
5.5.3 Результати розрахунку нагрівання базового вузлу	68
5.5.4 Результати розрахунку нагрівання модернізованого вузлу.....	70
5.6 ВИСНОВКИ ДО РОЗРАХУНКІВ В ПЗ "ANSYS"	71

					ЛП22.057246.01-70 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата				
Розроб.	Елінов М.М.				Екструдер для виробництва полімерних труб з модернізацією формувальної головки		Літ.	Аркуш
Перев.	Гур'єва Л.Н.							7
							НТУУ "КПІ" ФАПІЕ	
Н. Конт.								
Затв.	Витвицький В.М.							

5.7	Застосування мови програмування C++ для розрахунків на міцність.....	72
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....		74
6.1	Загальні положення.....	74
6.2	Безпека при роботі з машиною для лиття під тиском та її механізмами	75
6.3	Повітря робочої зони	75
6.4	Виробничий шум.....	76
6.5	Пожежна безпека.....	77
7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ		79
7.1	Опис і призначення деталі	79
7.2	Технологічний процес виготовлення деталі	80
7.3	Призначення пристосування для обробки деталі	86
ВИСНОВКИ.....		87
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ		89
ДОДАТКИ.....		92

					ЛП22.057246.01-70 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Полімерне машинобудування – це галузь хімічного машинобудування, яка включає в себе проектування, виробництво та модернізацію обладнання для переробки полімерів, а також обладнання для виготовлення виробів з полімерних матеріалів.

Полімерами називають високомолекулярні сполуки природного та штучного походження, які складаються з повторюваних молекулярних ланцюгів. Вони мають такі бажані властивості як задовільна міцність, висока пластичність та низька щільність. Полімери не схильні до корозії, а деякі з них мають високу хімічну стійкість, що дозволяє використовувати їх в агресивних хімічних середовищах.

Розвиток полімерної промисловості призвів до появи широкої номенклатури полімерних матеріалів з найрізноманітнішими властивостями. Поява такої великої кількості різних матеріалів дала поштовх на подальший розвиток виробництва пластмасових виробів, для якого використовується високотехнологічне обладнання, як наприклад – екструдер.

Екструдер, або ж черв'ячний прес, використовується для переробки полімерів та виготовлення виробів з полімерних матеріалів, наприклад – труб, плівок, дитячих іграшок, корпусів для гаджетів, електроприладів та інших виробів.

У цьому дипломному проекті було розглянуто одного з представників обладнання для виготовлення полімерних виробів – черв'ячний прес ЧП-45 та його формуючу головку.

Метою цієї роботи є проектування одночерв'ячного екструдера для виготовлення труб з поліетилену та вирішення важливої задачі – покращення їхньої якості за рахунок усунення спайних швів (спаїв), що досягається модернізацією формувальної головки.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВИРОБУ, ЯКИЙ ПРОЕКТУЄТЬСЯ

Поліетиленові труби, які виготовляються за допомогою екструдера, використовуються в будівельній галузі для водо- та газопостачання, додаткової ізоляції та захисту електричних проводів, а також у сільському господарстві, у системах іригації.

Такі труби виготовляються на екструдерах, а діаметр труби та товщина стінки можуть регулюватися за допомогою зміни спеціальної насадки на виході з циліндру черв'ячного преса – формувальної головки.

В цій роботі розглядається виробництво труб з пластику ПЕВГ (Поліетилен високої густини, інша назва – поліетилен низького тиску). Перевагами цього матеріалу є задовільна міцність на пару з малою густиною, що дозволяє робити досить міцні та легкі вироби, а також велика стійкість до хімічного впливу: матеріал не реагує з лугами, солями та більшістю органічних та неорганічних кислот [1]. Під час експлуатації ПЕВГ можна нагрівати приблизно до 80-90 градусів за Цельсієм. При такій температурі пластик починає розм'якшуватися.

Цей набір властивостей дозволяє використовувати полімер як в побуті, у тому числі для зберігання і нагрівання їжі у мікрохвильовій печі, так і в хімічній промисловості – для зберігання кислот та лугів.

Технологічна лінія, призначена для виробництва таких труб (рис. 1.1), працює таким чином:

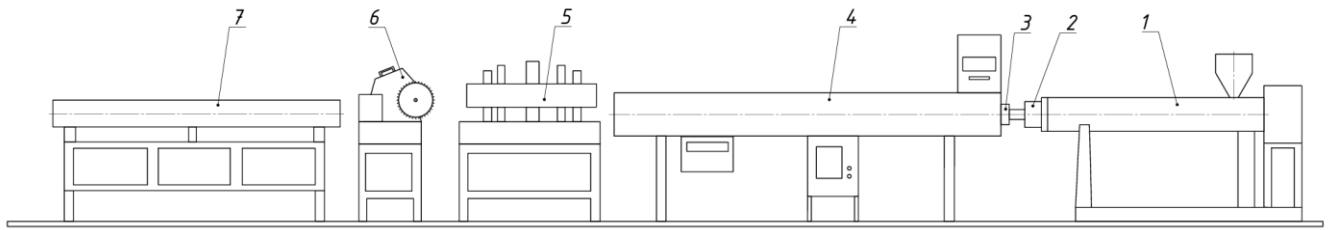


Рисунок 1.1 – Технологічна лінія для виробництва труб з поліетилену:

1 – екструдер; 2 – формувальна головка; 3 – калібруюча втулка; 4 – вакуумна ванна; 5 – тягнучий пристрій; 6 – пила; 7 – приймаючий пристрій.

Сировинний матеріал у вигляді гранул з поліетилену потрапляє у екструдер 1 через бункер, де відбувається його плавлення та просування вздовж екструдера до формувальної головки 2. В наслідок її проходження, розплав отримує потрібну профільну форму. Далі, виріб проходить через калібруючу втулку 3, де його розміри вирівнюються до потрібних, після чого виріб проходить через вакуумну ванну 4, в якій він охолоджується для зберігання своєї форми. Протягування виробу відбувається за допомогою тягнучого пристрою 5, після чого труба нарізується пилою 6 та відправляється на приймаючий пристрій 7, з якого працівники або роботизовані маніпулятори знімають її.

2 ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БАЗОВОЇ МАШИНИ

1. Продуктивність лінії – ≤ 50 кг/год.
2. Характеристики виробів:
 - зовнішній діаметр труб – 55 мм;
 - товщина стінки – $8,4 \pm 1$ мм;
 - довжина труб у відрізках – 6000 ± 100 мм.
3. Лінійна швидкість відведення виробів, що забезпечується механізмами – 0,5–5 м/хв.
4. Потужність, що споживається – 45 кВт.
5. Встановлена потужність – $\leq 52,65$ кВт.
6. Електропостачання:
 - сітка змінного струму – трифазна з заземленням нейтралі;
 - напруга – 380/220 В;
 - частота – 50 Гц.
7. Повітропостачання:
 - стиснуте повітря 7–9 класу забрудненості за ГОСТ 17433-80;
 - тиск – 0,3 – 0,6 МПа;
 - об'ємна витрата – не більше 1,5 м³/год.
8. Водопостачання:
 - тиск води – 0,2 – 0,4 МПа;
 - витрата – 3,5 м³/год.
9. Габаритні розміри:
 - довжина – 28500 ± 200 мм;
 - ширина – 2260 ± 100 мм;
 - висота – 2100 ± 100 мм.
10. Маса – ≤ 6200 кг.

3 ОПИС БАЗОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ, ЇЇ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ

Черв'ячний прес ЧП 45х25 (рисунок 2.1) – це машина, яка використовується для переробки гранул термопласту в розплав з його подальшим рівномірним видавлюванням у формувальну головку з метою отримання пластикового виробу певної форми [2].

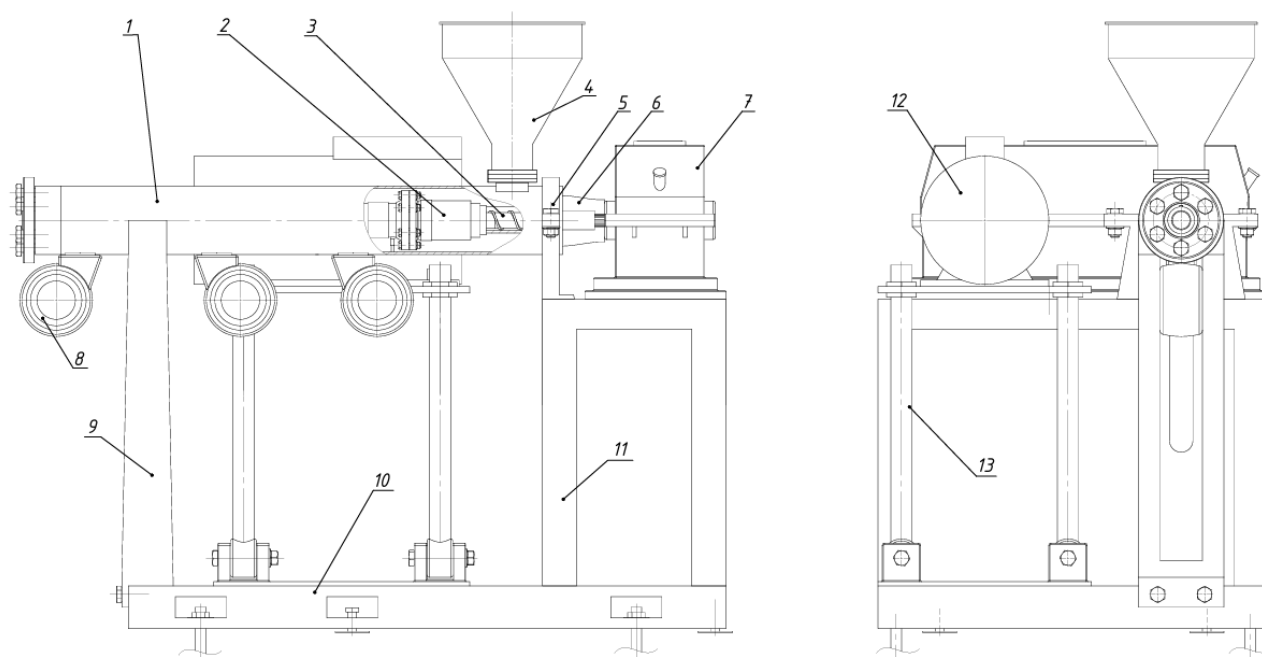


Рисунок 3.1 – Схема ЧП 45х25:

1 – зовнішній корпус, 2 – внутрішній корпус, 3 – шнек, 4 – завантажувальний бункер, 5 – опора кожуха, 6 – кожух швидкохідного вала, 7 – редуктор, 8 – вентилятор, 9 – опорна колона, 10 – опорна плита, 11 – стіл редуктора, 12 – електродвигун, 13 – стіл електродвигуна.

В цій роботі розглядається машина для екструзії труб з поліетилену, проте принцип роботи у всіх черв'ячних пресів однаковий: головним робочим органом виступає шнек (черв'як) 3, який обертається у внутрішньому корпусі 2 та перетворює тверді гранули полімеру, які потрапляють у завантажувальну частину корпусу через бункер 4, на розплав. Обертаючись, шнек створює тиск на гранули, що призводить до їх скорішого пом'якшення та ущільнення матеріалу. За допомогою гвинтової навивки черв'як проштовхує розплав все далі по внутрішній частині корпусу, аж доки він не потрапить у формувальну головку – вузол, приєднаний до корпусу за допомогою фланця, в якому розплав приймає встановлену конструкторами та технологами форму виробу, охолоджується й виходить з неї як майже готовий продукт.

Нагрівання екструдера (внутрішнього корпусу та шнека) відбувається за допомогою електронних нагрівачів, як наприклад хомутові, кільцеві та стрічкові електронагрівачі. За допомогою програмного забезпечення, оператор контролює температуру нагрівання екструдера. Корпус має декілька температурних зон, кількість яких залежить як від довжини екструдера, так і від характеристик матеріалу та параметрів вихідного продукту. Охолодження може здійснюватися як повітряно за допомогою вентиляторів, так і за допомогою води. Також додаткового нагрівання може потребувати й головка, в такому випадку використовують пластинчаті та соплові електронні нагрівачі.

Для збереження та рівномірного розподілення тепла, зони нагріву розділені перегородками, а внутрішній корпус закритий кожухом, який має теплоізоляційні властивості (зовнішній корпус).

4 ЛІТЕРАТУРНО-ПАТЕНТНИЙ ОГЛЯД ПИТАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ

4.1 Огляд літератури

Метою літературно-патентного огляду є вибір способу модернізації трубної головки екструдера. В ході виконання цієї роботи, мною було проведено знайомство зі спеціалізованою літературою [1-4], як з джерелами знань про проектування та вдосконалення черв'ячних машин, а також проведено пошук рішень для модернізації з огляду на існуючі проблеми, описані в літературі.

В згаданих джерелах описано методологію розробки та покращення екструдерів за допомогою існуючих технічних рішень. Також, наведено рекомендації щодо подальшої експлуатації та ремонту створеного обладнання.

В ході огляду вищезгаданих посібників та підручників і ознайомлення з варіантами базових конструкцій формувальної головки, мною було проведено аналіз представлених способів модернізації відомого вузла черв'ячного пресу.

4.2 Патентний огляд варіантів модернізації головки екструдера

Згідно з джерелом [5] розглянуто конструкцію трубної головки, в якій дорнотримач виконано у вигляді кільця з поздовжніми отворами. В робочому каналі між дорнотримачем і кільцевим випускним отвором розміщено кільцеву вставку з отворами, розташованими рівномірно вздовж співвісних з поздовжньою віссю кільцевої вставки кіл, що дозволяє вводити в робочий канал додаткові поздовжні неперервні елементи, за допомогою яких збільшується міцність кінцевого виробу (рис. 1).

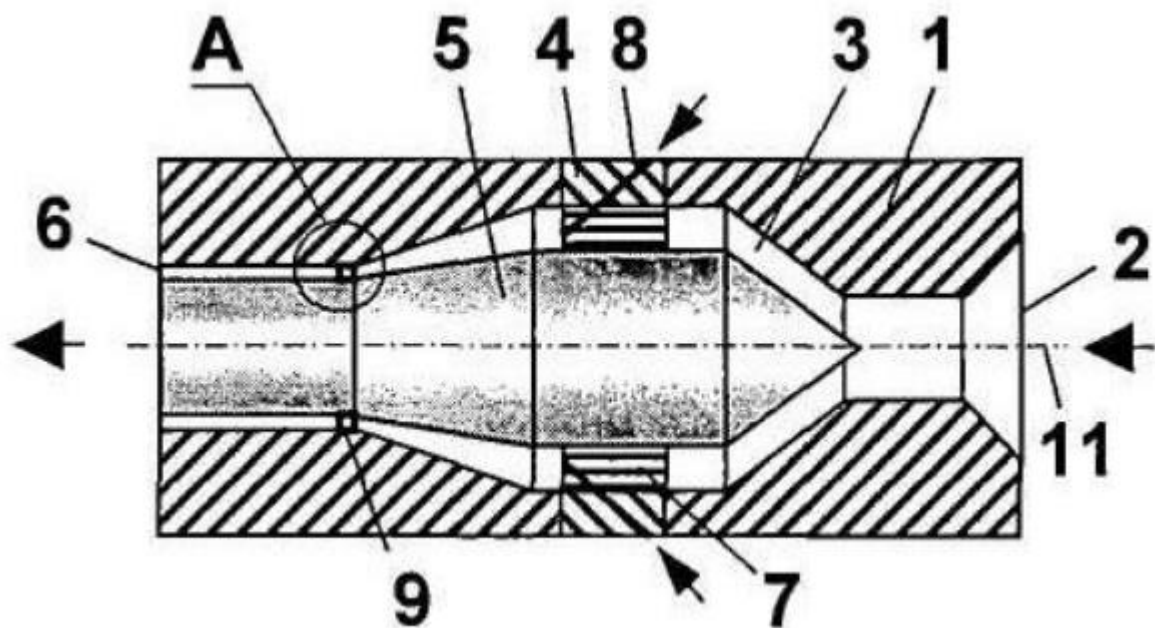


Рисунок 4.1 – Трубна головка в якій в дорнотримачі виконано додаткові отвори для введення в робочий канал поздовжніх неперервних елементів.

В джерелі [6] пропонується конструкція трубної головки, завдяки якій полегшуються роботи по заміні деталей та очищенню, досягається зменшення розмірів конструкції та усувається необхідність у вирівнюванні вузла. Досягається це завдяки тому, що блок матриці, в якому об'єднані ніпельна частина, матрична частина, основний стрижень та картридж, можна легко з'єднувати з блоком основного корпусу головки по одному завдяки наведеним в патенті конструктивним рішенням (рис. 2).

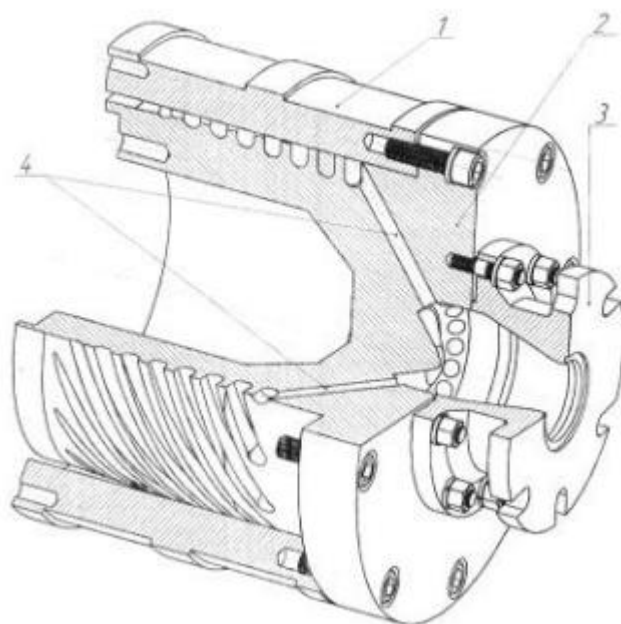


Рисунок 4.3 – Трубна головка зі збільшеними діаметрами радіальних каналів

Згідно з джерелом [8] пропонується конструкція головки в якій у дорнотримачі передбачено наскрізний отвір, а стінка цього отвору, що знаходиться найближче до дорну, розташована врівень із його зовнішньою поверхнею (рис. 4); це дозволяє гарантувати, що розплавлений матеріал зможе безперешкодно пройти через наскрізний отвір, не застрягаючи в тримачі, що призводить до зменшення гідравлічного опору розплаву та усунення зварних швів, що підвищує міцність труби.

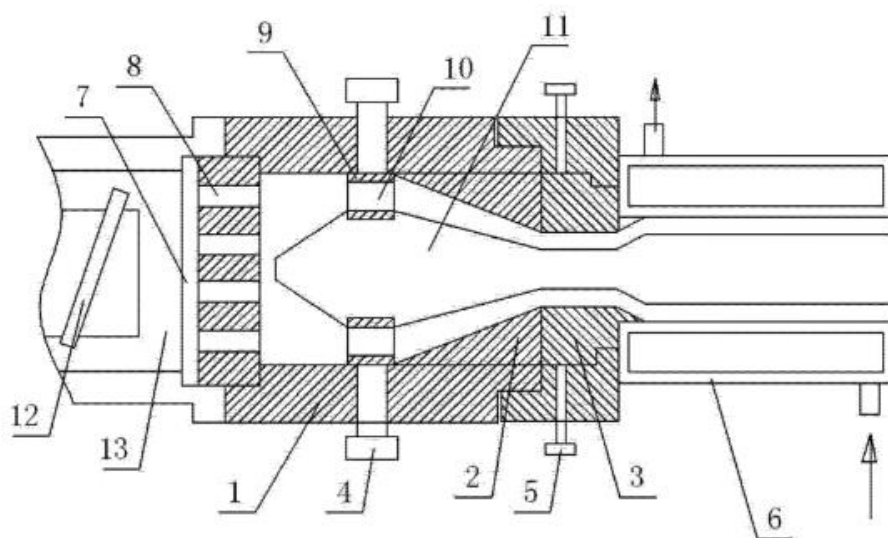


Рисунок 4.4 – Трубна головка з наскрізним отвором у дорнотримачі

В джерелі [9] пропонується екструзійна гранулювальна головка для термопластів, що містить корпус з виконаними паралельно його поздовжній осі каналами, всередині кожного з яких розташована втулка, один торець якої зафіксовано буртиком каналу корпусу, а другий - знімним упором, в якій втулки розташовані в каналах з радіальним зазором, а упор виконано спільним для всіх каналів у вигляді різальної пластини з отворами навпроти каналів (рис. 5). Пропонована корисна модель поліпшує температурний режим течії термопласту в каналах екструзійної головки, що поліпшує якість одержуваного екструдату.

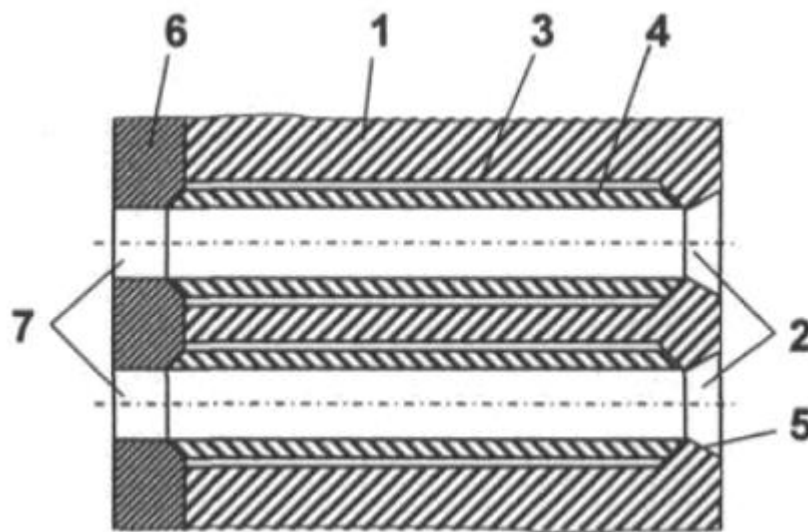


Рисунок 4.5 – Головка екструдера з втулками в каналах з радіальним зазором

В джерелі [10] пропонується конструкція екструзійної головки для формування порожнистого виробу, що містить корпус, розміщений в його порожнині дорн з каналом для подавання повітря всередину формованого порожнистого виробу. Корпус виконано з немагнітного матеріалу, із зовнішнього боку корпусу на ділянці розміщення дорна змонтовано котушку індуктивності, а дорн виконано з магнітного матеріалу з точкою Кюрі, що відповідає температурі перебігу процесу формування, завдяки чому вдається досягнути певного температурного режиму, використовуючи індукційне нагрівання (рис. 6).

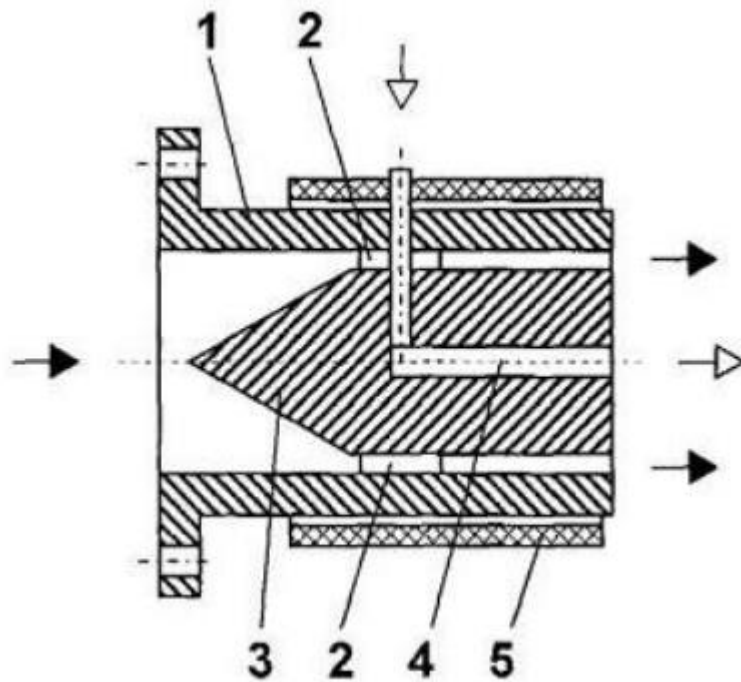


Рисунок 4.6 – Головка екструдера з внутрішнім індукційним підігрівом

В джерелі [11] запропоновано конструкцію головки, в якій розміщені два розподільних елементи, розташованих один навпроти одного в кільцевому зазорі: всередині — на внутрішній поверхні зовнішньої циліндричної втулки, а зовні — на зовнішній поверхні внутрішньої циліндричної втулки, розташованих по центру поршня виштовхувача, причому пластичний матеріал, розподілений по колу обох розподільних елементів, виходить у нижній частині поршня виштовхувача (рис. 7). Така конструкція дозволяє покращити розподіл потоків розплаву в матриці та безперебійну гомогенізацію в накопичувальному просторі при одночасному збільшенні пропускної здатності та швидкості виробництва.

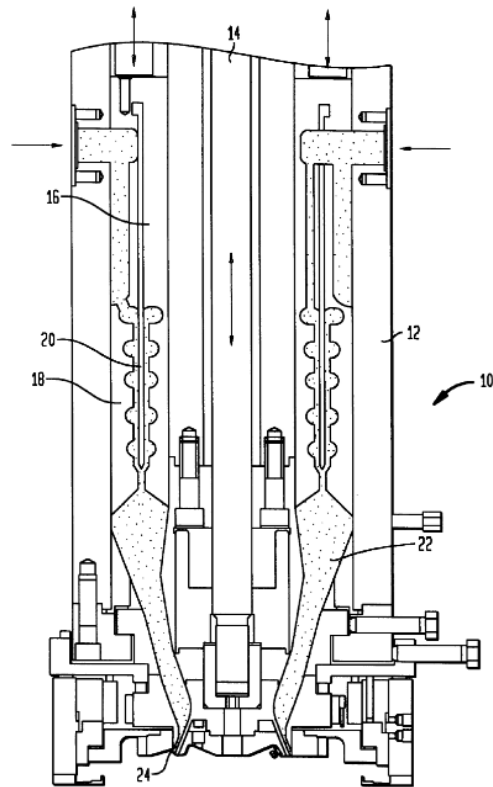


Рисунок 4.7 – Екструзійна головка з двома розподільними елементами

Згідно з джерелом [12], запропоновано конструкцію головки, що містить циліндричний корпус з поздовжнім каналом, зафіксований на зовнішній поверхні циліндричного корпусу знімний радіатор охолодження, нагрівник, а також розташоване на виході з поздовжнього каналу сопло з конічним каналом. Радіатор охолодження виконано з поздовжнім розрізом для його фіксації на зовнішній поверхні циліндричного корпусу за рахунок сил пружності (рис. 8). Така конструкція призводить до запобігання передчасному плавленню полімеру в циліндричному корпусі та його надійного подавання до сопла, що покращує якість кінцевого виробу і забезпечує надійність роботи екструдера.

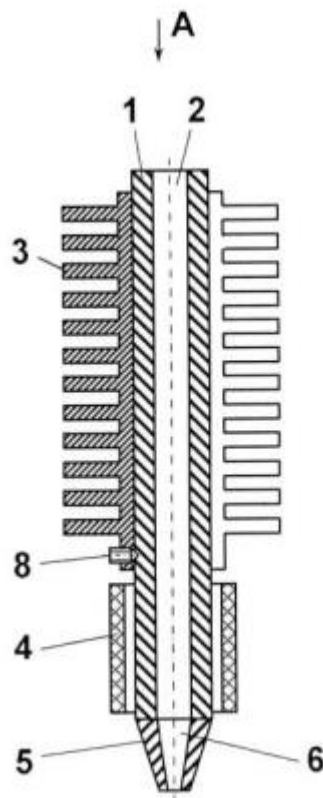


Рисунок 4.8 – Головка зі знімним радіатором

Згідно з джерелом [13], запропоновано конструкцію головки, що містить корпус та дорн, вставлений на дорнотримачі, утворюючи формуючий канал для протікання полімеру. В такій конструкції, принаймні один дорнотримач оснащено щонайменше одним пристроєм додаткового живлення з каналом, вихідний отвір якого направлений в напрямку вихідного формуючого каналу, за допомогою якого можливо регулювати розміщення вихідного отвору по висоті формуючого каналу (рис. 9). Завдяки такому рішенню, через формуючу головку можливо вводити датчики у виріб для відстеження його стану, що дозволить зменшити кількість аварій з трубами, які знаходяться під високим тиском.

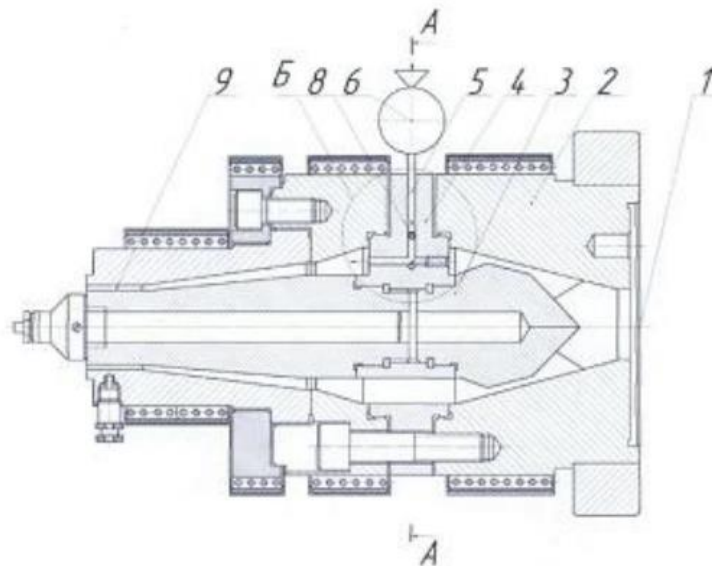


Рисунок 4.9 – Екструзійна головка з дорнотримачем з пристроєм додаткового живлення

4.3 Обґрунтування вибору модернізації головки екструдера

Остаточним варіантом для модернізації було обрано рішення, описане в джерелі [14]. Такий вибір обґрунтований тим, що запропонована конструкція вирішує важливу проблему формування виробу під час екструзії – утворення спайних швів, які зменшують міцність виробу.

Зазвичай, в головках виконано дорнотримач, матеріал якого має таку саму величину теплопровідності, як і матеріал корпусу вузла. Це призводить до того, що в прилеглих до тримача шарах розплаву, підвищується в'язкість, внаслідок чого утворюються спаї потоків розплаву після проходження ними дорнотримача. Як наслідок – утворюваний кінцевий виріб має низьку якість та видимі дефекти поверхні.

Для усунення цього недоліку, в даному патенті запропоновано наступне рішення: в дорнотримачі з боку зовнішньої поверхні корпусу виконано щонайменше один глухий отвір з розміщеною в ньому вставкою, коефіцієнт теплопровідності матеріалу якої більший за коефіцієнт теплопровідності матеріалу дорнотримача.

Схема такого рішення наведена на рис. 10.

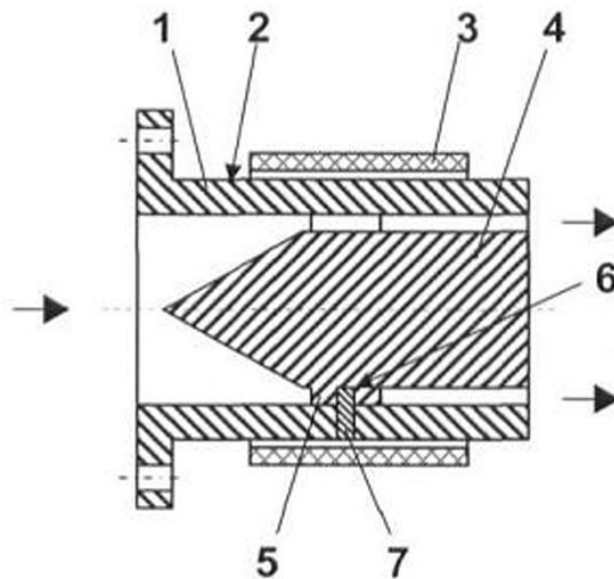


Рисунок 4.10 – Схема трубної головки у розрізі з модернізованим дорнотримачем:

1 – порожнистий корпус; 2 – зовнішня поверхня корпусу; 3 – нагрівник; 4 – дорн; 5 – дорнотримач; 6 – глухий отвір під вставку; 7 – вставка.

Наявність у дорнотримачі щонайменше однієї вставки, коефіцієнт теплопровідності матеріалу якої більший за коефіцієнт теплопровідності матеріалу дорнотримача, забезпечує більш ефективне підведення теплового потоку від нагрівника до дорнотримача. Так, у разі виконання дорнотримача зі сталі марки 38Х2МЮА (коефіцієнт теплопровідності за температури 180 °С становить 32 Вт/(м·К)), а вставки - з міді марки С10100 [15] (коефіцієнт теплопровідності за температури 180 °С становить 401 Вт/(м·К)), дорнотримач нагрівається більш інтенсивно за тієї самої потужності нагрівника. Це забезпечує підвищену температуру дорнотримача, а отже меншу в'язкість прилеглих до нього шарів розплаву, що сприяє мінімізації спайності потоків розплаву після проходження ним дорнотримача й більш рівномірній структурі термопластичного матеріалу в порожнистому виробі.

5 РОЗРАХУНКИ

5.1 Параметричні розрахунки

5.1.1 Розрахунок геометричних параметрів черв'яка

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

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

У представленій лінії використовується екструдер з черв'яком діаметром $D=45$ мм, відношенням довжини робочої частини до його діаметра $L/D=25$ [2].

Інші параметри черв'яка вибираються в залежності від матеріалу, що переробляється. У даному випадку матеріалом, що переробляється, є поліетилен і базові параметри черв'яка обчислюються виходячи з залежностей представлених нижче [3, 4]:

Крок гвинтової лінії черв'яка:

$$t = (0,8 + 1,2) * D = 1,45 * 45 \text{ мм.}$$

$$t = 45 \text{ мм.}$$

Товщина гребня черв'яка:

$$e = (0,08 + 0,1) * D = 0,095 * 45 \text{ мм.}$$

$$e = 4,275 \text{ мм.}$$

Зазор між черв'яком і внутрішнім корпусом:

$$\delta = (0,002 + 0,003) * D = 0,0024 * 45 \text{ мм.}$$

$$\delta = 0,108 \text{ мм.}$$

Глибина гвинтового каналу під завантажувальною воронкою:

$$h1 = (0,12 + 0,16) * D = 0,127 * 45 \text{ мм.}$$

$$h1 = 5,72 \text{ мм.}$$

де $i = 2,1$ – ступінь стиснення поліетилену.

Довжина торпеди з мішалкою:

$$L_{\text{торп}} = (0,6 - 0,8) * D + 70 - 45 + (0,1 - 0,5) * D = 45 \text{ мм.}$$

Довжина робочої частини черв'яка приймається:

$$L_{\text{роб}} = 25 * D = 25 * 45 = 1125 \text{ мм.}$$

Довжина зони завантаження приймається:

$$L_{\text{зав}} = (1,5 - 3) * D = 2,5 * 45 = 112,5 \text{ мм.}$$

Довжина зони дозування приймається:

$$L_{\text{доз}} = (3 - 6) * D = 5 * 45 = 225 \text{ мм.}$$

Довжина зони стиску приймається:

$$L_{\text{ст}} = L_{\text{роб}} - L_{\text{доз}} - L_{\text{зав}} = 1125 - 225 - 112,5 = 787,5 \text{ мм.}$$

Довжина опори приймається:

$$L_{\text{оп}} = 75 \text{ мм;}$$

Загальна довжина черв'яка:

$$L = L_{\text{роб}} + L_{\text{оп}} + L_{\text{торп}} = 1125 + 75 + 45 = 1245 \text{ мм.}$$

5.1.2 Визначення коефіцієнта геометричної форми головки

За допомогою формул, заснованих на спрощеному аналітичному методі розрахунку коефіцієнтів геометричної форми головки, можна визначити геометричні параметри каналів з достатньою для цієї роботи точністю.

Весь шлях проходження розплаву через канал головки розіб'ємо на декілька простіших складових і проведемо розрахунок. [3, 16]

1. Круглий циліндричний канал:

$$K_{\text{ц}} = \frac{\pi * d^4}{128 * L};$$

де d – діаметр круглого циліндричного каналу, см L – довжина круглого циліндричного каналу, см

$$K_{\text{ц}} = \frac{3,14 * 3,6^4}{128 * 60} = 0,068 \text{ см}^3.$$

r – середній радіус отвору на вході; см

2. Перший конічний кільцевий канал з конічною щілиною:

$$K_{\text{кщ}_1} = \frac{\pi(R_0 * \delta_2 - R_1 * \delta_1)}{6 * L * m}.$$

де $R_1 = 9,5$ см – середній радіус отвору на вході;

$R_0 = 0,7$ см – середній радіус отвору на виході;

$\delta_1 = 1$ см – висота щілини на вході матеріалу в кільцеву щілину;

$\delta_2 = 1$ см – висота щілини на виході матеріалу з кільцевої щілини;

$L = 16$ см – довжина конічного каналу з конічною щілиною.

$$m = \frac{2.3 * (R_0 - R_1)^2}{(R_0 * \delta_2 - R_1 * \delta_1)^2} * \lg\left(\frac{R_0 * \delta_2}{R_1 * \delta_1}\right) - \frac{(R_0 - R_1) * (\delta_1 - \delta_2)}{(R_0 * \delta_2 - R_1 * \delta_1) * \delta_1 * \delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 * \delta_1^2 * \delta_2^2}$$

$$m = \frac{2.3 * (0,7 - 9,5)^2}{(0,7 * 1 - 9,5 * 1)^2} * \lg\left(\frac{0,7 * 1}{9,5 * 1}\right) - \frac{(0,7 - 9,5) * (1 - 1)}{(0,7 * 1 - 9,5 * 1) * 1 * 1} - \frac{1^2 - 1^2}{2 * 1^2 * 1^2} = -2,6 \text{ см}^{-2}$$

$$K_{\text{кщ}_1} = \frac{3,14 * (0,7 * 1 - 9,5 * 1)}{6 * 16 * (-2,6)} = 0,11 \text{ см}^3.$$

3. Решітка:

$$K_p = \frac{z * \pi * d_p^4}{128 * b},$$

де z – кількість отворів;

d_p – діаметр отворів в решітці, см

b – товщина решітки, см

$$K_p = \frac{160 * 3,14 * 0,7^4}{128 * (-2,7)} = 0,35 \text{ см}^3.$$

4. Другий конічний кільцевий канал з конічною щілиною:

$$K_{\text{кщ}_2} = \frac{\pi(R_0 * \delta_2 - R_1 * \delta_1)}{6 * L * m},$$

де $R_1 = 9,8$ см – середній радіус отвору на вході;

$R_0 = 9,4$ см – середній радіус отвору на виході;

$\delta_1 = 1$ см – висота щілини на вході матеріалу в кільцеву щілину;

$\delta_2 = 0,4$ см – висота щілини на виході матеріалу з кільцевої щілини;

$L = 1$ см – довжина кінцевого каналу з кінчною щілиною.

$$m = \frac{2.3 * (R_0 - R_1)^2}{(R_0 * \delta_2 - R_1 * \delta_1)^2} * \lg\left(\frac{R_0 * \delta_2}{R_1 * \delta_1}\right) - \frac{(R_0 - R_1) * (\delta_1 - \delta_2)}{(R_0 * \delta_2 - R_1 * \delta_1) * \delta_1 * \delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 * \delta_1^2 * \delta_2^2}$$
$$m = \frac{2.3 * (9,4 - 9,8)^2}{(9,4 * 0,4 - 9,8 * 1)^2} * \lg\left(\frac{9,4 * 0,4}{9,8 * 1}\right) - \frac{(9,4 - 9,8) * (1 - 0,4)}{(9,4 * 0,4 - 9,8 * 1) * 1 * 0,4} - \frac{1^2 - 0,4^2}{2 * 1^2 * 0,4^2}$$
$$= 14,72 \text{ см}^{-2}$$

$$K_{\text{кщ}_2} = \frac{3,14 * (9,4 * 0,4 - 9,8 * 1)}{6 * 1 * 14,72} = 1,17 \text{ см}^3$$

5. Третій кінчний кільцевий канал з кінчною щілиною:

$$K_{\text{кщ}_3} = \frac{\pi(R_0 * \delta_2 - R_1 * \delta_1)}{6 * L * m},$$

де $R_1 = 15,8$ см – середній радіус отвору на вході;

$R_0 = 9,5$ см – середній радіус отвору на виході;

$\delta_1 = 0,73$ см – висота щілини на вході матеріалу в кільцеву щілину;

$\delta_2 = 0,2$ см – висота щілини на виході матеріалу з кільцевої щілини;

$L = 8$ см – довжина кінцевого каналу з кінчною щілиною.

$$m = \frac{2.3 * (R_0 - R_1)^2}{(R_0 * \delta_2 - R_1 * \delta_1)^2} * \lg\left(\frac{R_0 * \delta_2}{R_1 * \delta_1}\right) - \frac{(R_0 - R_1) * (\delta_1 - \delta_2)}{(R_0 * \delta_2 - R_1 * \delta_1) * \delta_1 * \delta_2} - \frac{\delta_1^2 - \delta_2^2}{2 * \delta_1^2 * \delta_2^2}$$

$$m = \frac{2.3 * (9,5 - 15,8)^2}{(9,5 * 0,2 - 15,8 * 0,73)^2} * \lg\left(\frac{9,5 * 0,2}{15,8 * 0,73}\right) - \frac{(9,5 - 15,8) * (0,73 - 0,2)}{(9,5 * 0,2 - 15,8 * 0,73) * 0,73 * 0,2} - \frac{0,73^2 - 0,2^2}{2 * 0,73^2 * 0,2^2} = 2,7 \text{ см}^{-2}$$

$$K_{\text{кщ}_3} = \frac{3,14 * (9,5 * 0,2 - 15,8 * 0,73)}{6 * 8 * 2,7} = 0,43 \text{ см}^3$$

Загальний коефіцієнт геометричної форми для всієї головки можна визначити, як обернену суму опорів окремих ділянок головки (опір дорівнює оберненій величині розрахованого коефіцієнта):

$$K_{\text{гф}} = \frac{1}{K_{\text{ц}}^{-1} + K_{\text{кщ}_1}^{-1} + K_p^{-1} + K_{\text{кщ}_2}^{-1} + K_{\text{кщ}_3}^{-1}}$$

$$K_{\text{гф}} = \frac{1}{0,068^{-1} + 0,11^{-1} + 0,35^{-1} + 1,17^{-1} + 0,043^{-1}} = 0,0197 \text{ см}^3.$$

5.1.3 Продуктивність машини по зоні дозування з урахуванням впливу головки

Продуктивність черв'ячного пресу прямо залежить від конфігурації формуючої головки, тому потрібно провести розрахунок цього параметру, виходячи з отриманих та вихідних геометричних параметрів головки [3, 4].

Об'ємна продуктивність колійної головки на передній частині черв'ячної машини прямо пропорційна падінню тиску ΔP і обернено пропорційна в'язкості розплаву μ :

$$Q = K_{\text{гф}} * \frac{\Delta P}{\mu}$$

Також рівняння продуктивності можна представити таким чином:

$$Q = \frac{\alpha * K_{\text{гф}} * n}{K_{\text{гф}} + \beta + \gamma}$$

де К - коефіцієнт пропорційності,

α - постійна прямого потоку для черв'яка з перемінною глибиною гвинтового каналу:

$$\alpha = \frac{\pi^3 * (1 - \lambda * e) * \sigma}{a + t^2 * b}$$

β - постійна зворотного потоку для черв'яка з перемінною глибиною гвинтового каналу:

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

де b - коефіцієнт, розрахований за формулою:

$$b = \frac{2,3}{(h_1 - h_2) * D^3} * \lg\left(\frac{h_1 * (D + d)}{h_2 * (D + d)}\right) + \frac{2 * h_1 * h_2 + (h_1 - h_2) * D}{2 * D^2 * h_1^2 * h_2^2},$$

a - коефіцієнт, розрахований за формулою:

$$a = \frac{\pi^2}{h_1 * h_2} * \left(\frac{D * (h_1 + h_2)}{2 * h_1 * h_2} - 1\right);$$

γ - постійна протитоку для черв'яка з перемінною глибиною гвинтового каналу:

$$\gamma = \frac{\pi * D * \delta^3 * t^2}{10 * e * L_i * \sqrt{\pi^2 * D^2 + t^2}}$$

σ - коефіцієнт залежний від геометричних розмірів черв'яка:

$$\sigma = 1 - \frac{6,9 * D}{2 * (h_1 - h_2)} * \lg\left(\frac{h_1}{h_2}\right) + \frac{D^2}{2 * h_1 * h_2},$$

де h_1 - глибина гвинтового каналу в зоні завантаження, см

h_n - глибина гвинтового каналу на початку зони дозування, см

h_2 - глибина гвинтового каналу на кінці черв'яка, см

L_n - довжина зони дозування, см

D - зовнішній діаметр черв'яка, см

d_1 - діаметр сердечника в зоні дозування, см

d_2 - діаметр сердечника на кінці черв'яка, см

e - ширина гребеня витка черв'яка, см

δ - зазор між черв'яком і гільзою, см;

$$a = \frac{3.14^2}{0.53 * 0.35} * \left(\frac{4.5 * (0.53 + 0.35)}{2 * 0.53 * 0.35} - 1 \right) = 646 \frac{1}{\text{см}^2}.$$

$$b = \frac{2.3}{(0.53 - 0.35) * 4.5^3} * \lg \left(\frac{0.53 * (4.5 + 5.3)}{0.35 * (4.5 + 5.6)} \right) + \frac{2 * 0.53 * 0.35 + (0.53 + 0.35) * 4.5}{2 * 4.5^2 * 0.53^2 * 0.35^2} = 2.46 \frac{1}{\text{см}^2}.$$

$$\sigma = 1 - \frac{6.9 * 4.5}{2 * (0.53 - 0.35)} * \lg \left(\frac{0.53}{0.35} \right) + \frac{4.5^2}{2 * 0.53 * 0.35} = 96.3.$$

$$\alpha = \frac{3.14^3 * (4.5 - 2 * 0.5) * 96.3}{646 + 4.5^2 * 2.46} = 22.6 \text{ см}^2.$$

$$\beta = \frac{3.14 * 4.5 - (4.5 - 2 * 0.5)}{12 * 76 * (646 + 4.5^2 * 2.46)} = 0.15 * 10^{-3} \text{ см}^3.$$

$$\gamma = \frac{3.14 * 4.5 * 0.015^3 * 6.5^2}{10 * 0.5 * 76 * \sqrt{3.14^2 * 6.5^2 + 4.5^2}} = 0.357 * 10^{-6} \text{ см}^3.$$

$$Q = \frac{22,6 * 0,0197 * 150}{0,0197 + 0,15 * 10^{-3} + 0,357 * 10^{-6}} = 3364 \frac{\text{см}^3}{\text{хв}} = 56,07 \frac{\text{см}^3}{\text{год}}.$$

5.1.4 Розрахунок потужності приводу

Потужність, яка використовується черв'ячним пресом для переробки матеріалу, використовується для переміщення термопластичної маси в гвинтовому каналі черв'яка і на зріз матеріалу в зазорі між гребнем і стінкою циліндра або гільзи.

Потужність, яка використовується приводом машини:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + N_{\Gamma},$$

де N_1 – потужність, використана в зоні подачі. Значення цієї величини достатньо мале, тому можна знехтувати нею;

$N_2 = N_2' + N_2''$ - потужність, яка витрачається в зоні плавлення;

N_2' - потужність, яка використовується на виконання роботи по подоланню сили тертя та на розсіювання енергії в зазорі Δ між циліндром і поверхнею пробки;

N_2'' - потужність, яка використовується в зазорі Δ між циліндром і гребнем витка;

$$N_2' = \mu_{\text{еф}} * \Delta W_{\text{пр}}^2 * \frac{T - T * E}{2 * \Delta O * tg\varphi} * L_2,$$

де $\Delta W_{\text{пр}}$ – швидкість переміщення пробки твердої фази циліндра по відношенню до стінки циліндра:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{пр}} &= \left((\pi * D * N - W_{\text{пр}} * \cos\varphi)^2 + (W_{\text{пр}} * \sin\varphi)^2 \right)^{0,5} \\ &= ((3,14 * 0,045 * 2,66 - 0,21 * 0,953)^2 + (0,21 * 0,307)^2)^{0,5} \\ &= 0,247 \frac{\text{м}}{\text{с}} \end{aligned}$$

$$\text{де } W_{\text{пр}} = \frac{G}{\rho_H * B * H_{1\text{ср}}} = \frac{0,08}{800 * 0,0556 * 0,0085} = 0,21,$$

$\rho_H = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – насипна густина матеріалу,

B – ширина гвинтового каналу:

$$B = \frac{I - E}{I * \cos \varphi} = \frac{0,06 - 0,07}{0,06 * \cos (17^\circ 40')} = 0,0556 \text{ м},$$

де $\varphi = 17^\circ 40'$ - кут підйому витка

Величина ефективної в'язкості визначається за середньою температурою пристінного шару і середньому градієнту швидкості:

$$T_{\text{см}} = \frac{T_{\text{ц}} + T_{\text{пл}}}{2} = \frac{250 + 200}{2} = 225^\circ \text{C} = 498 \text{ K},$$

де $\gamma = \frac{\Delta W_{\text{пр}}}{\Delta O}$ – середній градієнт швидкості,

$\Delta O = \frac{2 * (I - E)}{\rho_H * W_{\text{пр}} * \sin \varphi} * \phi$ – товщина шару розплаву над пробкою матеріалу в міжвитковому просторі

Параметр ϕ визначається як:

$$\phi = \frac{\lambda * (T_{\text{ц}} - T_{\text{пл}})}{C_T * (T_{\text{пл}} - T_1) + r_{\text{пл}}} = \frac{0,17 * (250 - 200)}{1,29 * (200 - 20)} = 0,0366,$$

де $\lambda = 0,17 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}$ – теплопровідність розплаву поліетилену,

Величиною $r_{\text{пл}}$ нехтуємо.

Визначаємо величину ΔO :

$$\Delta O = \frac{2 * (I - E)}{\rho_H * W_{\text{пр}} * \sin \varphi} * \phi = \frac{2 * (0,06 - 0,007)}{800 * 0,21 * 0,303} * 0,0366 = 0,000076 \text{ м}$$

Середній градієнт швидкості:

$$\gamma = \frac{\Delta W_{\text{пр}}}{\Delta O} = \frac{0,247}{0,000076} = 3246 \text{ с}^{-1}$$

Приймаємо $\mu_{\text{еф}} = 100 \text{ Па} * \text{с}$.

Отже, потужність N'_2 дорівнює:

$$\begin{aligned} N'_2 &= \mu_{\text{еф}} * \Delta W_{\text{пр}}^2 * \frac{T - T * E}{2 * \Delta O * \tan \varphi} * L_2 \\ &= 100 * 0,247^2 * \frac{0,06 - 0,007}{2 * 0,000076 * 0,318} * 1,12 = 7481 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Потужність N_2'' дорівнює:

$$N_2'' = \mu_{\text{еф}} * I * E * L_2 * \frac{\pi^2 * D^2 * N^2}{\Delta * tg\varphi}$$

$$= 100 * 1 * 0,007 * 1,12 * \frac{3,14^2 * 0,045^2 * 2,66^2}{0,00015 * 0,318} = 4544 \text{ Вт}$$

Потужність N_3' дорівнює:

$$N_3' = \mu_{\text{еф}} * N^2 * \frac{\pi^3 * (T - I * E) * L_2 * \theta}{T}$$

Коефіцієнт θ – визначається за формулою:

$$\theta = \frac{\pi^2 * D^2 - 4T^2}{\pi^2} + \frac{(D + D_3)^3 + (D + D_H)^3}{3(D_3 - D_H)} + \frac{2,3 * \pi^2 * D^5}{(T^2 + \pi^2 * D^2) * (H_H - H_3)} =$$

$$\frac{3,14^2 * 0,045^2 - 4 * 0,045^2}{3,14^2} + \frac{(0,045 + 0,057)^3 - (0,045 + 0,046)^3}{3(0,057 - 0,046)} +$$

$$\frac{2,3 * 3,14^2 * 0,045^5}{(0,06^2 + 3,14^2 * 0,045^2) * (0,009 - 0,003)} = 0,111$$

Тоді потужність N_3' :

$$N_3' = 0,111 * 100 * 2 * 2,66^2 * \frac{3,14^2 * (0,06 - 1 * 0,007) * 1,12}{0,06} = 2406 \text{ Вт}$$

Потужність N_3'' дорівнює:

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

$$= 100 * 1 * 0,007 * 1,12 * \frac{3,14^2 * 0,45^2 * 2,66^2}{0,00015 * 0,319} = 4544 \text{ Вт}$$

Потужність, яка втрачається в каналі формувальної головки:

$$N_{\Gamma} = V * P_{\Gamma} = 97 * 10^{-6} * 75 * 10^6 = 6525 \text{ Вт} = 6,52 \text{ кВт},$$

Загальні втрати потужності в черв'ячній машині складають:

$$N_{\text{інд}} = N_2' + N_2'' + N_3' + N_3'' + N_{\Gamma} = 7,48 + 4,54 + 2,4 + 4,54 + 6,52 = 25,5 \text{ кВт}$$

Потужність електродвигуна приводу машини:

$$N_H = \frac{N}{\varepsilon} = \frac{25,5}{0,7} = 36,4 \text{ кВт},$$

де $\varepsilon = 0,4 \dots 0,8$ – коефіцієнт, який враховує втрати енергії в приводі

Встановлено двигун з потужністю $N = 37 \text{ кВт}$.

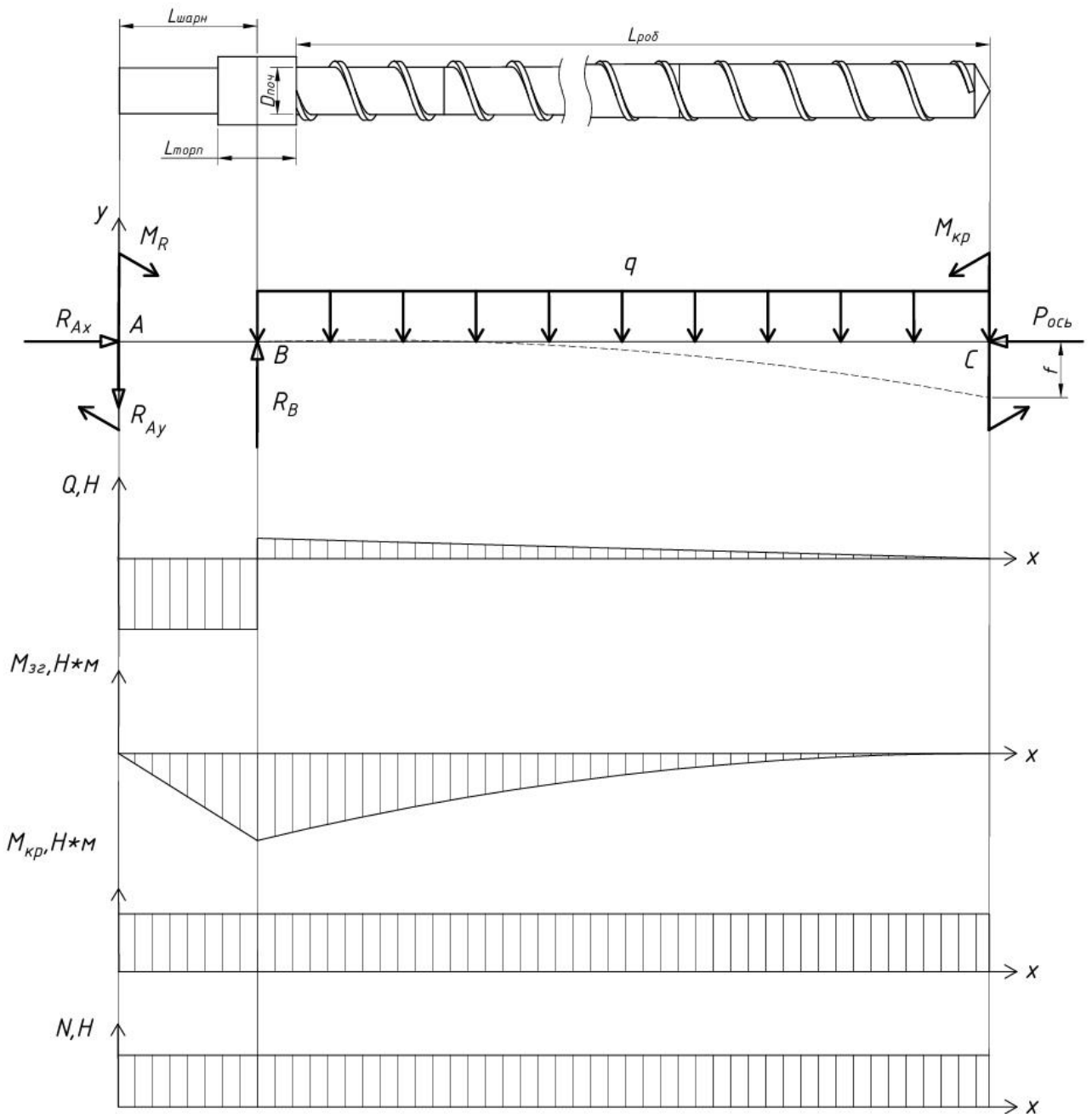


Рисунок 5.2 – Розподілення внутрішніх силових факторів по довжині черв'яка

Розраховуємо крутний момент:

$$M_{кр} = \frac{9550 * N}{n} = \frac{9550 * 80}{150} = 5090 \text{ Н * м},$$

де $N = 80$ – потужність, яка використовується черв'яком, кВт;

$n = 150$ – швидкість обертання черв'яка, $\frac{\text{об}}{\text{хв}}$;

Осьове зусилля:

$$P_{\text{ось}} = \frac{2 * M_{\text{кр}}}{10D_{\text{поч}}} = \frac{2 * 5090}{0,45} = 22,6 \text{ кН.}$$

де $D_{\text{поч}} = 0,045$ – зовнішній діаметр черв'яка, м;

Розподілене навантаження від власної ваги робочої частини шнека та половини торпеди для спрощення розрахунку приймається як навантаження постійної величини:

$$q = \frac{g * m_{\text{роб}}}{L_{\text{роб}} + \frac{L_{\text{торп}}}{2}} = \frac{9,81 * 14,1}{1,125 + 0,0225} = 122 \text{ Н/м.}$$

де $m_{\text{роб}}$ – маса черв'яка:

$$\begin{aligned} m_{\text{роб}} &= \frac{\pi * D_{\text{поч}}^2}{4} * \rho * (L_{\text{роб}} + \frac{L_{\text{торп}}}{2}) \\ &= \frac{3,14 * 0,045^2 * 7710 * (1,125 + \frac{0,045}{2})}{4} = 14,1 \text{ кг.} \end{aligned}$$

$L_{\text{роб}} = 1,125$ – довжина робочої частини, м;

$L_{\text{торп}} = 0,045$ - довжина торпеди, на якій знаходиться підшипник, м;

Визначення реакцій в'язей

Черв'як обмежують дві в'язі – вал редуктора, з яким з'єднаний черв'як та опорний підшипник у корпусі екструдера. Першу в'язь для спрощення можна представити як нерухомий шарнір А, а другу як рухомий шарнір В. Причому під час роботи електродвигуна, шарнір А обмежує обертання навколо поздовжньої осі шнека, тому в ньому виникає реактивний крутний момент M_R , який протидіє крутному моменту $M_{\text{кр}}$, завдяки чому в системі зберігається рівновага.

Звільнивши тіло (шnek) від в'язей та замінивши їх дію реакціями в'язей, можемо дослідити яке навантаження діє на шnek.

В точці А виникає реакція, яку можна розкласти на два компоненти – горизонтальну (R_{Ax}) та вертикальну (R_{Ay}) реакції.

З умови рівноваги сил, діючих по горизонталі $R_{Ax} = P_{\text{ось}}$;

R_{Ay} та R_B знайдемо з умов рівноваги вертикальних сил (вздовж осі ОУ) та умови рівноваги моментів відносно точки А.

$$\sum F_y = 0 = -R_{Ay} + R_B - q * \left(L_{\text{роб}} + \frac{L_{\text{торп}}}{2} \right); \quad (1)$$

$$\sum M_A = 0 = -R_B * L_{\text{шарн}} + q * \left(L_{\text{роб}} + \frac{L_{\text{торп}}}{2} \right) * \left(L_{\text{шарн}} + \frac{1}{2} \left[L_{\text{роб}} + \frac{L_{\text{торп}}}{2} \right] \right);$$

$$\text{З чого отримуємо } R_B = \frac{q * \left(L_{\text{роб}} + \frac{L_{\text{торп}}}{2} \right) * \left(L_{\text{шарн}} + \frac{1}{2} \left[L_{\text{роб}} + \frac{L_{\text{торп}}}{2} \right] \right)}{L_{\text{шарн}}};$$

$$\text{З (1) слідує, що } R_{Ay} = R_B + q * \left(L_{\text{роб}} + \frac{L_{\text{торп}}}{2} \right);$$

$$R_B = \frac{122 * \left(1,125 + \frac{0,045}{2} \right) * \left(0,07725 + \frac{1}{2} \left[1,125 + \frac{0,045}{2} \right] \right)}{0,07725} = 1180 \text{ Н};$$

$$R_{Ay} = 1180 - 122 * (1,125 + 0,0225) = 1040 \text{ Н};$$

Максимальний згинальний момент виникає в точці В та дорівнює:

$$M_{\text{зг}}^{\text{max}} = R_{Ay} * L_{\text{шарн}} = 1040 * 0,075 = 78 \text{ Н} * \text{м};$$

5.2.2 Розрахунок діючих нормальних напружень

У цьому розрахунковому випадку є два небезпечні перерізи, де можуть виникати найбільші нормальні напруження (рисунок 3.3), це переріз 1-1 в точці В, в якому діє найбільший згинальний момент, та переріз 2-2 на початку робочої зони шнека, де його діаметр без врахування навивки є найменшим, а саме $D_{\text{поч}} = 0,018 \text{ м}$;

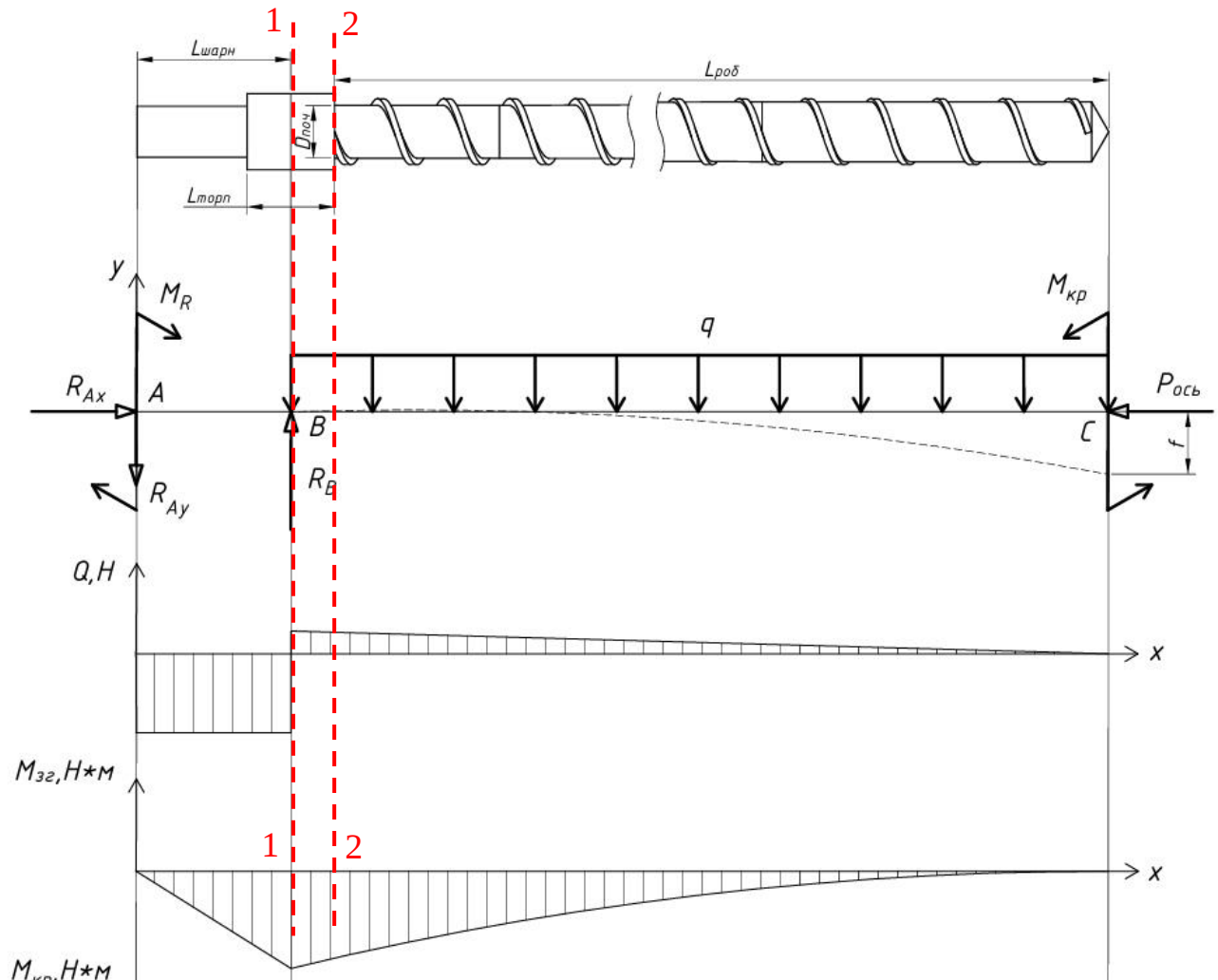


Рисунок 5.3 – Небезпечні перерізи шнека

Очевидно, що в перерізі 2-2 діючі нормальні напруження будуть більшими, ніж в перерізі 1-1, так як величина згинаючого моменту в цих перерізах не буде сильно відрізнятися, а от діаметр шнека відрізняється майже в 3 рази.

Так як на черв'як діє згинальний момент та осьове зусилля, які разом викликають комбіновані нормальні напруження, знайдемо їх значення за наступною формулою:

$$\sigma_{2-2} = \sigma_{max} = \frac{P_{ось}}{A_{поч}} + \frac{M_{зг}^{max}}{W_{поч}};$$

Площа поперечного перерізу на початку робочої зони:

$$A_{поч} = \frac{\pi D_{поч}^2}{4} = \frac{3,14 * 0,018^2}{4} = 2,5 * 10^{-4} \text{ м}^2;$$

Осьовий момент інерції перерізу 2-2 [17]:

$$I_{поч} = \frac{\pi * D_{поч}^4}{32} - \frac{\pi * d_{поч}^4}{32},$$

де $d_{поч} = \frac{D_{поч}}{2} = \frac{0,018}{2} = 0,009$ – внутрішній діаметр шнека на початку робочої зони, м;

$$I_{поч} = \frac{3,14 * 0,018^4}{32} - \frac{3,14 * 0,009^4}{32} = 9,66 * 10^{-9} \text{ м}^4;$$

Осьовий момент опору перерізу 2-2:

$$W_{поч} = \frac{I_{поч}}{y_{max}} = \frac{I_{поч}}{0,5 * D_{поч}} = \frac{9,66 * 10^{-9}}{0,009} = 1,07 * 10^{-6} \text{ м}^3,$$

де y_{max} – найбільша вертикальна відстань від нейтральної осі перерізу до краю перерізу, де нормальні напруження від згину найбільші;

Найбільші нормальні напруження від дії стискаючої сили та згинального моменту:

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= \frac{P_{ось}}{A_{поч}} + \frac{M_{зг}^{max}}{W_{поч}} = \frac{22600}{2,5 * 10^{-4}} + \frac{78}{1,07 * 10^{-6}} = 90400000 + 72897196 \\ &\approx 163300000 \text{ Па} = 163,3 \text{ МПа}; \end{aligned}$$

5.2.3 Розрахунок діючих дотичних напружень

Дотичні напруження в шнеку виникають від дію крутного моменту $M_{кр}$ та поперечних сил R_{Ay} , R_B та розподіленого навантаження q . Небезпечним перерізом (рисунк 3.4) в цьому випадку буде переріз 3-3 у частині шнеку, якою він поєднується з вихідним валом редуктора у місці зміни діаметра шнеку з $D_{оп}$ на $D_{торп}$.

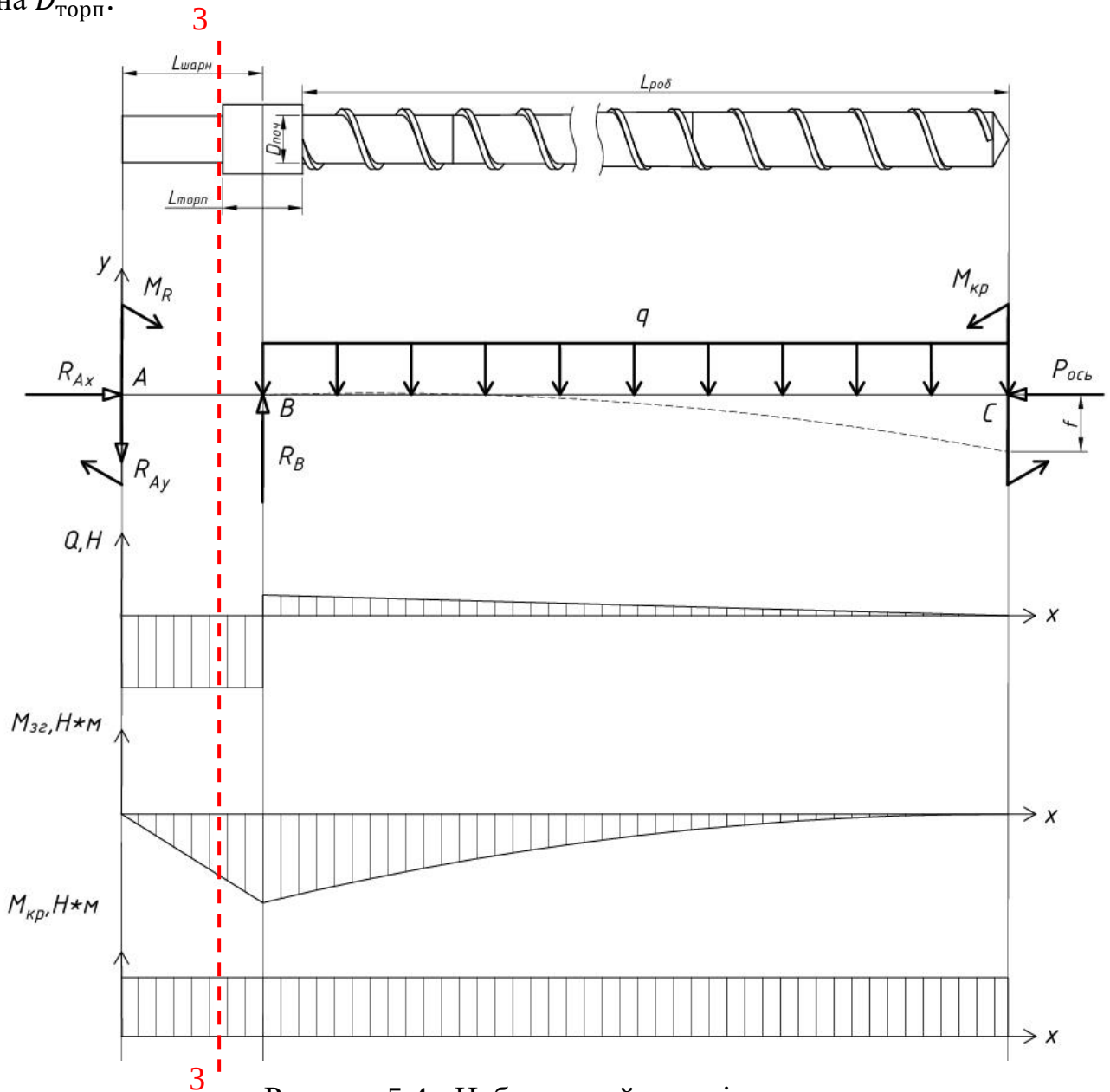


Рисунок 5.4 - Небезпечний переріз шнека

Дотичні напруження від дії крутного моменту розраховуються як:

$$\tau_{кр}^{max} = \frac{M_{кр}}{W_{\rho}^{3-3}},$$

де W_{ρ}^{3-3} – полярний момент опору поперечного перерізу в 3-3

$$W_{\rho}^{3-3} = \frac{I_{\rho}^{3-3}}{\rho_{max}},$$

де I_{ρ}^{3-3} – полярний момент інерції поперечного перерізу в 3-3;

$\rho_{max} = D_{on} = 0,055$ – відстань від центру перерізу до його краю, де дотичні напруження найбільші;

$$I_{\rho}^{3-3} = \frac{\pi D_{on}^4}{16} - \frac{\pi d_{on}^4}{16};$$

$$I_{\rho}^{3-3} = \frac{3,14 * 0,055^4}{16} - \frac{3,14 * 0,03^4}{16} = 1,64 * 10^{-6} \text{ м}^4;$$

$$W_{\rho}^{3-3} = \frac{1,64 * 10^{-6}}{0,055} = 2,98 * 10^{-5}$$

$$\tau_{кр}^{max} = \frac{5090}{2,98 * 10^{-5}} = 170805369 \text{ Па} \approx 170,8 \text{ МПа};$$

Дотичні напруження від дії поперечної сили розраховуються таким чином [17]:

$$\begin{aligned} \tau_Q^{max} &= \frac{2 * Q}{\pi * d_{оп}^{сер} * \left(\frac{D_{оп}}{2} - \frac{d_{оп}}{2} \right)} = \frac{2 * 1040}{3,14 * 0,0425 * (0,0275 - 0,015)} \\ &= 1246908 \text{ Па} \approx 1,25 \text{ МПа}; \end{aligned}$$

Сумарні найбільші дотичні напруження:

$$\tau_{max} = \tau_{кр}^{max} + \tau_Q^{max} = 170,8 + 1,25 = 172,05 \text{ МПа};$$

5.2.4 Аналіз результатів розрахунку на міцність

Обраний матеріал шнека – Сталь 38Х2МЮА, у якого межа плинності на розтяг $\sigma_{0.2} = 835$ МПа [18]. Допустимі нормальні напруження $[\sigma] = \sigma_{0.2} = 835$ МПа. Допустимі дотичні напруження приймаємо за $[\tau] = 0,5 * [\sigma] = 417$ МПа [17];

Визначення запасів міцності:

Для нормальних напружень:

$$n_{\sigma} = \frac{[\sigma]}{\sigma_{max}} = \frac{835}{163,3} = 5,11;$$

Для дотичних напружень:

$$n_{\tau} = \frac{[\tau]}{\tau_{max}} = \frac{417}{172,05} = 2,42;$$

Значення отриманого коефіцієнта запасу міцності має бути рівним або перевищувати допустиме $[n] = 1,6 \dots 2$ [3], тому умова міцності шнека виконується.

5.2.5 Розрахунок черв'яка на жорсткість

Ще однією важливою задачею є забезпечення виконання умови жорсткості шнека – максимальний прогин f_{max} не повинен перевищувати зазор між навивкою шнека та внутрішньою стінкою корпусу екструдера $\delta_{внутр}$.

Вихідні дані: матеріал: Сталь 38Х2МЮА, діаметр черв'яка 45 мм, зазор між корпусом і черв'яком $\delta_{внутр} = 0,15$ мм, $E = 2 \cdot 10^5$ – модуль Юнга; $I = 9,278 \cdot 10^{-7}$ м⁴ – полярний момент інерції перерізу черв'яка;

$$P_{ось} = 22,6 \text{ кН.}$$

Максимальний прогин:

$$f_{max} = \frac{1}{E * I} * \left(\frac{q}{k^2} * \left[\frac{1}{k^2} + \frac{L_{роб}}{2} \right] - \frac{1}{k} * \left(\frac{q}{k^2} + A * L_{роб} \right) * \cos(k * L_{роб}) - \frac{1}{k^2} * \left[\frac{q * L_{роб}}{k} - A \right] * \sin(k * L_{роб}) \right),$$

$$\text{де } k = \sqrt{\frac{P_{ось}}{E * I}} = \sqrt{\frac{22600}{2 \cdot 10^{11} * 9,278 \cdot 10^{-7}}} = 0,35;$$

$$\begin{aligned}
A &= \frac{q * \left(L_{\text{поб}} - \frac{1}{k} * \sin(k * L_{\text{поб}}) \right)}{k * \cos(k * L_{\text{поб}})} \\
&= \frac{1,22 * \left(1,125 - \frac{1}{0,35} * \sin(1,125 * 0,35) \right)}{0,35 * \cos(0,35 * 1,125)} = 0,11; \\
f_{\text{max}} &= \frac{1}{2 * 10^{11} * 9,278 * 10^{-7}} \\
&\quad * \left[\frac{1,22}{0,35^2} * \left(\frac{1}{0,35^2} + \frac{1,125}{2} \right) - \frac{1}{0,35} * \left(\frac{1,125}{0,35^2} + 0,11 * 1,125 \right) \right. \\
&\quad * \cos(0,35 * 1,125) - \frac{1}{0,35^2} * \left(\frac{1,22 * 1,125}{0,35} - 0,11 \right) \\
&\quad \left. * \sin(0,35 * 1,125) \right] = 0,009 \text{ мм};
\end{aligned}$$

Прогин в межах допустимого, тому що $f_{\text{max}} = 0,009 \text{ мм} < \delta_{\text{внутр}} = 0,15 \text{ мм}$.

5.2.6 Розрахунок черв'яка на стійкість

На шнек діє стискаюче зусилля $P_{\text{ось}}$, а його довжина більше ніж у 10 разів більша за його найбільший поперечний розмір, тому він підлягає розрахунку на втрату стійкості. Значенням параметру закріплення було обрано значення при жорсткому защемленні та рухомій шарнірній опорі ($\mu = 0,5$).

Критичне значення сили, перевищення якої призведе для загальної втрати стійкості знаходиться як:

$$F_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 E I_{\text{min}}}{\left(\mu * \left(L_{\text{поб}} + \frac{L_{\text{торп}}}{2} \right) \right)^2},$$

де $I_{\text{min}} = I_{\text{поч}} = 9,66 * 10^{-9} \text{ м}^4$ – мінімальний осьовий момент інерції стиснутого стрижня;

$$F_{\text{кр}} = \frac{3,14^2 * 2 * 10^{11} * 9,66 * 10^{-9}}{(0,5 * (1,125 + 0,225))^2} = 41,8 \text{ кН};$$

$$F_{\text{кр}} > P_{\text{ось}};$$

Значення критичної сили менше, ніж діюча осьова сила майже в 2 рази, тому умова загальної стійкості виконується.

5.3 Тепловий розрахунок черв'ячного преса

Тепловий розрахунок ЧП проводиться як розрахунок черв'яка і корпусу, який є трубою, яку періодично нагрівають та охолоджують [3, 16]. Розрахунок енергетичного балансу має на меті визначити кількість теплової енергії, яку необхідно відвести від розплаву полімеру для підтримання встановленого температурного режиму.

Вихідні дані

- Потужність встановленого електродвигуна - $N = 80$ кВт.
- Початкова температура матеріалу - $t_{\text{поч}} = 20$ °C.
- Кінцева температура матеріалу - $t_{\text{кін}} = 200$ °C.

5.3.1 Енергетичний баланс

Кількість тепла, що необхідно відвести з охолоджувальною водою, визначається рівняння енергетичного балансу: 7

$$N_{\text{охол}} = N_{\text{дв}} - (N_{\text{сум}} - N_{\text{втрат}}),$$

де $N_{\text{дв}}$ - встановлена потужність електродвигуна приводу;

$N_{\text{сум}}$ - потужність, що втрачається на нагрівання полімерної суміші;

$N_{\text{втрат}}$ - втрати потужності в навколишній простір та в приводі машини

$$N_{\text{сум}} = Q_{\text{сум}} * 1.16 * 10^{-3},$$

де $Q_{\text{сум}}$ - кількість теплоти, що необхідна для нагріву перероблюваної полімерної суміші від $t_{\text{поч}}$ до $t_{\text{кін}}$,

$$Q_{\text{сум}} = G * C_{\text{сум}} * (t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}})$$

$$\text{або } N_{\text{сум}} = G * C_{\text{сум}} * (t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}}) * 1.16 * 10^{-3}$$

$$N_{\text{сум}} = 160 \frac{\text{кг}}{3600 \text{ с}} * 1,5 * 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * ^\circ\text{C}} * (200^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) * 1,16 * 10^{-3} = 13,9 \text{ кВт}$$

Для визначення втрат енергії загальний ККД черв'ячної машини $\eta = 0.7 \dots 0.9$ коефіцієнт, що враховує втрати енергії в приводі ЧМ.

Втрати потужності

$$N_{\text{пот}} = N_{\text{дв}} * (1 - \eta) = 37 * (1 - 0,88) = 37 * 0,12 = 4,4 \text{ кВт}$$

$$N_{\text{охол}} = 37 - (13,9 + 4,4) = 18,7 \text{ кВт}$$

Переведемо в теплову енергію

$$Q_{\text{охол}} = N_{\text{охол}} * 860 = 18,7 * 860 = 16082 \frac{\text{ккал}}{\text{год}}.$$

Отримане значення теплової енергії необхідно відводити від розплаву полімеру для підтримання встановленого температурного режиму.

5.3.2 Основний тепловий розрахунок

Теплові властивості поліетилену:

$$\text{Питома теплоємність: } C = 0,36 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} * \text{K}} = 1,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{°C}};$$

$$\text{Коефіцієнт теплопровідності: } \lambda = 0,105 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{K}};$$

$$\text{Вхідна температура полімеру: } t_{\text{поч}} = 20 \text{ °C};$$

$$\text{Температура охолоджувального повітря: } t_{\text{пов}} = 25 \text{ °C};$$

Охолодження корпусу екструдера виконується сухим повітрям за допомогою вентиляторів.

Кількість тепла, що передається від розплаву до охолоджувального повітря через розділювальні поверхні:

$$N_{\text{охол}} = K * A * \Delta t_{\text{сер}},$$

$$\text{де } K - \text{коефіцієнт теплопередачі, } \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{°C}};$$

$$A - \text{площа поверхні теплообміну, м}^2;$$

$\Delta t_{\text{сер}}$ – середньологарифмічний температурний напір між розплавом та повітрям.

Коефіцієнт теплопередачі визначимо за формулою

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{°C}},$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від полімерної суміші до стінки . Значення цього коефіцієнта можна орієнтовно прийняти

$$\alpha_1 = 2000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{°C}} [3];$$

$\delta_{\text{ст}} = 0,018$ м – товщина тепловіддаючої стінки;

$\lambda_{\text{ст}} = 60 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ - коефіцієнт теплопровідності стінки [3];

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до повітря

$$\alpha_2 = \frac{Nu * \lambda_n}{d_{\text{екв}}},$$

де $\lambda_n = 2,689 * 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ - коефіцієнт теплопровідності повітря при 40°C [3];

$d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр охолоджувального каналу, м

$$d_{\text{екв}} = \frac{4 * A_{\text{ппк}}}{\pi},$$

де $A_{\text{ппк}} = \frac{\pi * (d_2^2 - d_1^2)}{4} = \frac{3,14 * (0,15^2 - 0,1^2)}{4} = 0,0098 \text{ м}^2$ – площа перерізу охолоджувального каналу;

Змочуваний периметр охолоджувального каналу в поперечному перерізі:

$$\Pi_{\text{змож}} = \pi * d_2 + \pi * d_1 = 3,14 * 0,15 + 3,14 * 0,1 = 0,785 \text{ м}$$

$$d_{\text{екв}} = \frac{4 * 0,0098}{0,785} = 0,05 \text{ м}$$

Для вибору критеріального рівняння, що визначатиме Nu (критерій Нусельта), знайдемо режим руху охолоджувального повітря.

При вимушеній течії

$$Re = \frac{V_{\text{сер}} * d_{\text{екв}} * \rho}{\mu} = \frac{V_{\text{сер}} * d_{\text{екв}}}{\nu},$$

де $V_{\text{сер}}$ – середня швидкість руху повітря в охолоджувальних каналах.

Попередньо приймаємо витрати повітря на одну секцію машини ЧП 45*25 орієнтовно $1,5 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$. Тоді швидкість повітря охолодження складатиме:

$$V_{\text{сер}} = \frac{G_{\text{в}}}{3600 * A_{\text{ппк}}} = \frac{1,5}{3600 * 0,0098} = 11,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$\nu = 16,42 * 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря при 40°C [3].

$$Re = \frac{11,3 * 0,05}{16,42 * 10^{-6}} = 34451.$$

$Re_{кр} = 10000$ – критичне значення числа Рейнольдса, при якому починається турбулентний рух

$Re > Re_{кр}$, тому маємо турбулентний режим руху повітря, при якому для визначення Nu використовується наступне рівняння [3]:

$$Nu = 0,76 * Re^{0,5} * Pr_{пов}^{0,43} * \left(\frac{Pr_{пов}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25},$$

де $Pr_{ст}$ та $Pr_{пов}$ – критерії Прандтля для рідини при температурі стінки та температурі охолоджувального повітря [3].

$$Pr_{пов} = 0,70013 \text{ при температурі } 40 \text{ } ^\circ C.$$

Для визначення $Pr_{ст}$ приймаємо:

$$t_{ст} = t_{сер} + 15 \text{ } ^\circ C = 40 + 15 = 55 \text{ } ^\circ C;$$

При температурі стінки $55 \text{ } ^\circ C$, критерій Прандтля дорівнює $Pr_{ст} = 0,7$.

$$Nu = 0,76 * 34451^{0,5} * 0,7^{0,43} * \left(\frac{0,7}{0,7} \right)^{0,25} = 121;$$

$$\text{Тоді, } \alpha_2 = \frac{121 * 2,689 * 10^{-2}}{0,05} = 65 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * ^\circ C};$$

Визначаємо коефіцієнт теплопередачі

$$K = \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{0,018}{60} + \frac{1}{65}} = 68 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * ^\circ C};$$

Середньологарифмічний температурний напір визначається як [3]:

$$\Delta t_{сер} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{2,3 * Lg \left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} \right)};$$

$$\Delta t_6 = 200 - 40 = 160 \text{ } ^\circ C;$$

$$\Delta t_m = 60 - 36 = 24 \text{ } ^\circ C;$$

$$\Delta t_{сер} = \frac{160 - 24}{2,3 * Lg \left(\frac{160}{24} \right)} = 71,8 \text{ } ^\circ C;$$

Поверхня корпусу, яка підлягає охолодженню:

$$A_k = \pi * D_k * L_k \text{ м}^2,$$

де $D_k = 0,16 \text{ м}$ – зовнішній діаметр корпусу;

$L = 1,235$ м – довжина корпусу;

$$A_k = 3,14 * 0,16 * 1,235 = 0,62 \text{ м}^2;$$

Кількість тепла, що відводиться з охолоджуючим повітрям

$$N_{\text{охол}}^1 = 80 * 5,69 * 10^{-3} * 71,8 = 32,7 \text{ кВт}$$

$$N_{\text{охол}} > N_{\text{охол}}^1$$

$$41 \text{ кВт} > 3700 \text{ Вт}$$

Перерахунок температури $t_{\text{ст}}$ стінки, що передає тепло

$$N_{\text{охол}}^1 = \alpha_2 * A_k * \Delta t,$$

$$\text{звідки } \Delta t = \frac{N_{\text{охол}}^1}{\alpha_2 * A_k} = \frac{3700}{100 * 0,62} = 60 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ст}} = \Delta t + t_{\text{пов}} = 60 + 40 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Отримана температури стінки в $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ є задовільною. Сумарну продуктивність вентиляторів приймаємо $1,5 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$.

5.4 Розрахунки на міцність та жорсткість в ПЗ ANSYS

Числовий розрахунок моделі базового та модернізованого вузла проводився в середовищі Ansys Mechanical в ПЗ “ANSYS” [19].

Обчислення проводяться в системах “Steady-State Thermal” та “Static Structural”, зображених на рис. 5.5, на розподіл температури по моделі та її напружено-деформований стан.

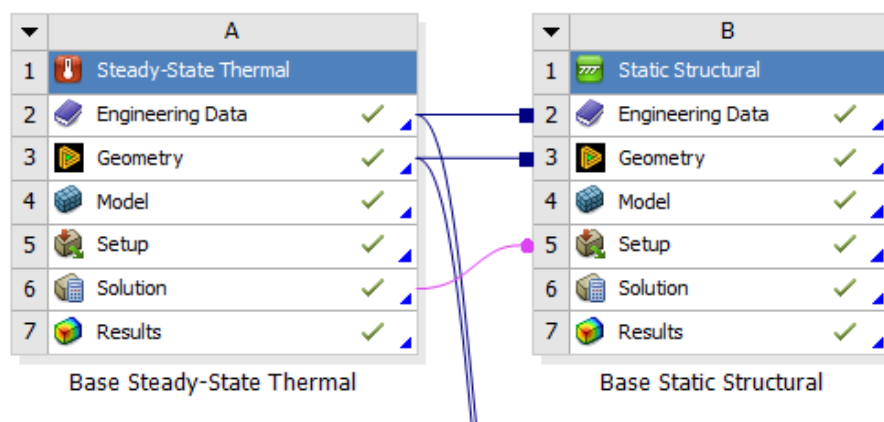


Рисунок 5.5 – Схема проекту розрахунку

5.4.1 Вихідні дані

Модель, яка буде досліджуватися, була виконана в ПЗ “SOLIDWORKS” та експортована до модуля редагування геометрії Ansys “DesignModeler” у форматі ‘.x_t’ (Parasolid).

Матеріалом головки, який буде використовуватися в розрахунку було обрано конструкційну жароміцну сталь 38Х2МЮА з такими характеристиками (табл. 1.1) [18], а матеріалом вставок в модернізованому вузлі – мідний сплав С10100 (табл. 1.2) [15].

Таблиця 5.1 – Характеристики матеріалу 38Х2МЮА

Позначення	Значення	Пояснення
E_c , ГПа	2.02	Модуль Юнга
μ_c	0.3	Коеф. Пуассона
$\lambda_c, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	33	Коеф. ізотропічної теплопровідності
σ_{yc} , МПа	835	Границя текучості
σ_{uc} , МПа	980	Границя міцності

Таблиця 5.2 – Характеристики матеріалу С10100

Позначення	Значення	Пояснення
E_m , ГПа	1.1	Модуль Юнга
μ_m	0.34	Коеф. Пуассона
$\lambda_m, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	401	Коеф. ізотропічної теплопровідності
σ_{ym} , МПа	280	Границя текучості
σ_{um} , МПа	430	Границя міцності

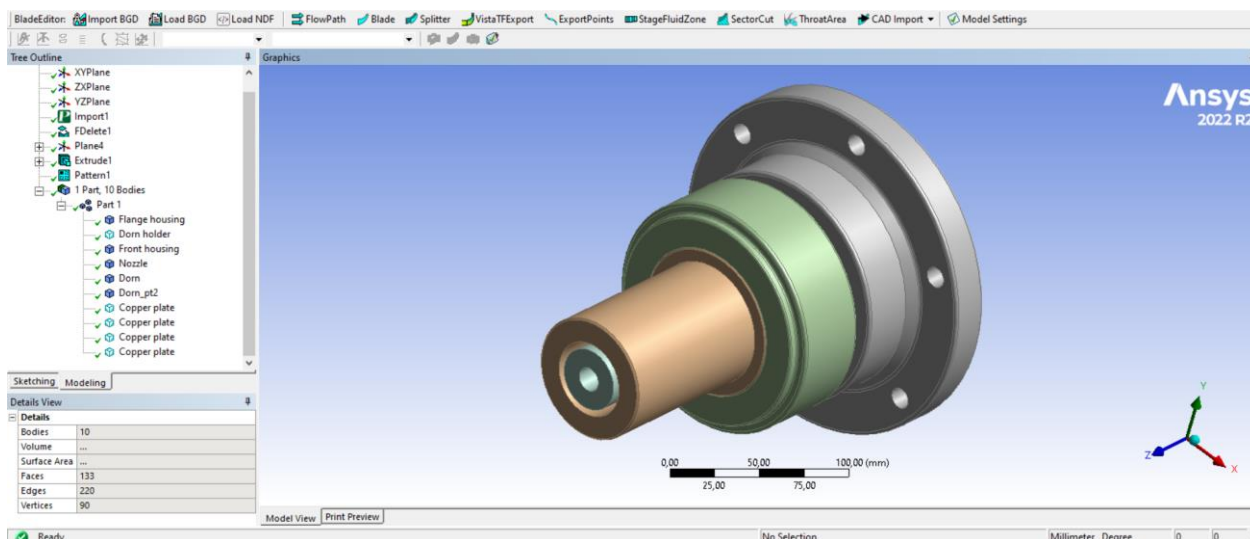


Рисунок 5.6 – 3D Модель вузла для розрахунку

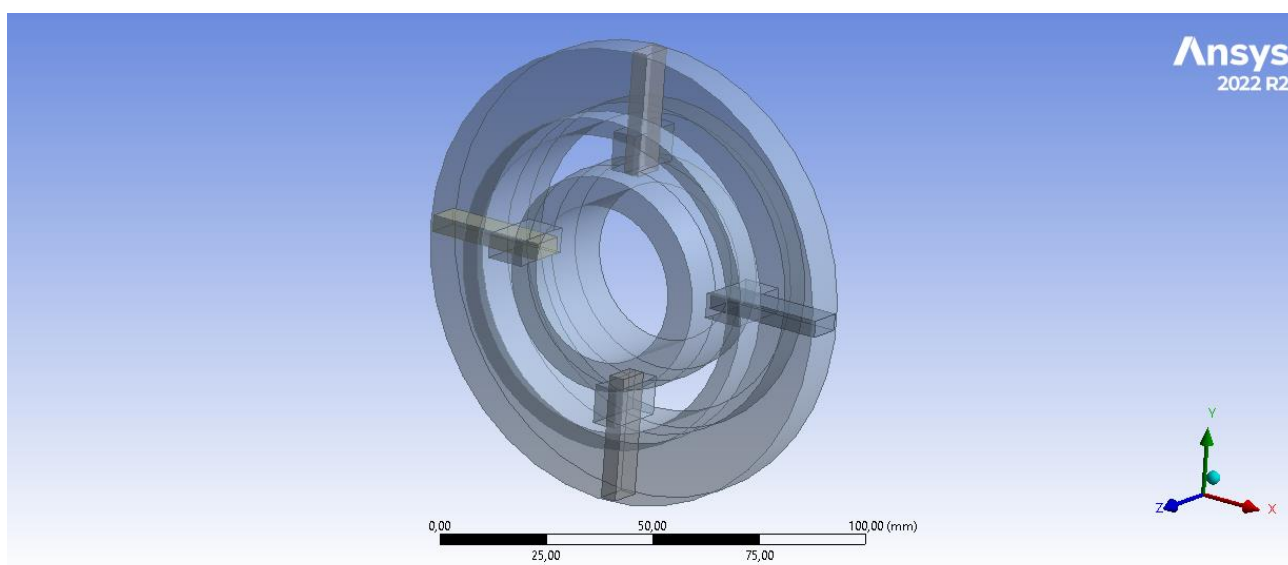


Рисунок 5.7 – 3D Модель модернізованого дорнотримача

5.4.2 Температурні навантаження

Метою температурного розрахунку є отримання розподілу температури в деталі для його подальшого використання в розрахунку напружено-деформованого стану вузла.

Температура на всіх внутрішніх поверхнях головки була прийнята за 180 °C [20] (рис. 5.8), а на зовнішніх поверхнях нагріву та у вставках – 182 °C [20] (рис. 5.9, рис. 5.10). Задана за допомогою інструмента “Temperature”.

Також, для більшої наочності та розуміння того, що відбувається всередині моделі, її було розрізано навпіл за допомогою “Section Plane”.

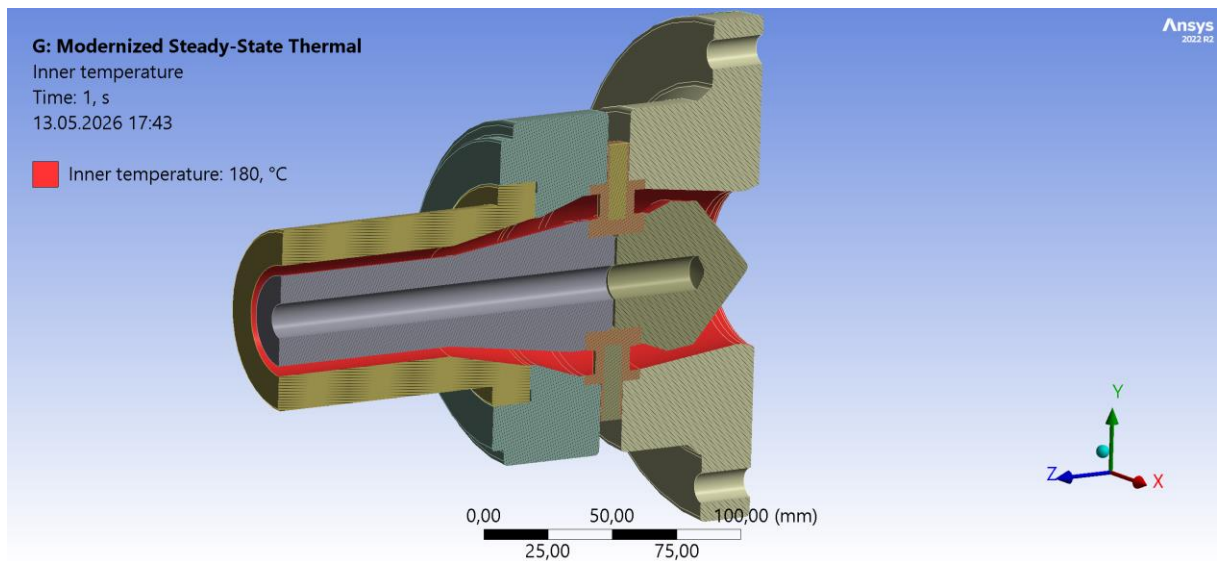


Рисунок 5.8 – Температура на внутрішніх поверхнях вузла

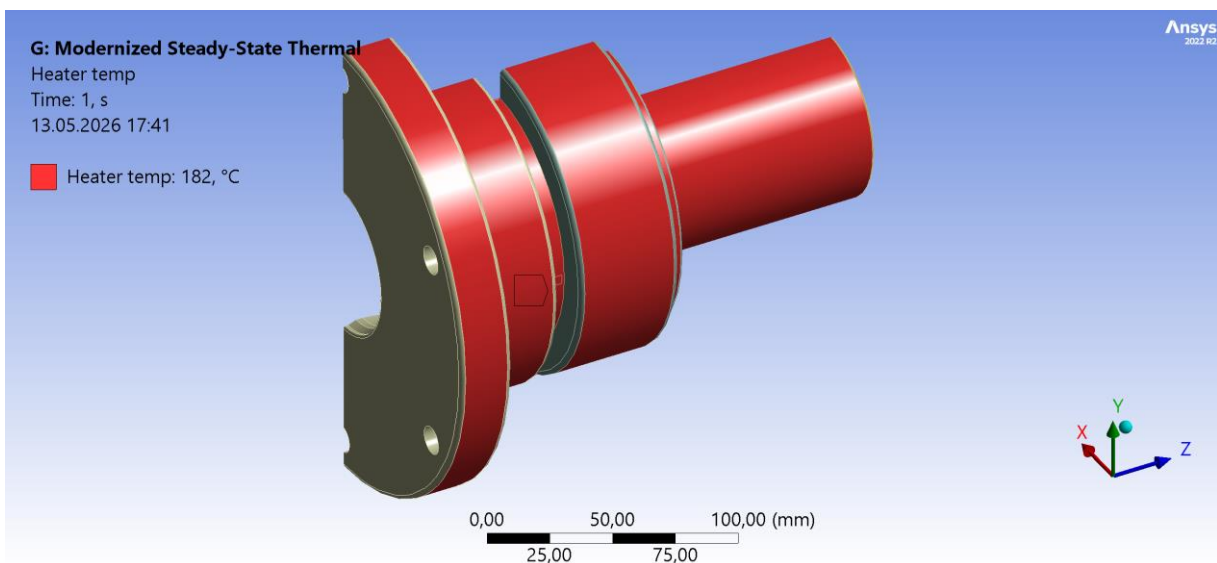


Рисунок 5.9 – Температура на зовнішніх поверхнях вузла

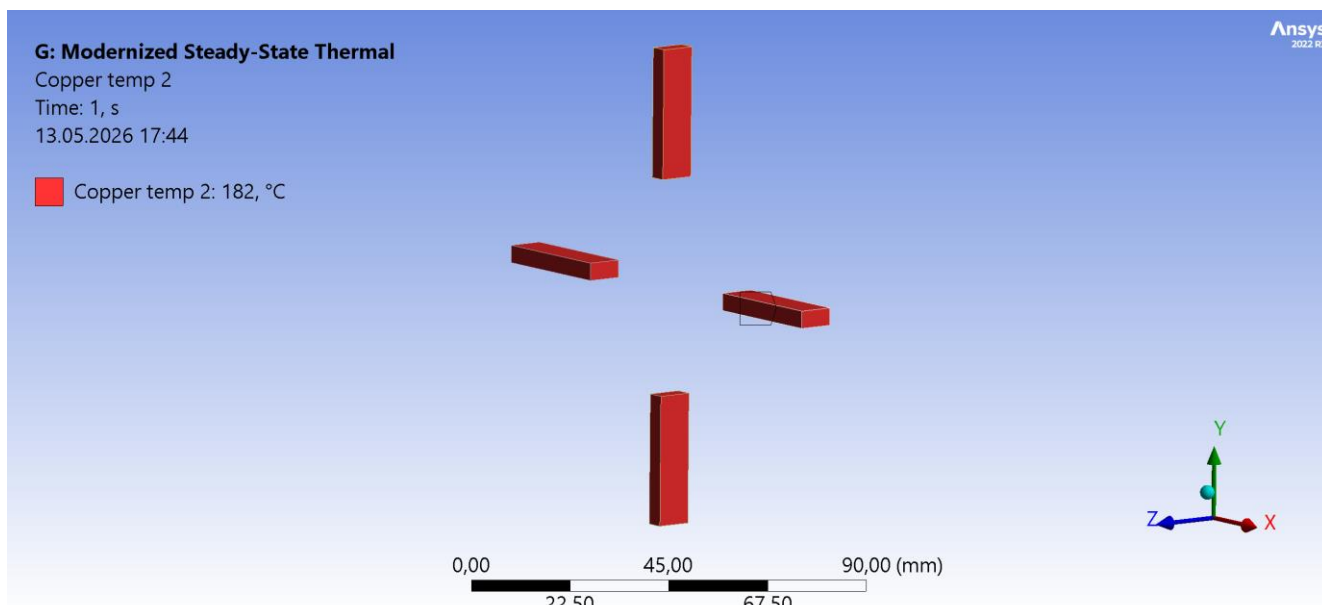


Рисунок 5.10 – Температура у вставках

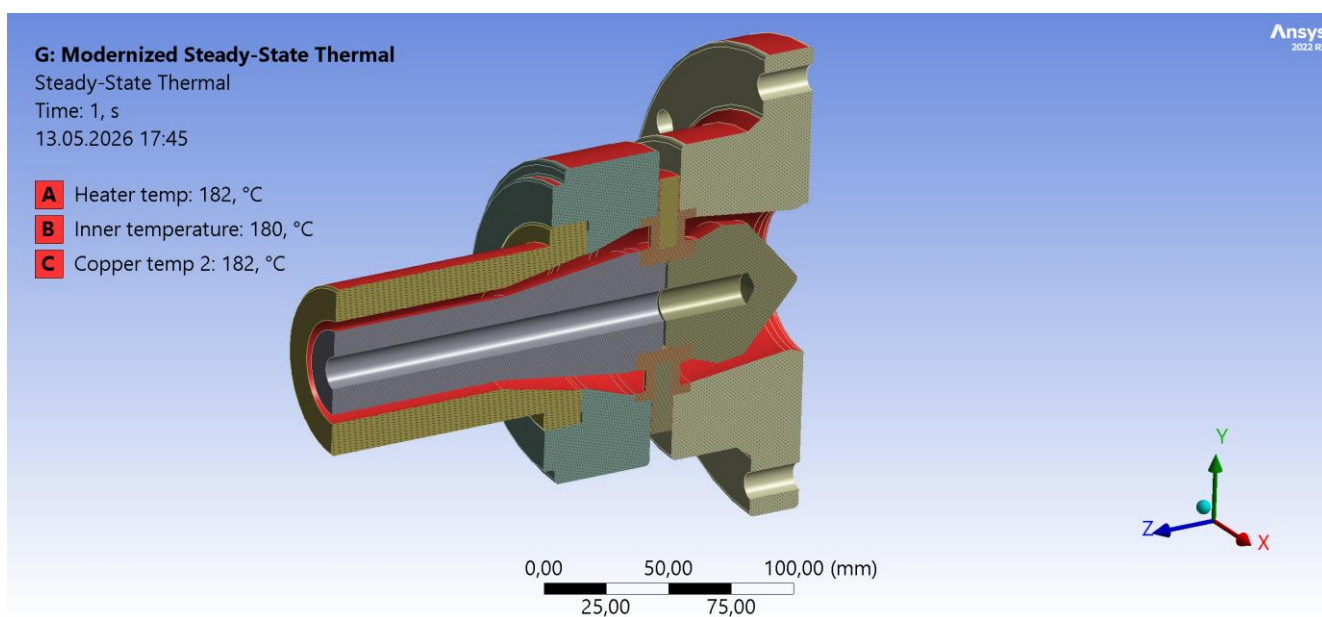


Рисунок 5.11 – Вся задана температура

Для подальшого вивчення напружено-деформованого стану вузла під дією температури та внутрішнього тиску, було обрано розрахунок “Temperature” в розділі “Thermal” (рис. 5.12).

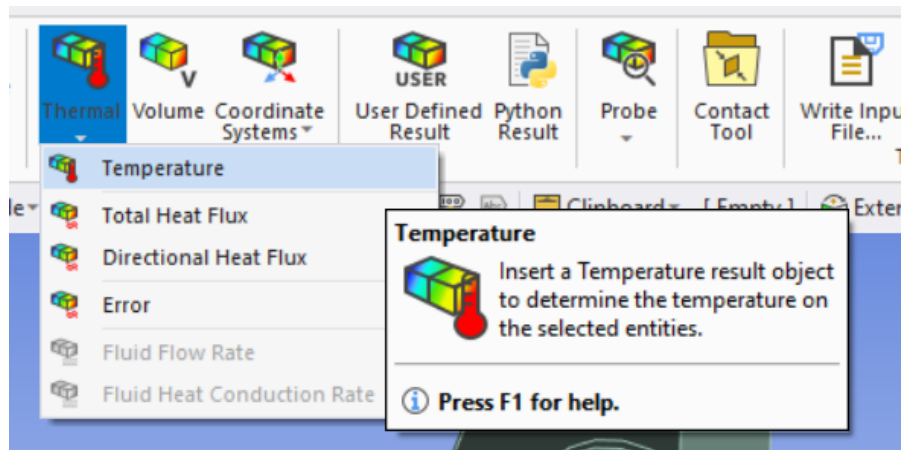


Рисунок 5.12 – Обраний результат розрахунку

Наступним кроком було створення сітки зі скінченних елементів (рис. 5.13). Сітка для базової та модернізованої моделі має однакові параметри, а саме: квадратичний порядок елементів та розмір елементів 5 мм (рис. 5.14).

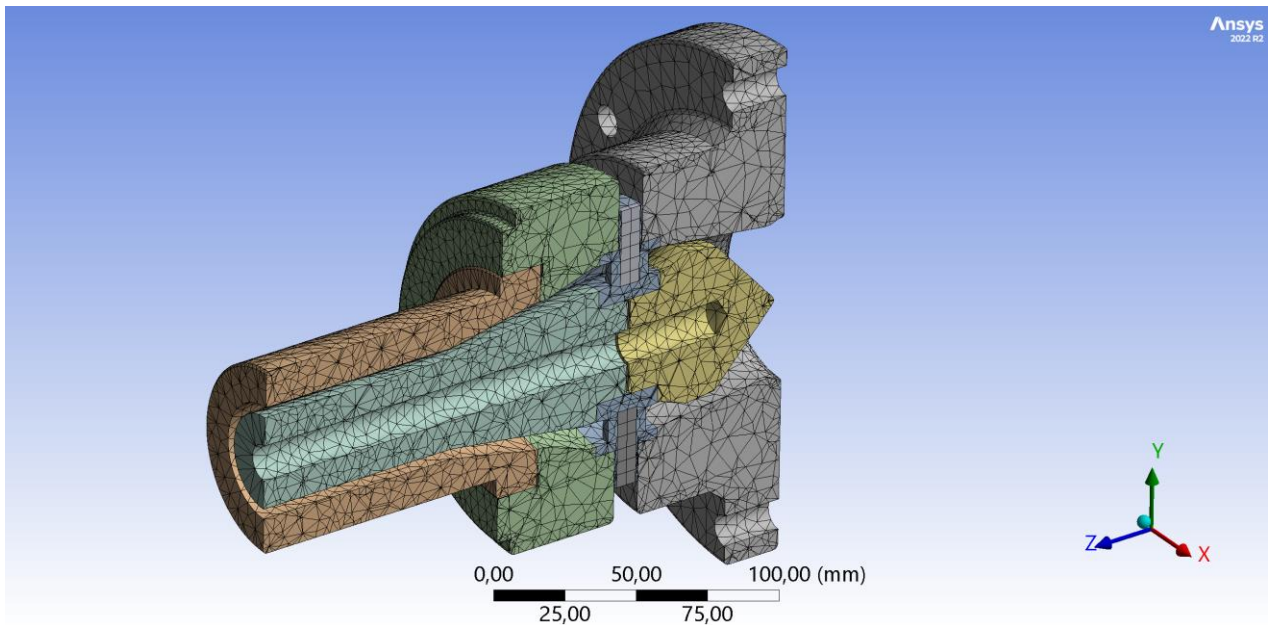


Рисунок 5.13 – Сітка скінченних елементів

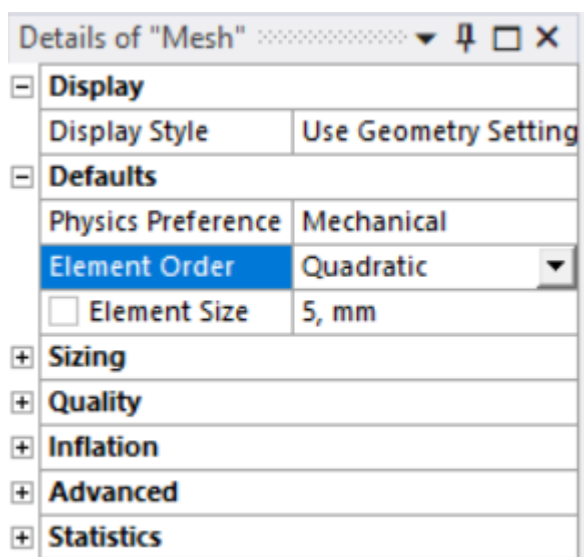


Рисунок 5.14 – Параметри сітки

Далі я призначив матеріали для моделі і виконав розрахунок. Результат розрахунку розподілу температур наведено нижче, з результатами розрахунку в системі “Static Structural”.

5.4.3 Механічні навантаження та граничні умови

Після експорту результатів розрахунку температурного розподілу до системи “Static Structural” я додав закріплення та навантаження до розрахункової моделі (рис. 5.15). Вузол навантажений та закріплений наступним чином:

Навантаження А – внутрішній тиск 50 МПа[20];

Закріплення В – закріплення переміщення, яке обмежує переміщення вздовж осі Z, імітуючи контакт з корпусом екструдера.

Закріплення С – циліндричне закріплення на поверхнях отворів, яке обмежує переміщення в радіальному та осьовому напрямку, імітуючи болтове закріплення;

Навантаження D – власна вага вузла, діє в напрямку протилежному осі Y;

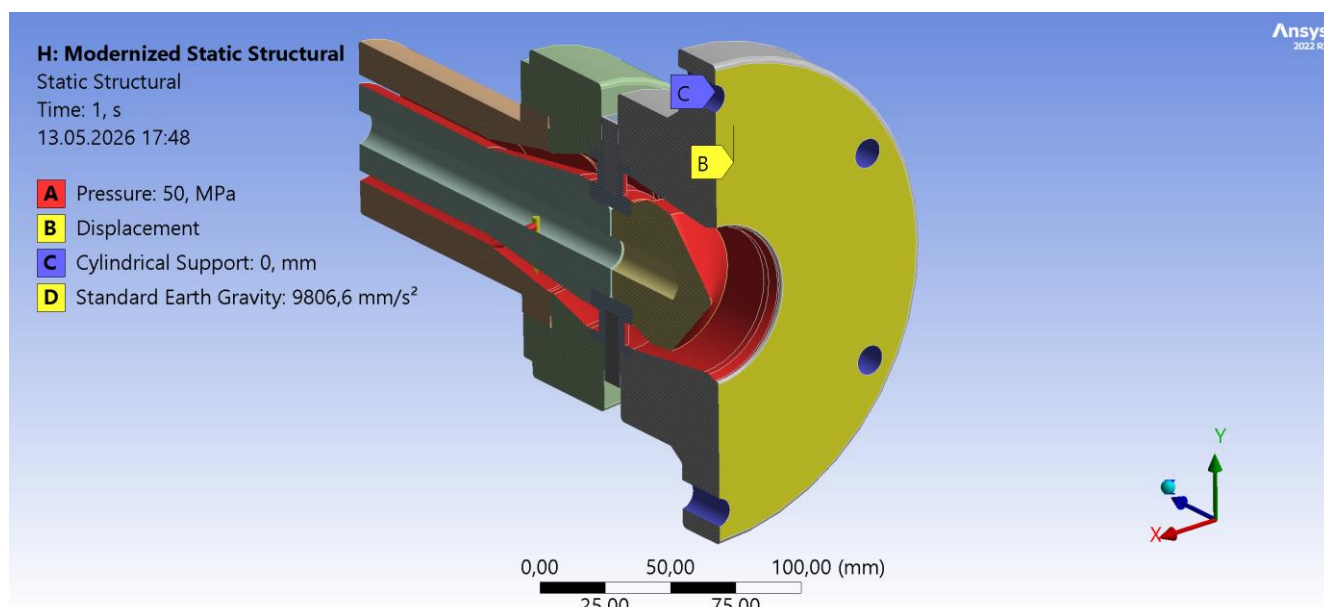


Рисунок 5.15 – Навантаження та закріплення

5.4.4 Результати розрахунків базового вузла

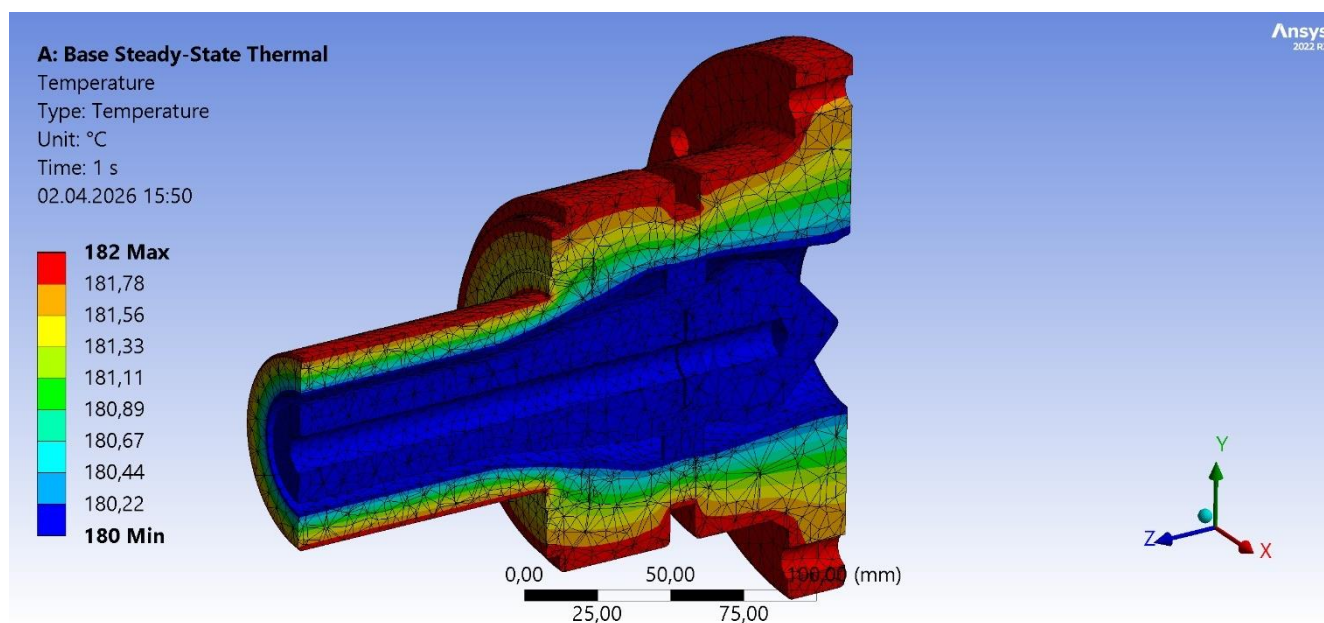


Рисунок 5.16 – Розподіл температури по моделі вузлу, °C

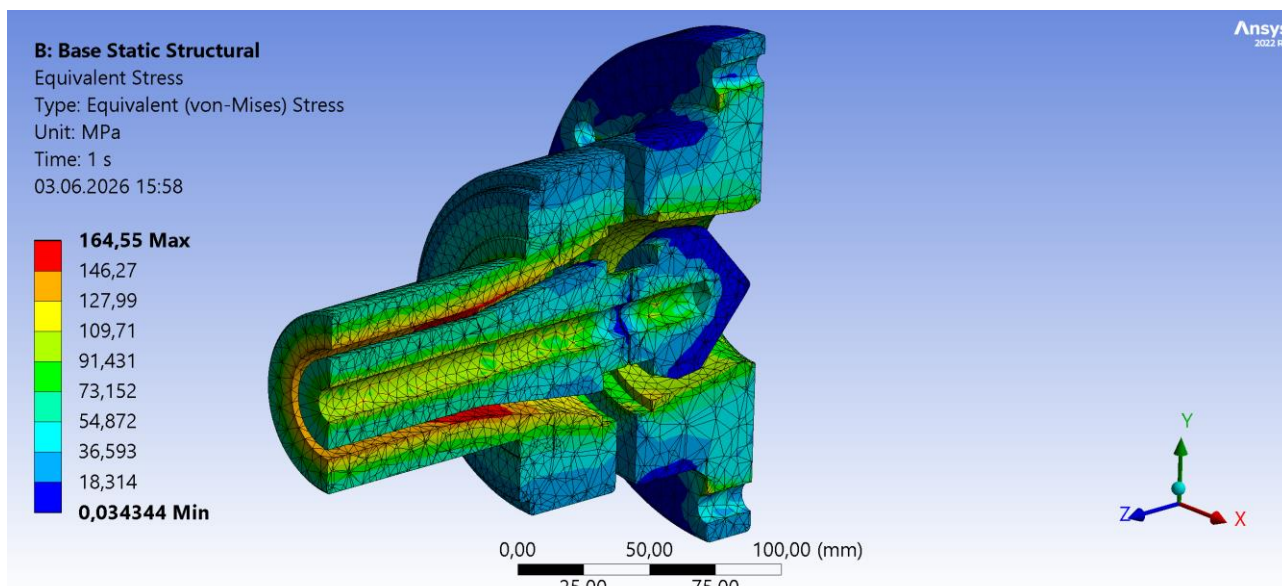


Рисунок 5.17 – Розподіл еквівалентних напружень у вузлі (за Мізесом), МПа

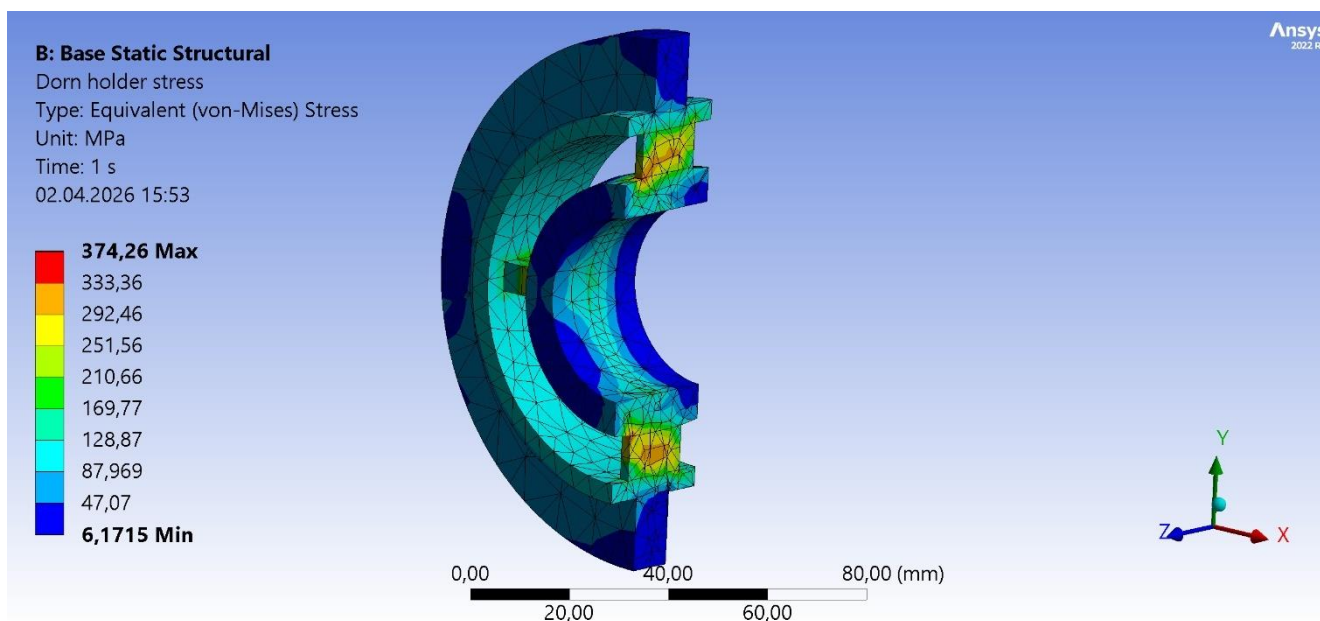


Рисунок 5.18 – Розподіл еквівалентних напружень у дорнотримачі (за Мізесом), загальний вигляд, МПа

Максимальні еквівалентні напруження у вузлі склали $\sigma_{\text{вузла}} = 374,26$ МПа, які діють у дорнотримачі. Найбільшим концентратором напружень у вузлі є стик між стрижнем та зовнішньою поверхнею внутрішнього кільця тримача (рис. 5.19).

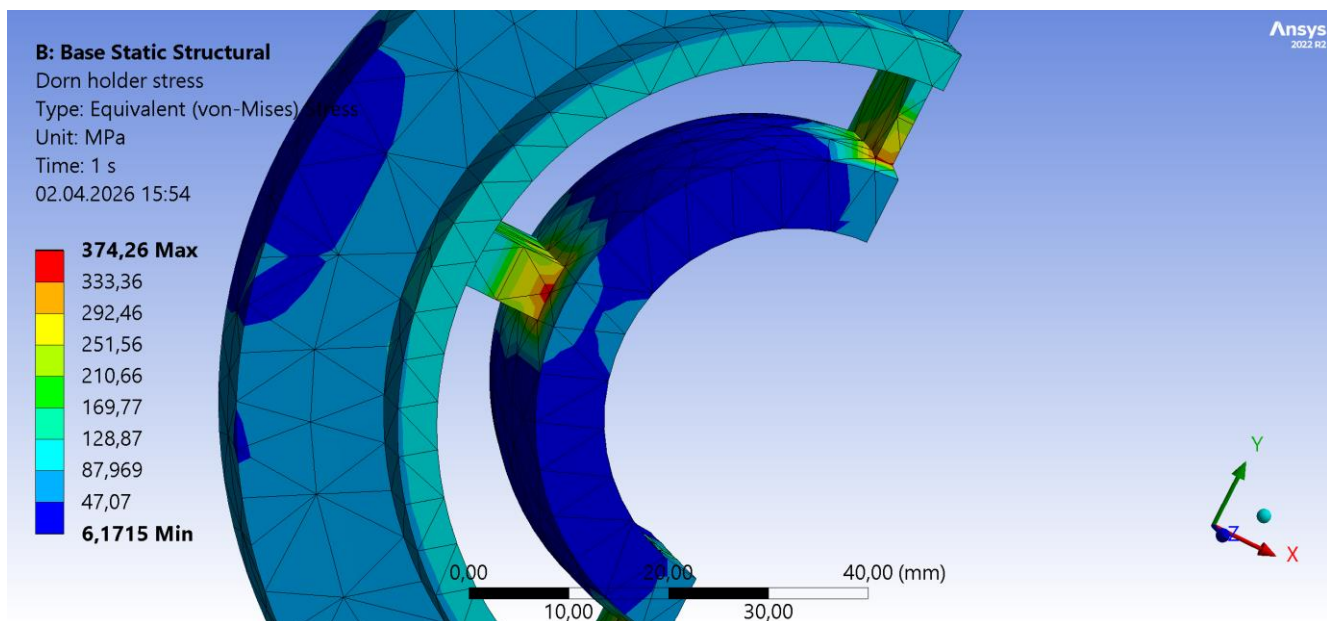


Рисунок 5.19 – Розподіл еквівалентних напружень у дорнотримачі (за Мізесом), детальний вигляд, МПа

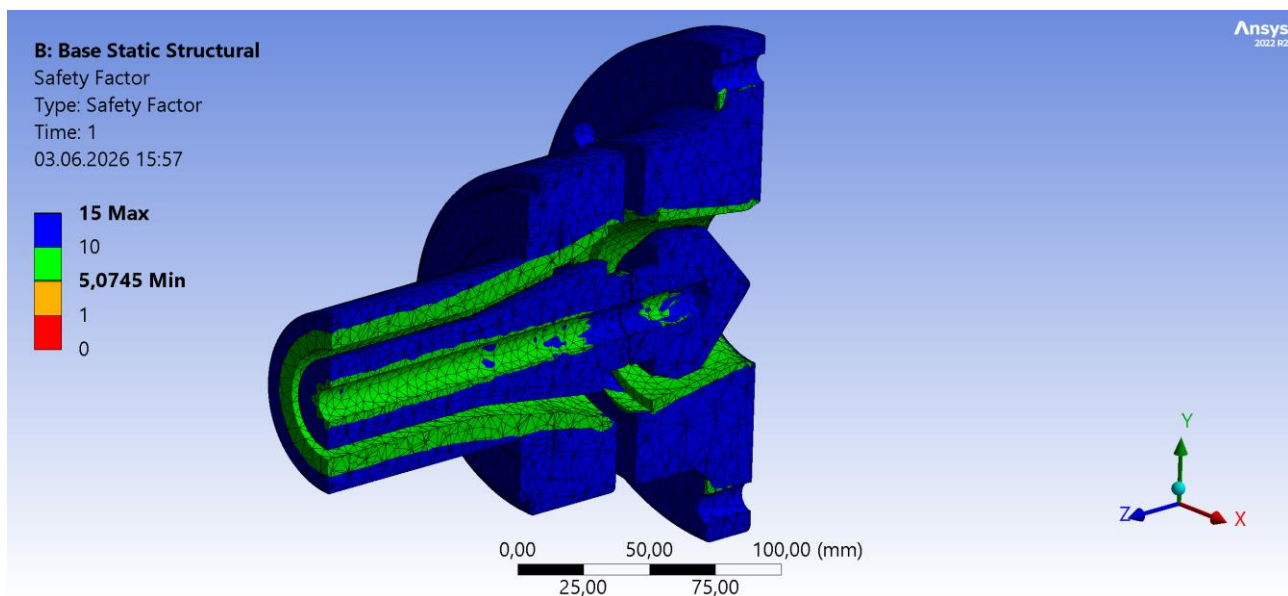


Рисунок 5.20 – Коефіцієнт запасу міцності у вузлі

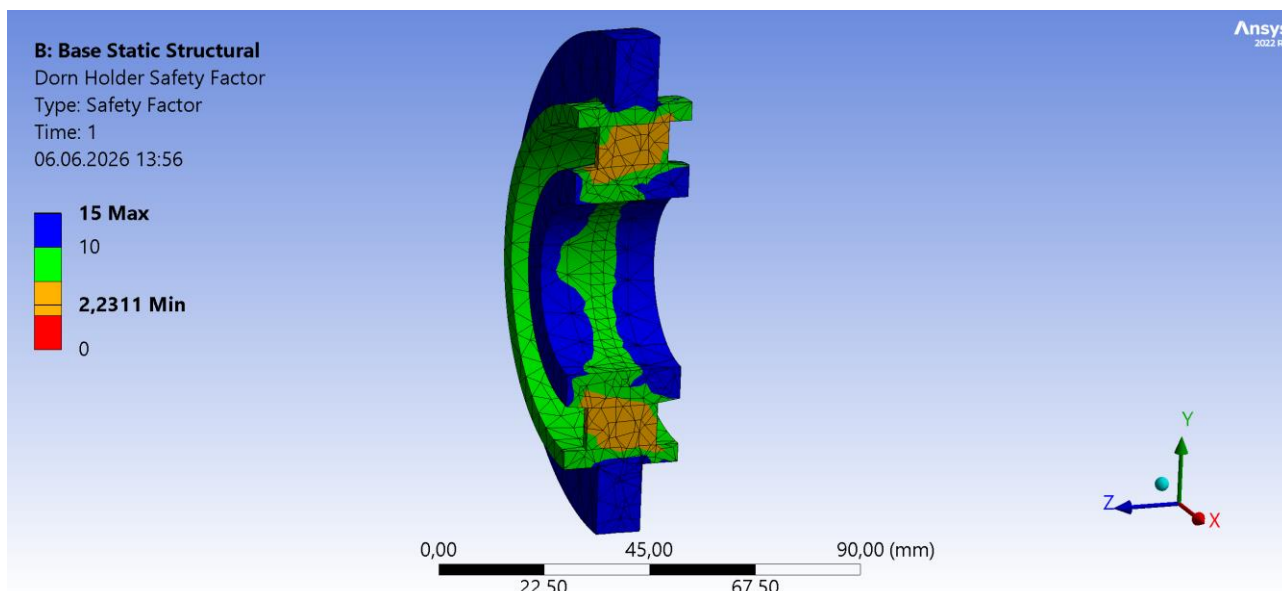


Рисунок 5.21 – Коефіцієнт запасу міцності у дорнотримачі

Коефіцієнт запасу міцності вузла склав

$$n_{\text{вузла}} = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\text{вузла}}} = \frac{835}{164,55} = 5,07,$$

де $[\sigma]$ – допустимі напруження, прийняті за границю текучості матеріалу

Як в дорнотримачі, так і в самому вузлі, діючі напруження більш ніж в 2 рази менші за допустимі, а значить конструкція є працездатною та надійною.

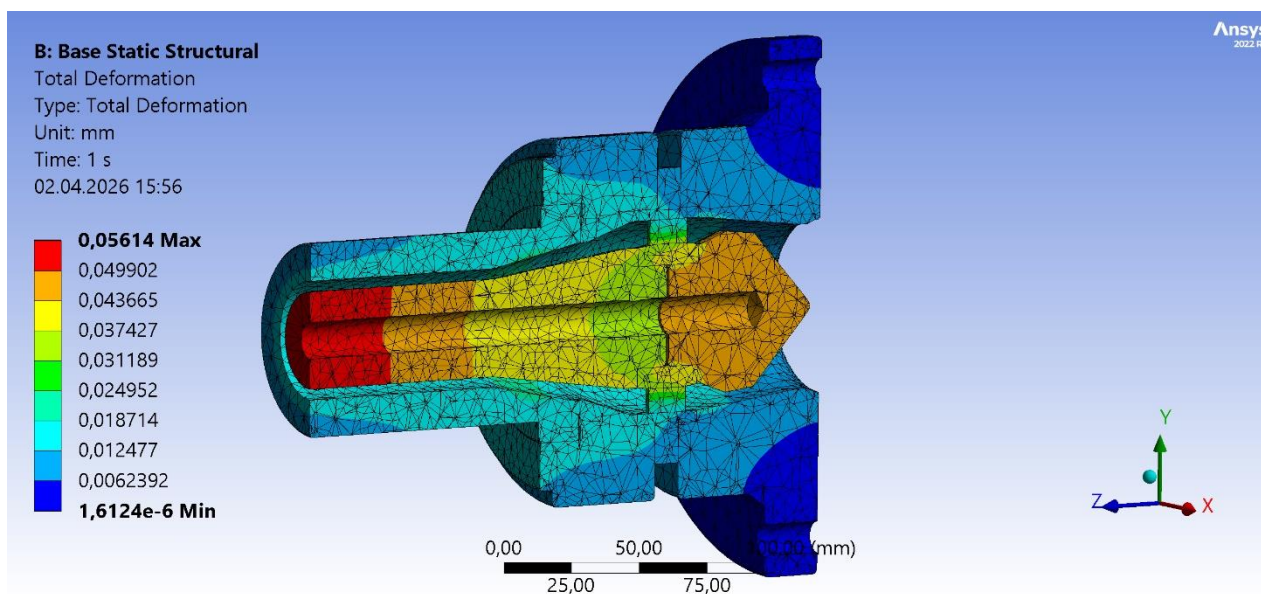


Рисунок 5.22 – Загальні переміщення вузла, мм

Максимальні переміщення склали 0,056 мм, що вказує на незначну деформацію деталі за рахунок дії внутрішнього тиску та високої температури. Найбільші переміщення спостерігаються у вихідній частині дорнотримача в зоні виходу виробу з головки.

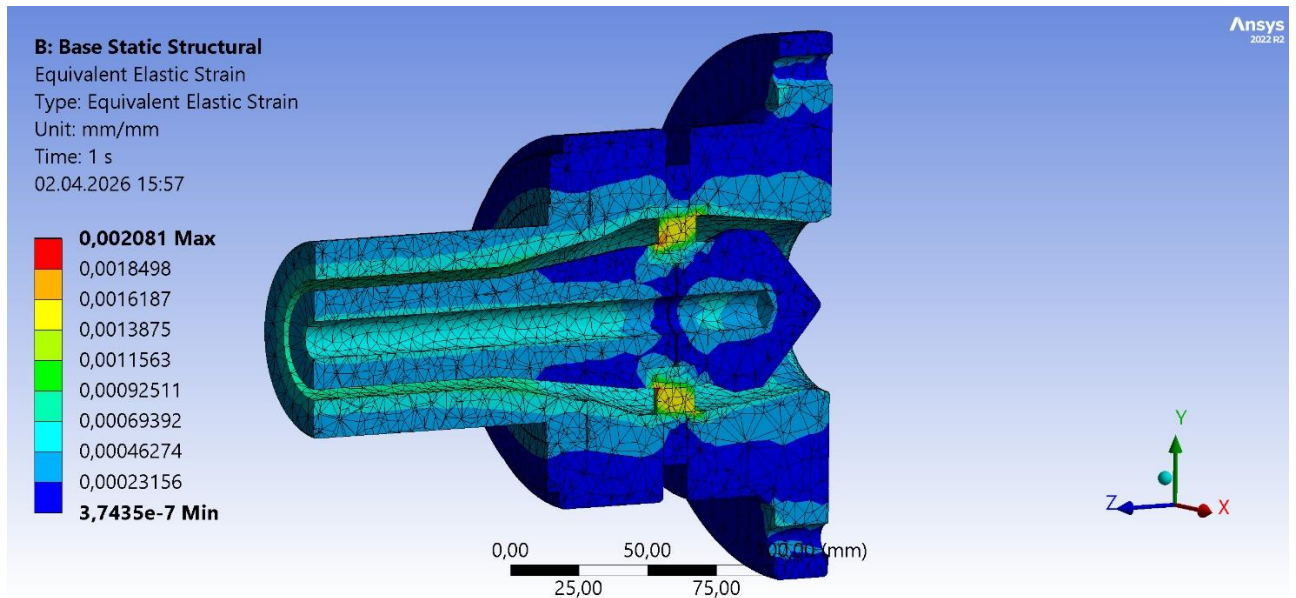


Рисунок 5.23 – Відносні деформації вузла, мм/мм

Аналіз відносних деформацій показує, що найбільше деформуються стрижні дорнотримача. Проте деформації є незначними, адже їх максимальне значення дорівнює 0,21%.

5.4.5 Результати розрахунків модернізованого вузла

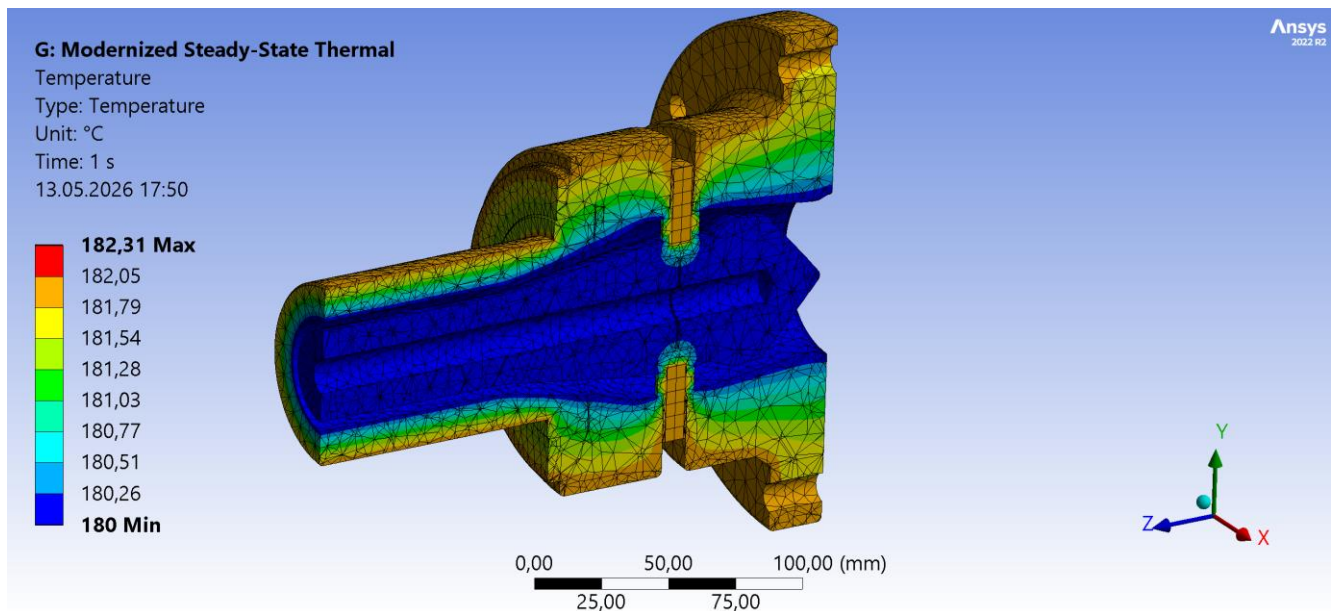


Рисунок 5.24 – Розподіл температури по моделі вузлу, °C

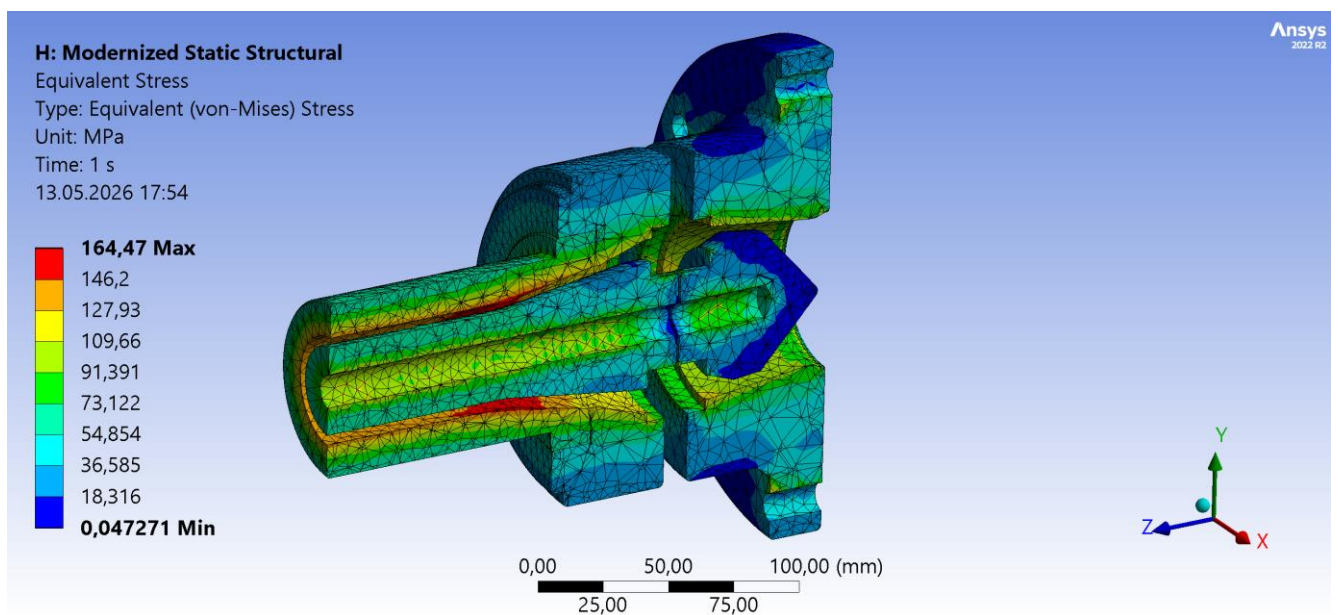


Рисунок 5.25 – Розподіл еквівалентних напружень у вузлі (за Мізесом), МПа

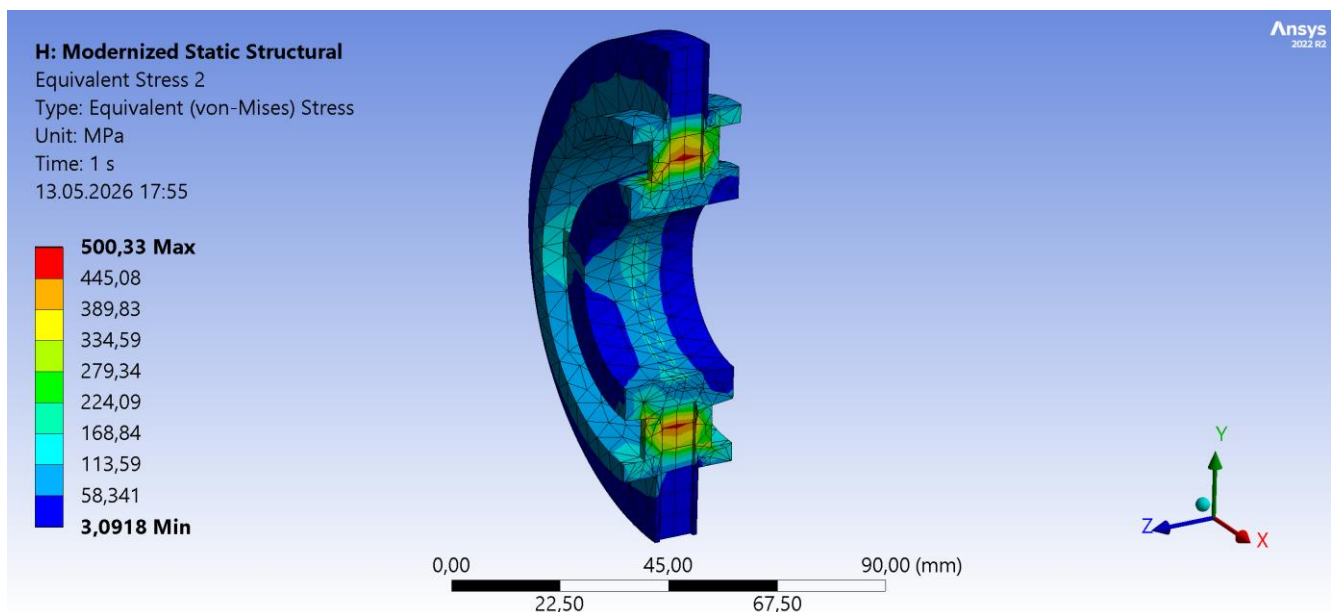


Рисунок 5.26 – Розподіл еквівалентних напружень у дорнотримачі (за Мізесом), загальний вигляд, МПа

Максимальні еквівалентні напруження у вузлі склали $\sigma_{\text{вузла}} = 164,47$ МПа, а у дорнотримачі $\sigma_{\text{дтр}} = 500,33$ МПа. Найбільшим концентратором напружень у тримачі є стрижень.

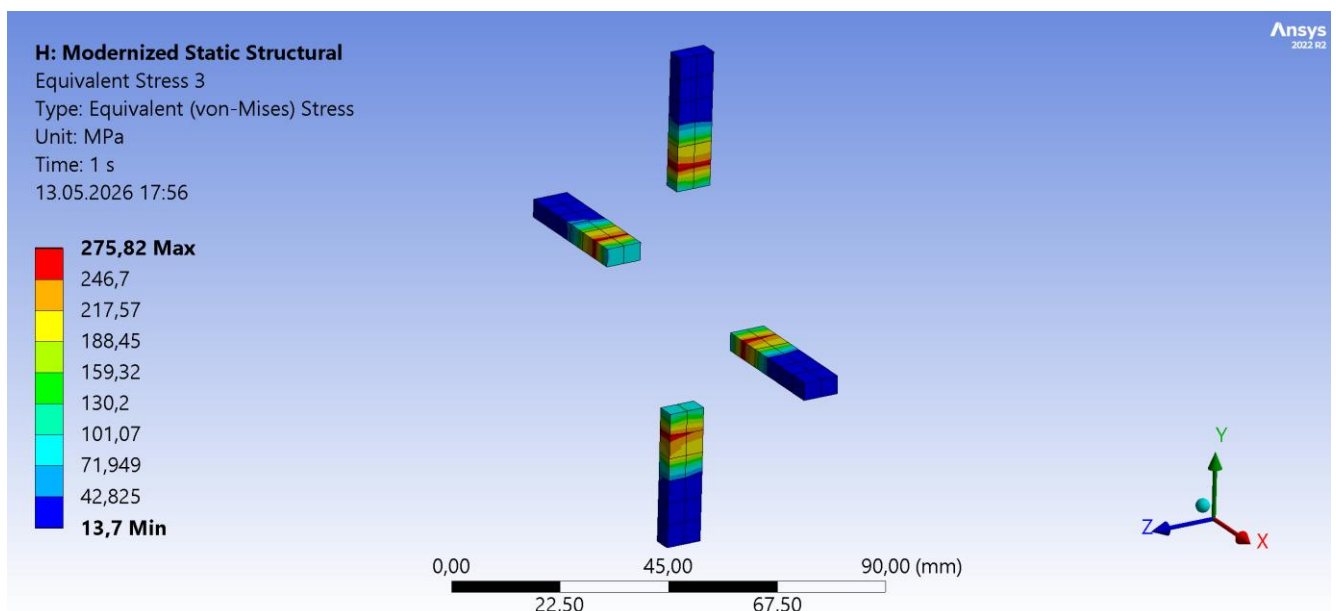


Рисунок 5.27 – Розподіл еквівалентних напружень у вставках (за Мізесом), МПа

Максимальні еквівалентні напруження у вставках склали $\sigma_{\text{вст}} = 275,82$ МПа.

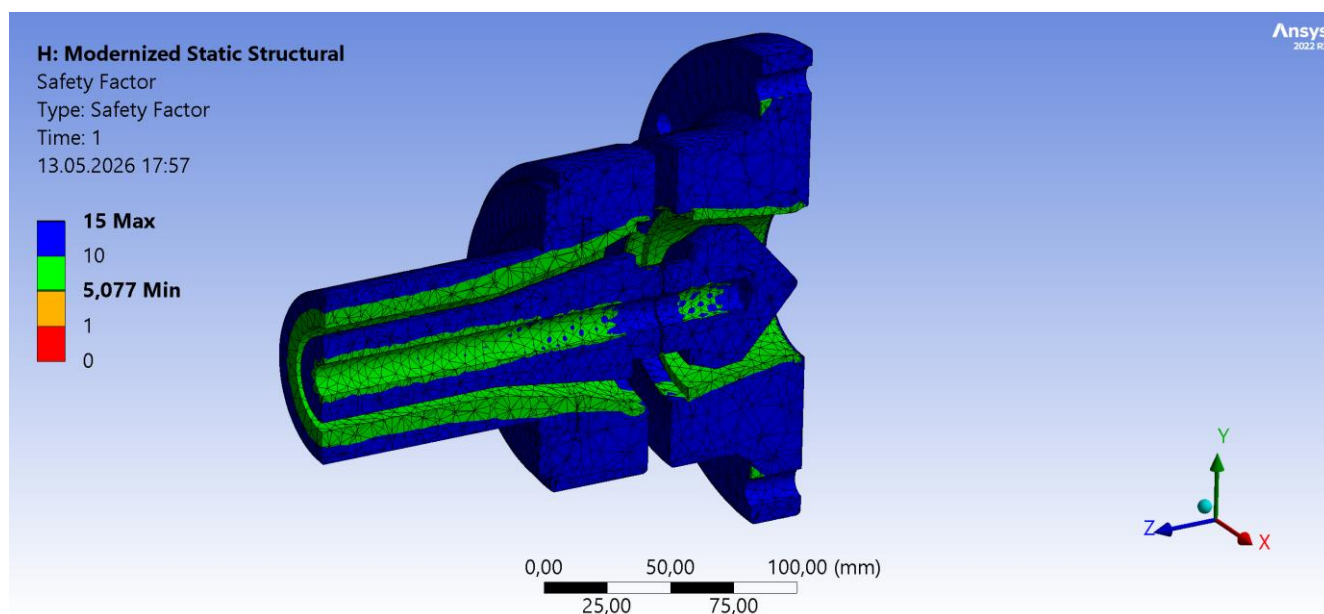


Рисунок 5.28 – Коефіцієнт запасу міцності у вузлі

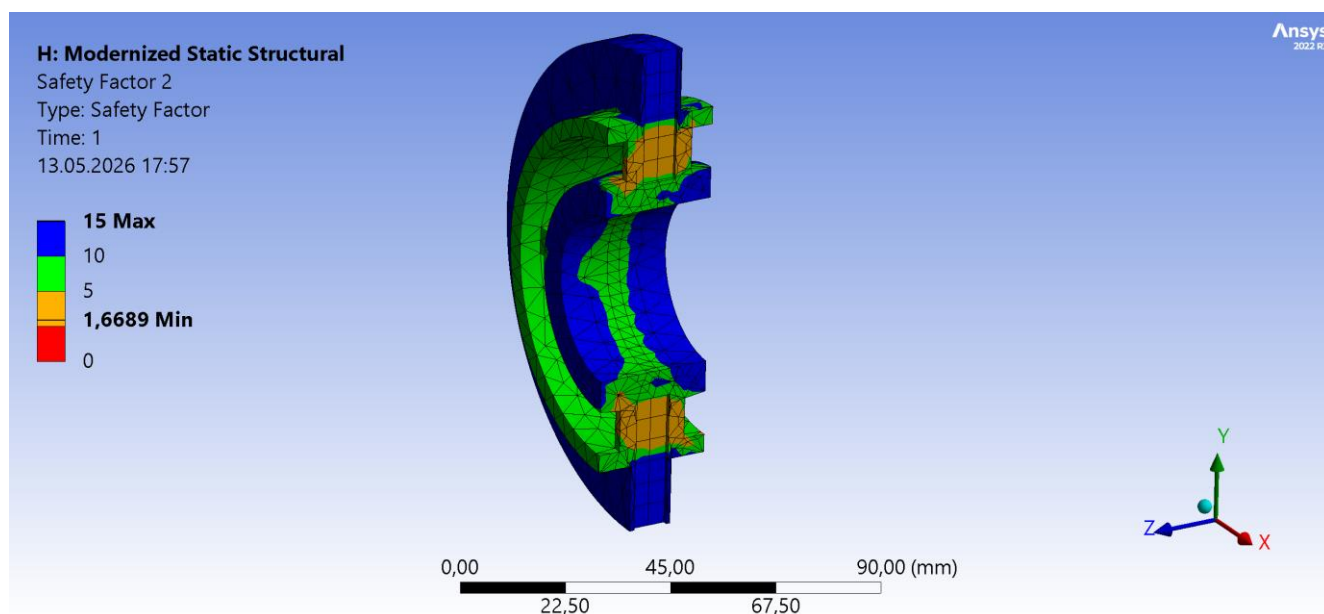


Рисунок 5.29 – Коефіцієнт запасу міцності у дорнотримачі

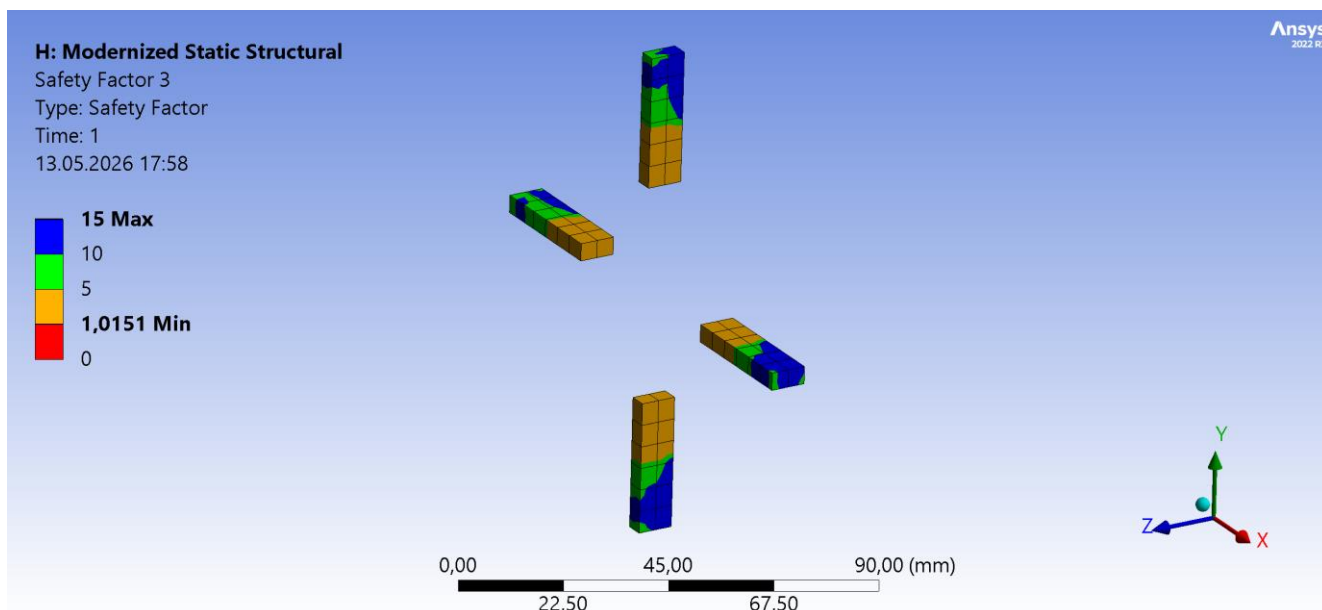


Рисунок 5.30 – Коефіцієнт запасу міцності у вставках

У вузлі діючі напруження менші за допустимі в 5 разів, а в дорнотримачі в 1,67 разів, а значить конструкція є працездатною та надійною.

Щодо вставок з мідного сплаву, то ситуація не така однозначна. Коефіцієнт запасу в них складає 1,01 що має бути неприпустимим з точки зору проектування деталей в машинобудуванні [17], але до цих вставок не встановлювалося вимоги відсутності пластичних деформацій. Головною вимогою з точки зору міцності вставок є недопустимість їх руйнування і зберігання коефіцієнта запасу міцності відносно границі міцності $\geq 1,5$. В даному випадку коеф. запасу міцності на руйнування дорівнює:

$$n_{\text{руйн}} = \frac{[\sigma_{\text{руйн}}]}{\sigma_{\text{вст}}} = \frac{430}{275,82} = 1,56,$$

де $[\sigma_{\text{руйн}}] = \sigma_{\text{ум}} = 430$ МПа – допустимі напруження на руйнування

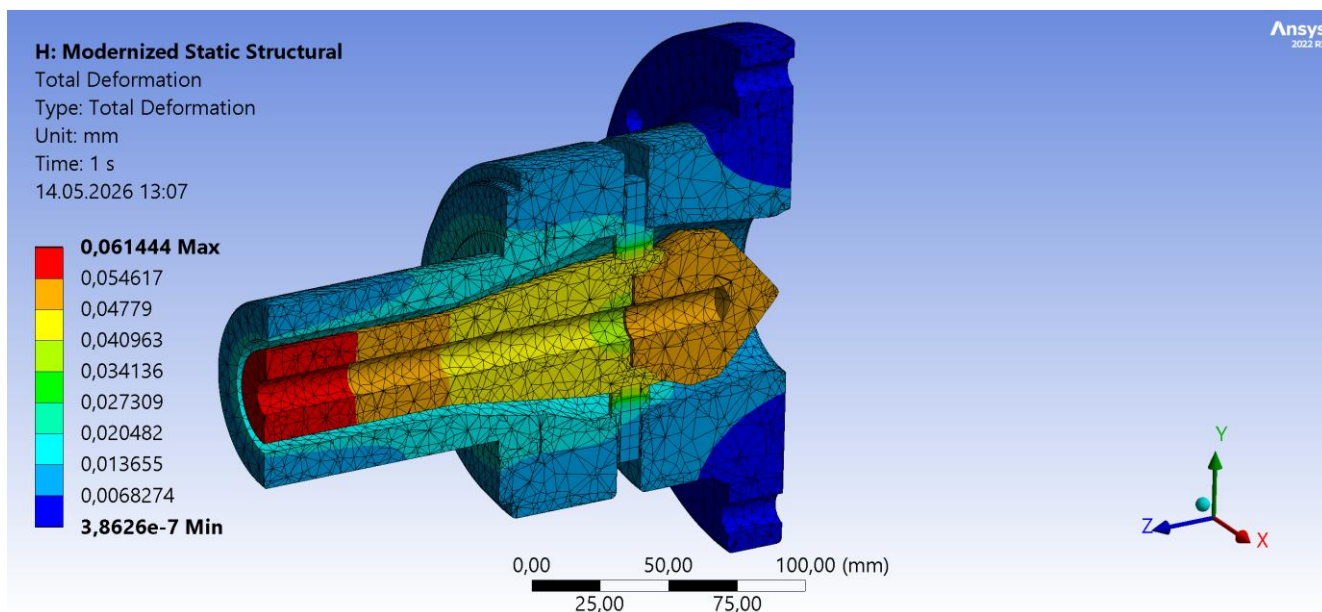


Рисунок 5.31 – Загальні переміщення вузла, мм

Максимальні переміщення склали 0,061 мм, що вказує на незначну деформацію деталі за рахунок дії внутрішнього тиску та високої температури. Найбільші переміщення спостерігаються у вихідній частині дорнотримача в зоні виходу виробу з головки.

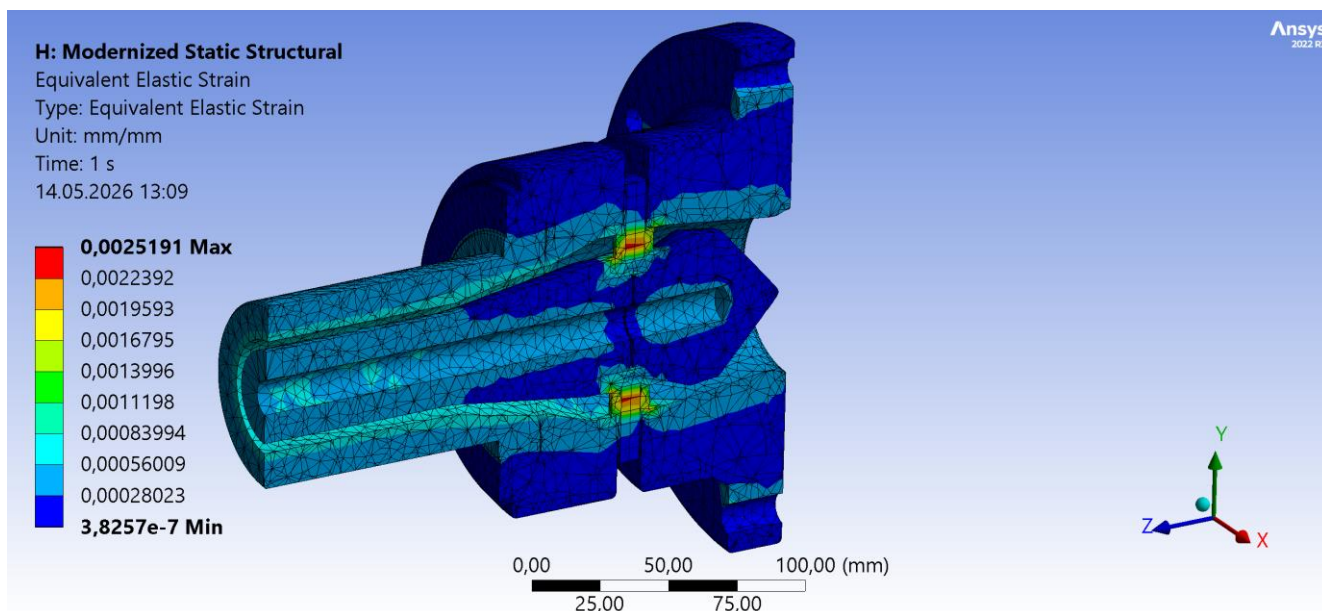


Рисунок 5.32 – Відносні деформації вузла, мм/мм

Аналіз відносних деформацій показує, що найбільше деформуються стрижні дорнотримача. Проте деформації є незначними, адже їх максимальне значення дорівнює 0,25%.

5.5 Розрахунок нагрівання вузлу з плином часу

Для підтвердження ефективності модернізації з точки зору якості нагрівання деталі, було проведено тепловий розрахунок на нагрівання дорнотримача з плином часу в ПЗ “ANSYS”, в системі “Thermal Transient” (рис. 5.33).

Вихідні дані про 3D модель та характеристики матеріалу для розрахунку були взяті з теплового аналізу з системи “Steady-State Thermal” (див. розділ 5.4.1).

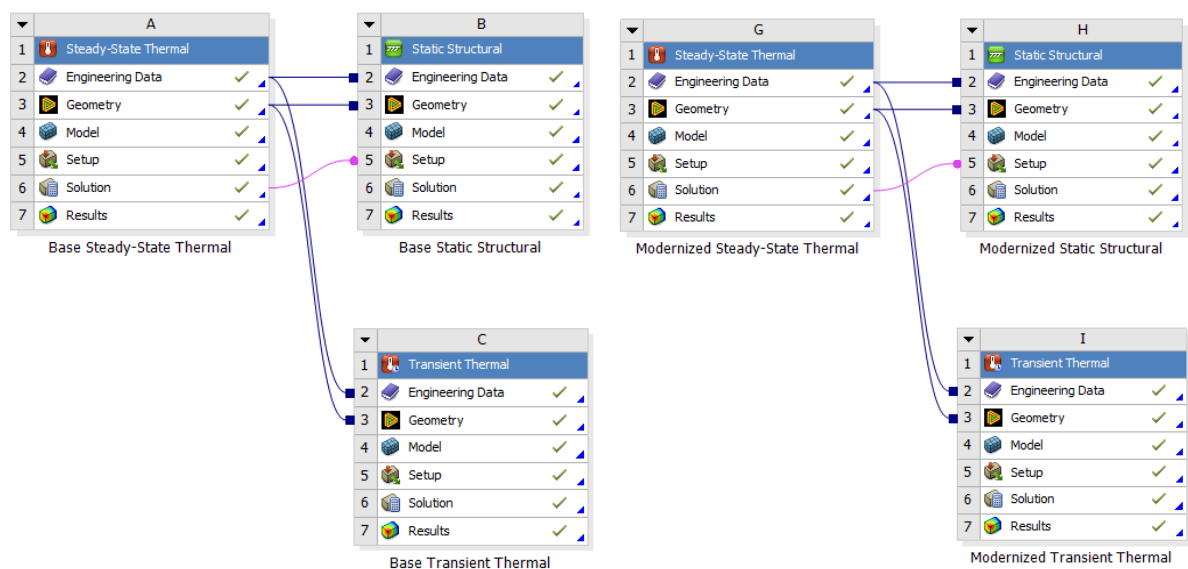


Рисунок 5.33 – Схема проекту розрахунку

5.5.1 Джерела температури

У немодернізованому вузлі нагрівання відбувається за допомогою нагрівачів, які контактують з зовнішніми циліндричними поверхнями (рис. 5.34).

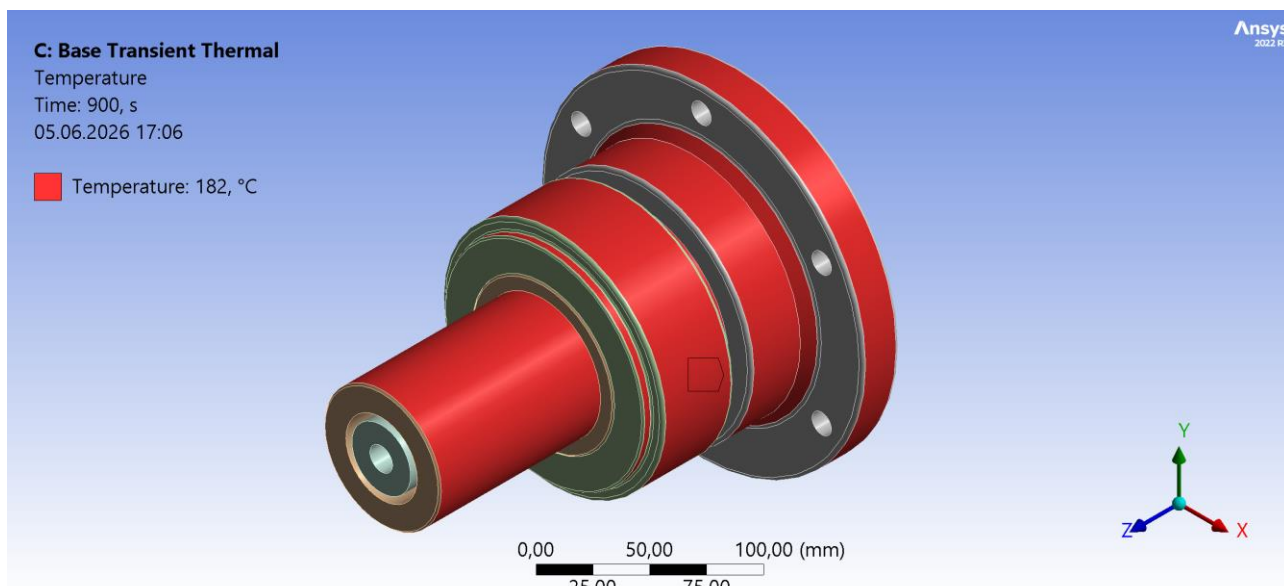


Рисунок 5.34 – Поверхні контакту вузла з нагрівачами

Модернізований вузол нагрівається так само, за допомогою зовнішніх нагрівачів, але до цього ще додається нагрівання пластин з мідного сплаву всередині дорнотримача (рис. 5.35).

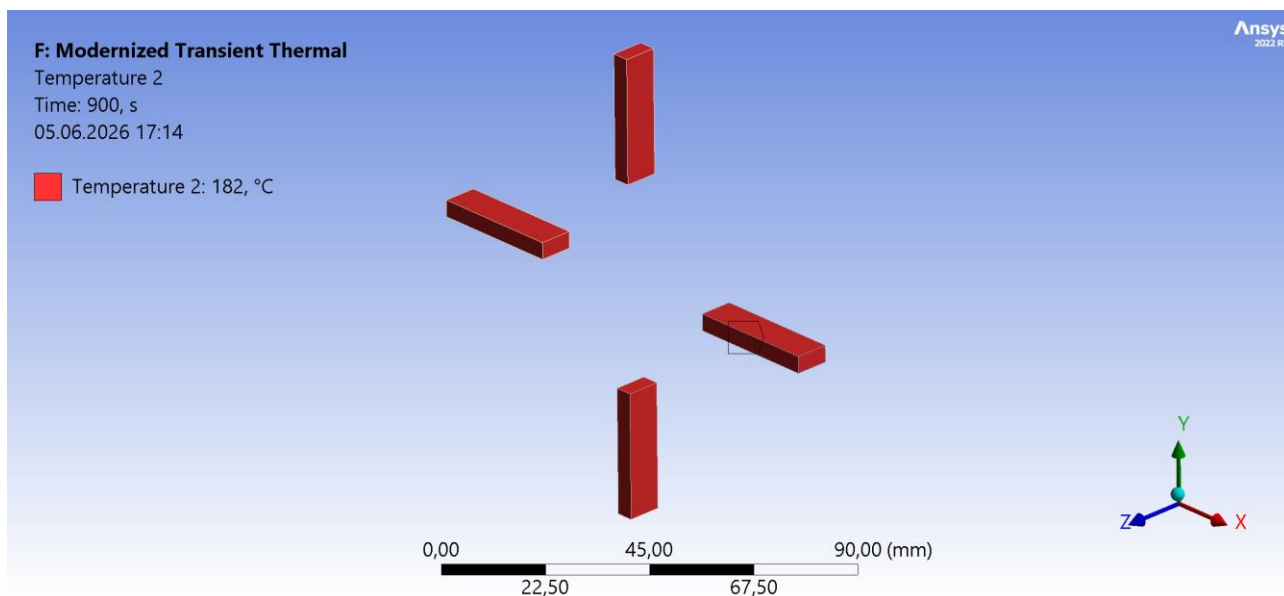


Рисунок 5.35 – Температура у вставках

Сітка скінченних елементів така сама як і при температурних та механічних розрахунках в “Steady-State Thermal” та “Static Structural” (див. розділ 5.4.2).

5.5.2 Параметри розрахунку

Розрахунок нагрівання дорнотримача проводився за умови дії нагрівачів вузлу протягом 15 хвилин з температурою навколишнього середовища (початковою температурою) 22 °C. Параметри розрахунку наведені в табл. 5.3

Таблиця 5.3 – Параметри розрахунку “Analysis Settings” (все, що не вказано, має значення за замовчуванням)

Number Of Steps	1
Step End Time	900 s
Initial Time Step	9 s
Minimum Time Step	0,9 s
Maximum Time Step	90 s

Бажаними результатами розрахунку було обрано температурний розподіл в розділі “Thermal”.

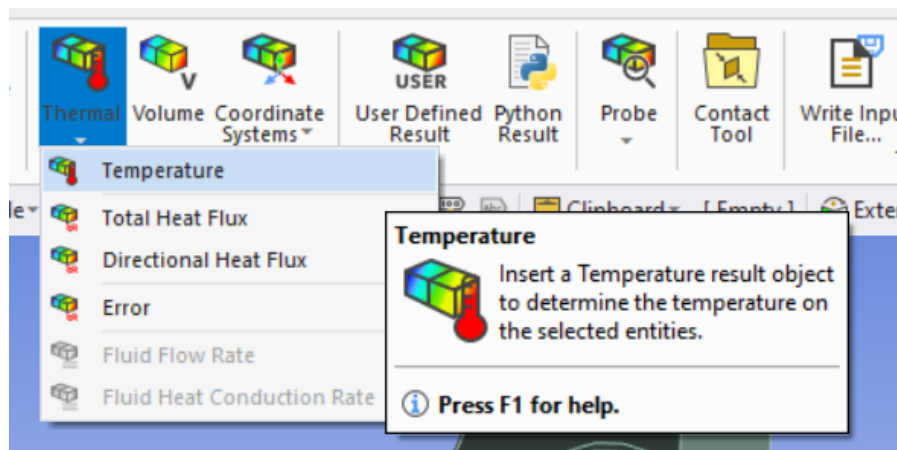


Рисунок 5.36 – Обраний результат розрахунку

5.5.3 Результати розрахунку нагрівання базового вузлу

В результаті симуляції нагрівання вузлу впродовж 15 хвилин, середня температура всієї конструкції склала 175 °C (рис. 5.37, табл. 5.4). Середня температура в дорнотримачі склала 168 °C (рис. 5.38, табл. 5.5), а в місці стику стрижнів дорнотримача з внутрішнім кільцем тримача – 118 °C (рис. 5.38).

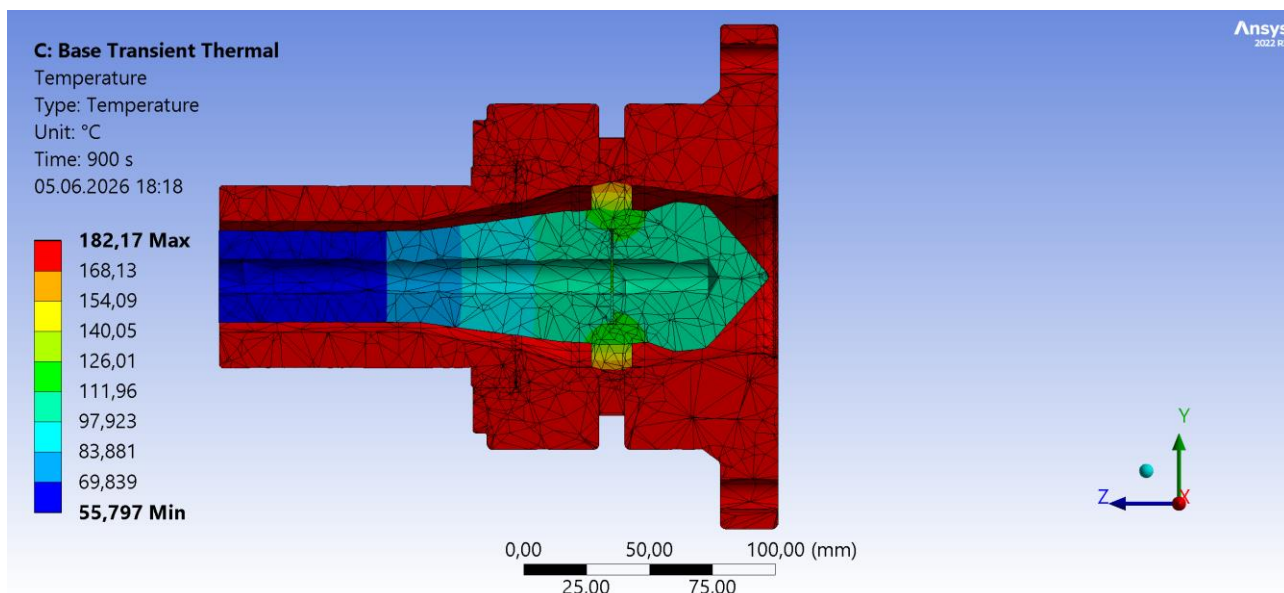


Рисунок 5.37 – Результат нагрівання базового вузлу протягом 15 хв

Таблиця 5.4 – Результати нагрівання базового вузлу у вікні “Details” результатів розрахунку, °C

Minimum	55,8
Maximum	182,17
Average	174,52

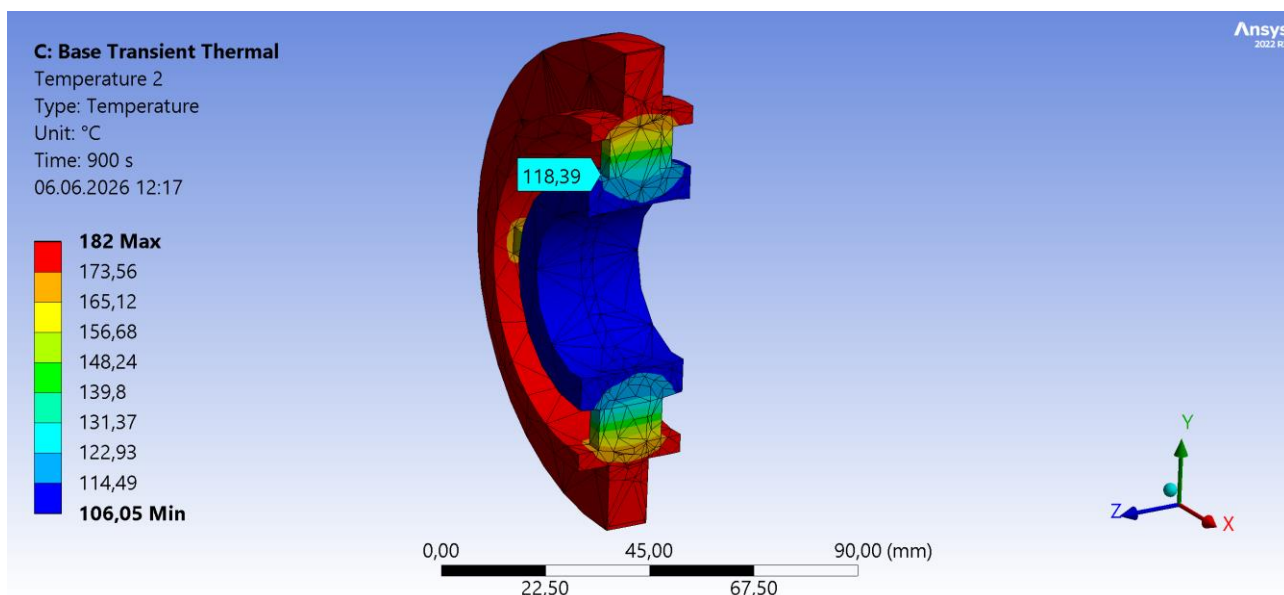


Рисунок 5.38 – Результат нагрівання базового дорнотримача протягом 15 хв (блакитна мітка вказує на температуру в місці стику стрижня дорнотримача з його внутрішнім кільцем)

Таблиця 5.5 – Результати нагрівання базового дорнотримача у вікні “Details”
результатів розрахунку, °C

Minimum	106,05
Maximum	182
Average	167,74

5.5.4 Результати розрахунку нагрівання модернізованого вузлу

В результаті симуляції нагрівання вузлу впродовж 15 хвилин, середня температура всієї конструкції склала 177 °C (рис. 5.39, табл. 5.6). Середня температура в дорнотримачі склала 180 °C (рис. 5.40, табл. 5.7), а в місці стику стрижнів дорнотримача з внутрішнім кільцем тримача – 175 °C (рис. 5.40).

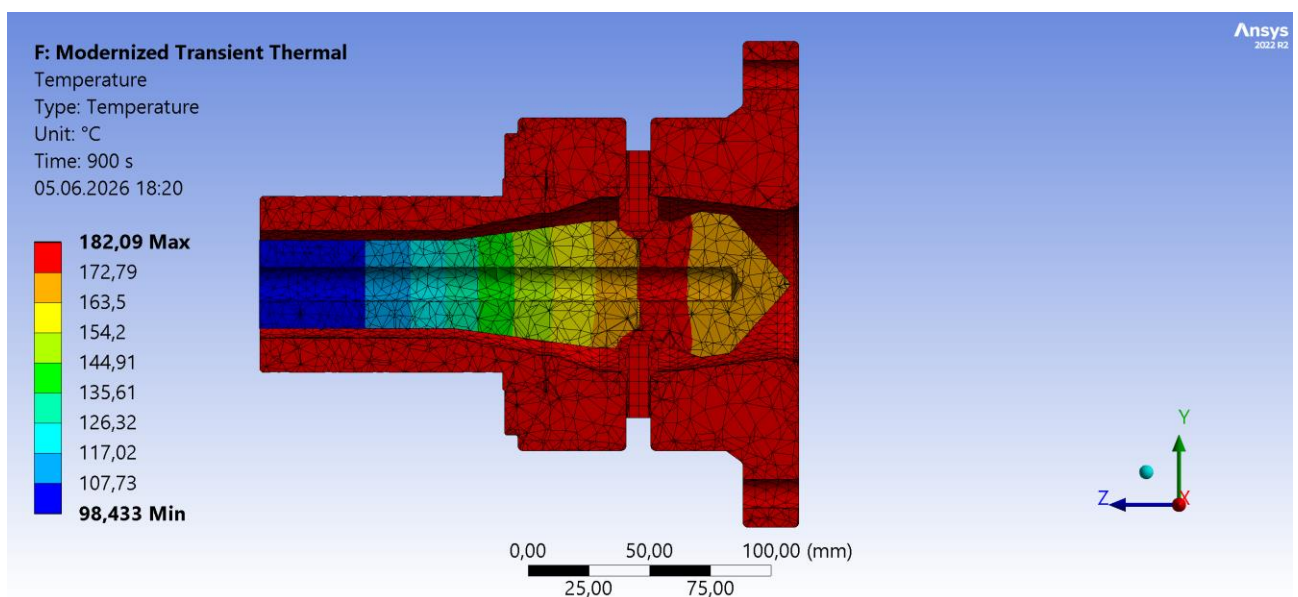


Рисунок 5.39 – Результат нагрівання модернізованого вузлу протягом 15 хв

Таблиця 5.6 – Результати нагрівання модернізованого вузла у вікні “Details”
результатів розрахунку, °C

Minimum	98,43
Maximum	182,09
Average	176,91

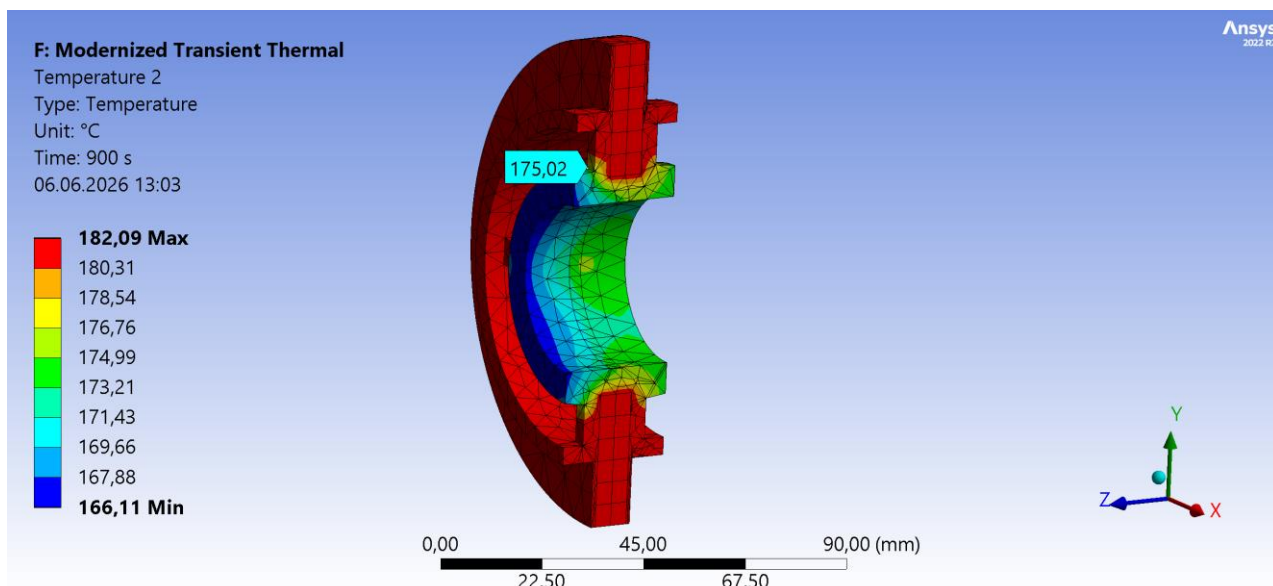


Рисунок 5.40 – Результат нагрівання модернізованого дорнотримача протягом 15 хв (блакитна мітка вказує на температуру в місці стику стрижня дорнотримача з його внутрішнім кільцем)

Таблиця 5.7 – Результати нагрівання модернізованого дорнотримача у вікні “Details” результатів розрахунку, °C

Minimum	166,11
Maximum	182,09
Average	180,02

5.6 Висновки до розрахунків в ПЗ “ANSYS”

Суть модернізації полягала в підвищенні теплопровідності дорнотримача для його кращого нагрівання. Результати розрахунку в системі “Thermal Transient” показали, що модернізована деталь справді нагрівається краще – за той самий час 15 хв, покращений дорнотримач нагрівся до вищої середньої температури (180 °C проти 168 °C у базовій конструкції) ніж базовий, а також місце стику стрижня тримача з його внутрішнім кільцем нагрілося до значно вищої температури (175 °C проти 118 °C у базовій конструкції), ніж те саме місце в базовому варіанті. Очевидно, що вище цього стику температура буде тільки зростати, тож загалом, температура стрижнів дорнотримача збільшилася в 1,5

рази, що призведе до підвищення якості кінцевого виробу, за рахунок усунення спаїв.

Проте, у такого рішення є й недолік – міцність модернізованої деталі в 1,3 рази менше за міцність базової (коеф. запасу міцності модернізованого дорнотримача – 1,68 , а базового – 2,23). Це може призвести до зменшення допустимого терміну експлуатації головки, але на її працездатність не вплине, адже запас міцності все одно буде більше ніж 1,5.

5.7 Застосування мови програмування C++ для розрахунків на міцність

З розвитком технологій та підвищенням точності й, як наслідок, складності розрахунків, які необхідно проводити для проектування реальних об'єктів та перевірки їх надійності, зростає й попит на використання швидкодіючих мов програмування. Мова C++ є однією з таких, тож в цій роботі було проведено розрахунок на міцність черв'яка екструдера з використанням цієї мови у середовищі “Visual Studio”.

Головною перевагою таких розрахунків є можливість швидко змінювати вихідні дані та отримувати оновлені результати за одним натиском кнопки пуску програми.

Прикладом такого рішення є розрахунок діючих нормальних та дотичних напружень у черв'яку за заданим навантаженням і характеристиками матеріалу, та визначення коефіцієнта запасу міцності деталі.

Вихідні дані до програми наведено в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Вихідні дані до програми

Параметр	Позначення в програмі	Значення
Початковий зовнішній діаметр шнека, м	LD_poch	0.018
Зовнішній діаметр ділянки для посадки підшипника, м	LD_op	0.055
Внутрішній діаметр ділянки для посадки підшипника, м	sd_op	0.03
Осьове зусилля на шнек, Н	P	22600

Максимальний згинаючий момент, діючий у шнеку, Н*м	M_bend	78
Максимальний крутний момент, діючий у шнеку, Н*м	M_tors	5090
Максимальне зусилля, діюче на шнек у вертикальній площині, Н	Q	1040
Допустимі напруження на розтяг-стиск, МПа	yield_strength	835
Допустимі напруження на зсув, МПа	shear_strength	0.5 * yield_strength = 417.5

На рис. 5.41 наведено результати розрахунку програми виведені у консоль.

```
A_poch is: 0.000254 m2
W_poch is: 1.073e-06 m3
Maximal normal stress is: 161.6 MPa
Normal stress safety factor is: 5.17

W_rho is: 0.0000298 m3
Maximal shear stress is: 171.4 MPa
Shear stress safety factor is: 2.44
```

Рисунок 5.41 – Результат виконання програми

Як видно, пораховані нормальні та дотичні напруження, а також коефіцієнти запасу міцності майже не відрізняються від тих, що були пораховані вручну (див. розділ 5.2.4). Наявність відмінностей в результатах зумовлена округленням проміжних результатів при ручних розрахунках.

В додатках наведено код даної програми.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

6.1 Загальні положення

Відповідно до чинного Закону України «Про охорону праці» [21], підприємства зобов'язані забезпечити персонал безпечними умовами роботи, що виключають шкідливий вплив на здоров'я. Цього досягають завдяки раціональному плануванню виробничих ділянок, оптимізації розміщення обладнання, чіткому дотриманню правил експлуатації техніки та технологічних процесів. Крім того, важливими є захист працівників від чинників, що становлять загрозу для їх здоров'я та життя, а також неухильне виконання санітарно-гігієнічних вимог безпосередньо на робочих місцях.

У цьому дипломному проекті за темою “Екструдер для виробництва полімерних труб з модернізацією формувальної головки” розроблено екструдер для виготовлення труб з поліетилену – машини, яка має ділянки, розігріті до 180 °С, та всередині якої створюється тиск 50 МПа. Таке устаткування може бути небезпечним для працівників підприємства, які взаємодіють з ним. Саме тому, розроблення заходів з охорони праці при роботі з цією машиною є важливою частиною даної роботи.

Крім вищезгаданих високих температури та тиску є й інші небезпечні особливості, які виникають при роботі з наявним устаткуванням, а саме: повітря робочої зони, забруднене газами розплаву термопласту; небезпека потрапляння одягу та довгого волосся у рухомі частини машини; високий рівень безперервного виробничого шуму при роботі устаткування; небезпека утворення пожежі в разі контакту гарячого розплаву з легкозаймистими речовинами;

Розміри робочої ділянки, в якій розташовується виробнича лінія з екструдером наступні: довжина – 22 м, ширина – 8 м, висота 5,8 м. Площа ділянки – $22 * 8 = 176 \text{ м}^2$.

6.2 Безпека при роботі з машиною для лиття під тиском та її механізмами

Під час виробничого циклу екструдера, кінцева частина його корпусу нагрівається до температур близько 160-220 °С (в цьому проекті, до 180). Для запобігання отримання опіків, працівники мають вдягати захисний одяг, а якщо вони налаштовують екструдер поблизу корпусу або екструзійної головки, тоді додатково й теплоізоляційні рукавиці.

Якщо матеріал застрягає у формуючій головці, тиск може почати стрімко зростати. Це може призвести до руйнування фланцевих з'єднань, зриву болтів та «вибухового» викиду гарячої маси. Тому, необхідно регулярно чистити головку від залишків полімеру або відфільтрованих частинок, якщо в головці встановлено фільтр.

Також, необхідно пам'ятати, що перш за все, екструдер – це потужна машина, яка має багато небезпечних механізмів, які можуть тяжко травмувати працівника, в разі невиконання ним заходів безпеки. Під час завантаження термопластичного матеріалу у бункер, заборонено просовувати руку вглиб бункеру, адже є ризик захоплення пальців шнеком. В такому устаткуванні використовуються приводи та різного роду передачі для створення обертового та поступального руху. Ніколи не можна знімати кришку з редуктора, чи доторкатися до ремня пасової передачі під час роботи екструдера.

Крім того, для мінімізації ризиків отримання травм в сучасних машинах використовують системи автоматичної зупинки роботи при заклинюванні приводу шнека, а також захисні кожухи для муфт, валів та пасових передач, що розташовані ззовні корпусу для запобігання випадкового чи навмисного контакту людей з небезпечними механізмами обертання.

6.3 Повітря робочої зони

Під час нагрівання полімеру, відбувається його руйнування, що призводить до виділення отруйних газів, які можуть викликати запаморочення,

отруєння або опіки дихальних шляхів. Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 “Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень” [22] концентрація шкідливих речовин в повітрі робочої зони не має перевищувати Гранично Допустимі Концентрації (ГДК) встановлені наказами та санітарними нормами. Зокрема при плавленні поліетилену у повітря виділяються формальдегід (ГДК якого складає 0,5 мг/м³ згідно Наказу МОЗ України від 09.07.2024 № 1192 [23]), акролеїн (ГДК якого складає 0,2 мг/м³ згідно Наказу МОЗ України від 09.07.2024 № 1192 [23])

Також, під час завантаження полімерного матеріалу у воронку, може здійснюватися пил, який складається з мілких частинок термопласту, які були отримані внаслідок нарізання матеріалу на капсули та його можливого часткового руйнування під час транспортування.

Щоб захиститися від таких небезпечних чинників, необхідно надати працівникам респіраторні маски з відповідними фільтрами для захисту дихальних шляхів, які відповідають вимогам Наказу Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 28.12.2007 № 331 (НПАОП 0.00-1.04-07) [24]. Також, обов’язковим є облаштування робочого місця належною припливно-витяжною вентиляційною системою, що забезпечує належну циркуляцію повітря, завдяки якій всі отруйні речовини та пил будуть виводитися за межі робочого приміщення.

6.4Виробничий шум

Під час роботи промислового устаткування виникає значний виробничий шум, який може бути постійним або перемінним. Екструдер та все інше обладнання, яке встановлюється з ним на виробничій лінії, не є виключенням і в випадку виробництва поліетиленових труб, шум є безперервним.

Постійний гучний шум негативно впливає на нервову систему та органи слуху. Тому, вимогами ДСН 3.3.6.037-99 “Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку” [25] передбачено обмеження щодо рівня шуму у виробничих приміщеннях, а саме – не більше за 80 дБА.

Для захисту працівників від шуму використовують засоби індивідуальної безпеки (ЗІЗ), а також конструктивні рішення. Серед можливих ЗІЗ можна використати навушники з пасивним або активним шумопоглинанням, як наприклад беруші 3M Reusable Ear Plug 1200 Series або 3M PELTOR WS ALERT X+ Headsets.

Серед конструктивних рішень є облицювання внутрішніх поверхонь приміщення ділянки звукоізоляційними матеріалами, як наприклад, скловолокно або акустична мінеральна вата.

Так як зношені деталі обертових механізмів (такі як підшипники, шестерні і т.д.) створюють додатковий шум, необхідно контролювати рівень мастила в вузлах, що зменшує тертя та зношення, а також замінювати деталі та вузли які вже не відповідають вимогам експлуатації та контролю рівня шуму.

6.5 Пожежна безпека

Виробничий процес труб з поліетилену передбачає застосування високих температур (в даному випадку 180 °C), що може призвести до пожежі в разі контакту гарячого розплаву полімеру з легкозаймистими речовинами. Саме тому, виробнича ділянка має бути обладнана достатньою кількістю вогнегасників для усунення пожежі в разі її виникнення. Приміщення відноситься до категорії Г згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [26]. На виробництві поліетиленових труб може виникнути пожежа класів А, В та Е, тож краще всього підійдуть порошкові вогнегасники, наприклад ВП-5 чи ВП-9. Так як площа ділянки складає 176 м², то згідно з Наказу МВС України від 15.01.2018 №25 [27] на ній треба встановити щонайменше 5 порошкових вогнегасників з масою заряду вогнегасної речовини 5 кг, або 3 вогнегасники з зарядом речовини 9 кг.

Кожен вогнегасник повинен мати паспорт з вказаною датою виробництва та бути з пломбою, на якій присутній підпис людини, відповідальної за протипожежний стан ділянки та вказані дати діагностування, технічного

обслуговування (заправки) та наступного технічного обслуговування вогнегасника.

Відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 [28] приміщення в якому знаходиться виробнича ділянка має бути обладнане евакуаційними виходами, які мають бути вільні завжди. Протипожежні двері та ворота повинні мати пристрої для самозачинення та ущільнення в притулах.

7 ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

7.1 Опис і призначення деталі

Деталь яка розробляється – вихідне сопло формувальної головки екструдера (рис. 7.1).

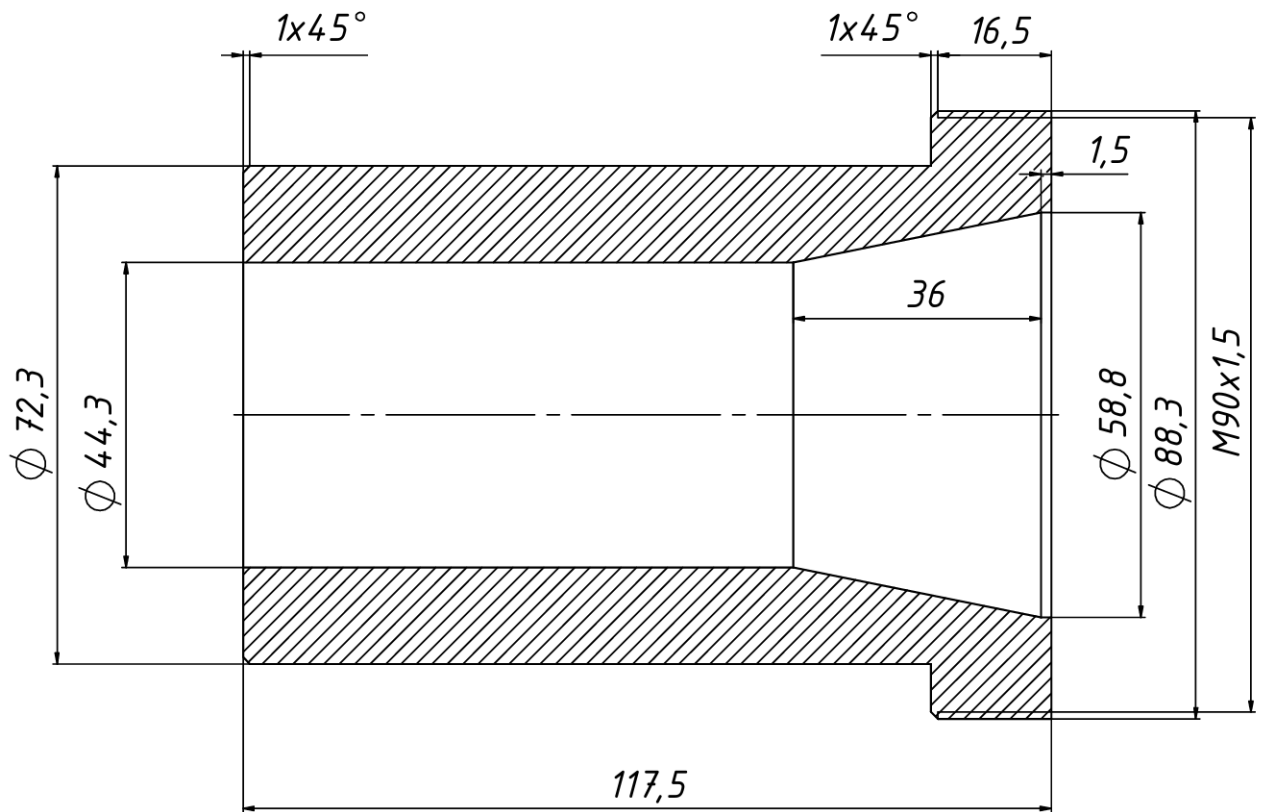


Рисунок 7.1 – Ескіз вихідного сопла

Деталь виконана з жароміцної сталі 38Х2МЮА (ДСТУ 7809:2015)

Заготовка деталі (рис. 7.2) не має складних геометричних елементів, що дозволяє безперешкодно виконати її за допомогою лиття.

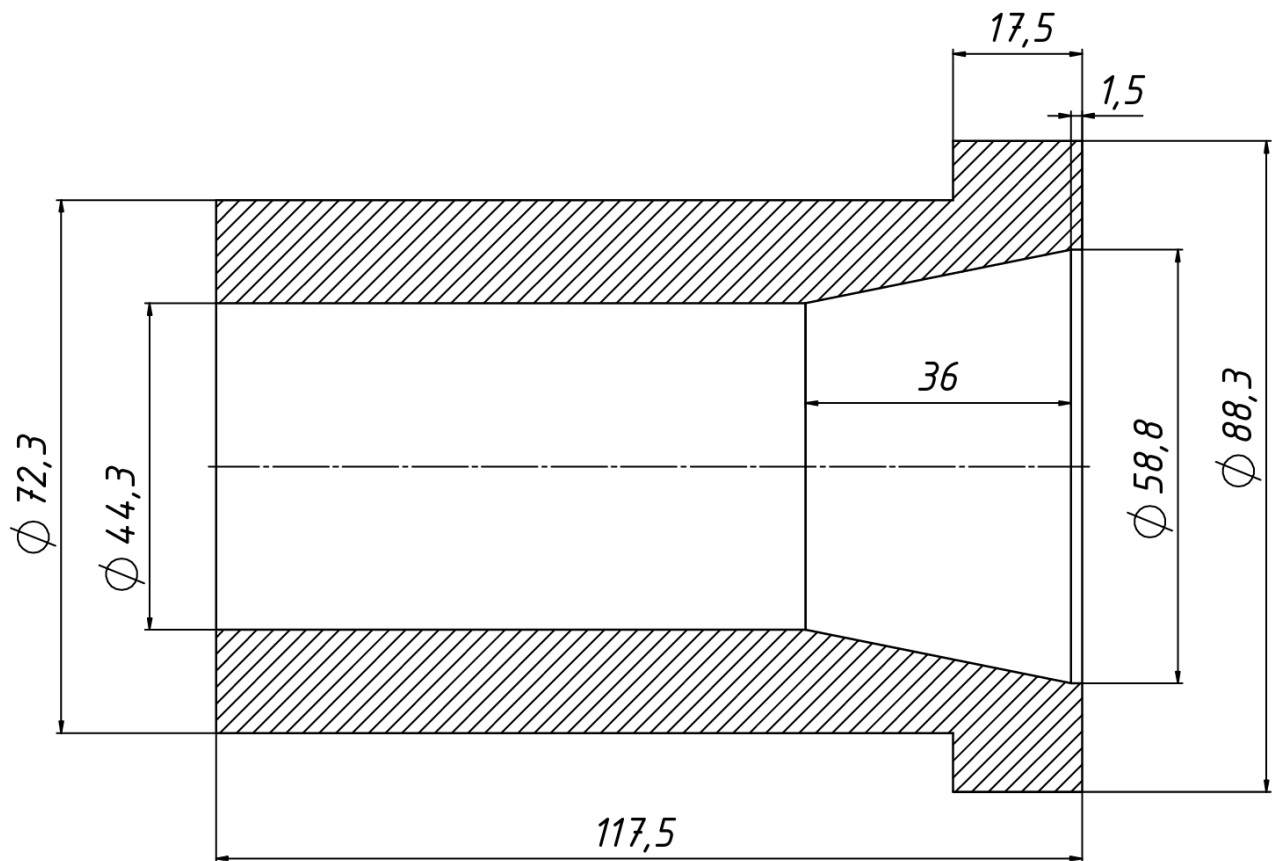


Рисунок 7.2 – Заготовка сопла

7.2 Технологічний процес виготовлення деталі

Розроблено технологічний процес для виготовлення вихідного сопла формувальної головки екструдера. В процесі виробництва деталі, використовуються токарні, шліфувальні та полірувальні операції, описані у маршрутній та операційній карті. Ескізи заготовки, яка обробляється до деталі описано у ескізній карті.

Дубл.																		
Взамін.																		
Підпис										Зм	Арк	№ док	Підпис	Дата				
Розробив	Єлінов М.М.					НТУУ "КПІ" ФАПІЕ												
Перевірів	Борщик С.О.																	
Н.Контр.						СОПЛО												
МО1	Сталь 38Х2МЮА ДСТУ 7809:2015																	
МО2	Код	ОВ		МД	ОМ	Н.роз	КВМ	Код заготовки	Профіль і розміри						КД	МЗ		
		кг						Відливка	117,5х88,3									
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, найменування операції													
Б	Код, найменування обладнання							СМ	Проф.	Р	Уп	Кр	Коод	ОН	ОП	Кшт	Тп.з.	Т.шт
А01	67			005	4110 Токарна													
Б02	Токарний верстат з ЧПК HAAS ST-30Y							2	19149	3	10	1	2	1		1		
03																		
А04	67			010	4122 Токарно-нарізна													
Б05	Токарний верстат з ЧПК HAAS ST-30Y							2	19149	3	10	1	2	1		1		
06																		
А07																		
Б08																		

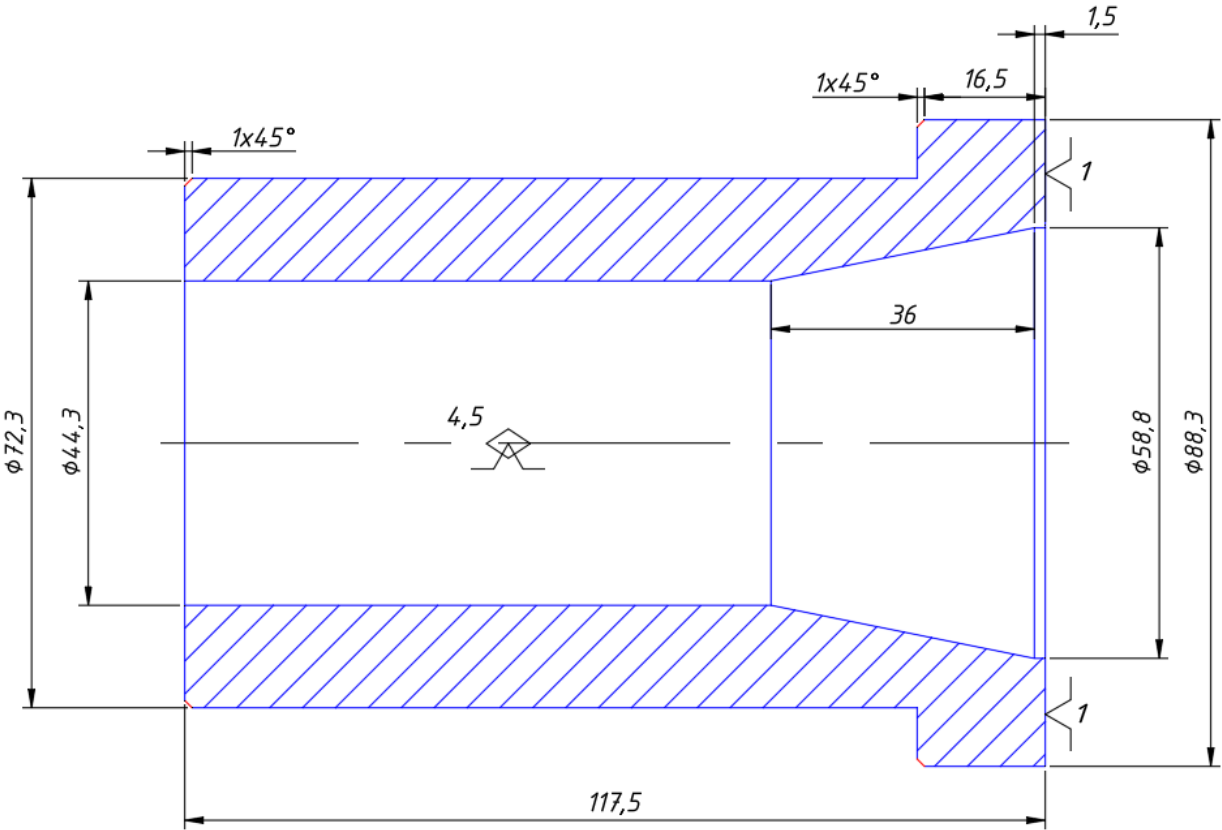
Маршрутна карта

Дубл.			
Взамін.			
Підпис			

--	--	--	--	--

Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата

Розробив	Єлінов М.М.			НТУУ “КПІ” ФАПІЕ		010				
Перевірів	Борщик С.О.									
						СОПЛО				Н
Н. контр.										

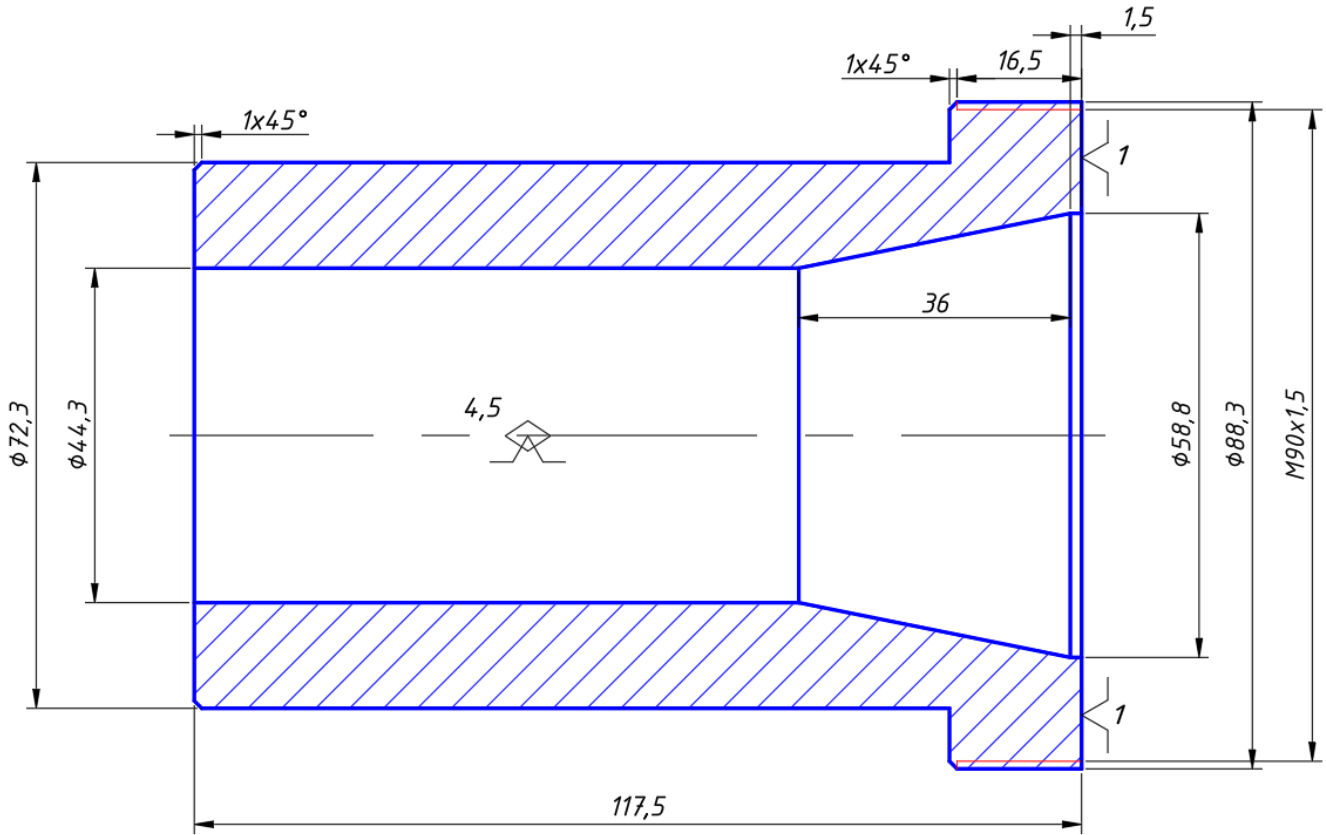


Дубл.			
Взамін.			
Підпис			

--	--	--	--	--

Зм	Ар	№ док.	Підпис	Дата

Розробив	Єлінов М.М.			НТУУ “КПІ” ФАПІЕ		015			
Перевірів	Борщик С.О.								
СОПЛО						Н			
Н. контр.									



7.3 Призначення пристосування для обробки деталі

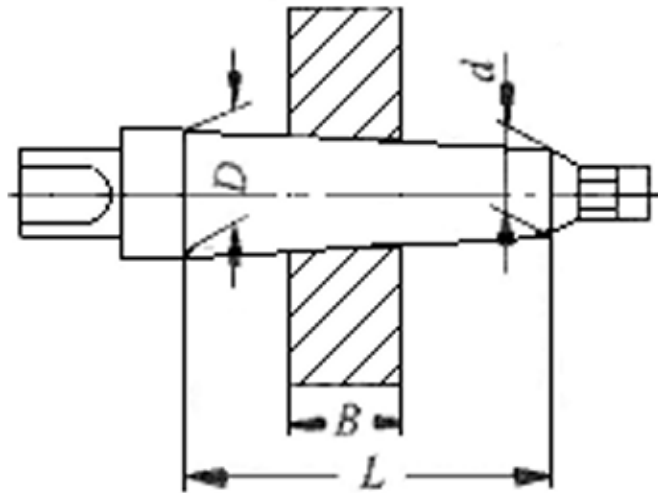


Рисунок 7.3 – Конічна оправка

Конічна оправка — це пристосування для центрування та надійного закріплення заготовок із наскрізними отворами. Завдяки конусній формі вона забезпечує збігання осей деталі та шпинделя, що гарантує високу точність обробки та мінімальне радіальне биття.

За рахунок малої конусності оправки, заготовка легким ударом лівого кінця оправки об підставку надійно базується і закріплюється на ній [29].

ВИСНОВКИ

У даному дипломному проекті виконано розрахунок екструдера з модернізацією формувальної головки, який входить до розглянутої технологічної лінії для виробництва труб з поліетилену.

В першому розділі було розглянуто призначення екструдера та можливості для застосування виробу, який виготовляється на ньому згідно з темою цієї роботи. Наведено схему лінії виробництва і описано принцип роботи машин, вузлів і механізмів, які наявні в ній.

Далі було наведено технічну характеристику базової машини і докладно описано її конструкцію та принцип роботи на всіх етапах переробки полімеру у трубу – від завантаження поліетиленових гранул у воронку до проходження розплавом формувальної головки і виходу з неї готового виробу.

В розділі літературно-патентного огляду було проведено опис літератури, яка була розглянута під час проектування даного обладнання, та з якої було отримано вичерпні рекомендації щодо забезпечення експлуатаційних можливостей устаткування. Додатково було проведено огляд існуючих рішень для вирішення задачі, поставленої в цій роботі – поліпшення якості кінцевого виробу за рахунок модернізації формувальної головки.

Найбільший по об'єму та важливості розділ – розрахунки. В проекті виконано параметричні обчислення розмірів та характеристик обладнання для виготовлення труб. Було розраховано необхідну потужність приводу та оцінено продуктивність машини, проведено перевірочні розрахунки на міцність – як аналітично, так і чисельно, за допомогою сучасного CAD-пакету “SolidWorks” та МСЕ-пакету “ANSYS”. За допомогою цих самих систем було проведено перевірку на ефективність та доцільність обраного рішення для модернізації з виконанням моделювання нестационарного процесу теплопередачі.

В розділі охорони праці було розглянуто основні небезпечні чинники, які можуть негативно впливати на працівників ділянки. Відповідно до цього, було розроблено рекомендації та вказівки для мінімізації їх впливу. Наведені рішення

відповідають умовам прописаним в чинному законодавстві України, а також санітарних і будівельних нормах та стандартах.

В останньому розділі технології машинобудування було розроблено алгоритм для виготовлення деталі формувальної головки, вихідного сопла. Для його реалізації було підготовлено маршрутну карту, а також ескізні та операційні карти з дотриманням вимог ДСТУ.

В результаті виконання дипломного проекту, було отримано достатньо даних, які підтверджують доцільність та працездатність модернізації, що дозволяє впроваджувати її в існуючі вузли на виробництві та використовувати дане рішення при проектуванні нових вузлів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. 296 с.
2. Мікульонок І. О., Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Радченко Л. Б. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 200 с.
3. Басов Н. І., Казанков Ю.Ю., Любартович В.А. Розрахунок і конструювання обладнання для виробництва та переробки полімерних матеріалів. М : “Хімія” 1986. 486 с.
4. Міхалев. М. Ф., Третьяков Н. П. та ін. Розрахунок і конструювання машин і апаратів хімічних виробництв. Приклади та задачі. Л : “Машинобудування”, 1984. 301 с.
5. Костюченко, Д. О., & Щербина, В. Ю. (2026, February). АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЕКТУВАННЯ КОРПУСУ ГОЛОВКИ ЕКСТРУДЕРА. In The 4 th International scientific and practical conference “Innovation and development in world science”(February 2-4, 2026) MDPC Publishing, Zurich, Switzerland. 2026. 332 p. (p. 68).
6. Щербина В.Ю., Швачко Д.Г., Гур'єва Л.Н. Технологія виробництва матеріалів і виробів будівельного призначення [Електронний ресурс] / КПП ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2024. – 188с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66516>
7. Екструзійна головка : пат. 153031U Україна / Витвицький В.М., Сокольський О.Л. та ін. ; № u202204446 ; заявл. 28.11.2022 ; опубл. 10.05.2023 ; Бюл. № 19. 4 с.
8. Патент JP2005246751A, Японія, МПК В29С 48/03 / EXTRUSION HEAD / Ishikawa Izumi, Kikuta Kazuo та ін.
9. Кільцева екструзійна головка : пат. 115094U Україна / Олексієвиць В.Ф., Двойнос Я.Г. ; № u201600461 ; заявл. 21.01.2016 ; опубл. 10.04.2017 ; Бюл. № 7. 5 с.

10. Патент CN204687312U, Китай, МПК B29C 48/32 / HEAD FOR EXTRUSION / Zhang Yi.
11. Екструзійна гранулювальна головка для термопластів : пат. 93664U Україна / Мікульонок І.О., Мойсєєв А.О. ; № u201404929 ; заявл. 08.05.2014 ; опубл. 10.10.2014 ; Бюл. № 19. 4 с.
12. Екструзійна головка для формування порожнистого виробу : пат. 68120U Україна / Гончаренко В.В., Мартиненко Н.М. та ін.; № u201111769 ; заявл. 05.10.2011 ; опубл. 12.03.2012 ; Бюл. № 5. 4 с.
13. Патент US6551089B1, США, МПК B29C 48/09 / EXTRUSION HEAD WITH SPIRAL-CHANNEL DISTRIBUTOR ELEMENT / Langos Peter, Lehmann Manfred та ін.
14. Екструзійна головка : пат. 140036U Україна / Мікульонок І.О. ; № u201906262 ; заявл. 05.06.2019 ; опубл. 10.02.2020 ; Бюл. № 3. 5 с.
15. Кільцева екструзійна головка : пат. 112311U Україна / Сівецький В.І., Куриленко В.М. та ін. ; № u201606440 ; заявл. 13.06.2016 ; опубл. 12.12.2016 ; Бюл. № 23. 5 с.
16. Екструзійна головка для формування порожнистого виробу : пат. 94625U Україна / І. О. Мікульонок, О. С. Письменний ; № u201405233 ; заявл. 19.05.2014 ; опубл. 25.11.2014 ; Бюл. № 22. 4 с.
17. Alloy properties of C10100. Copper Development Association : веб-сайт. URL: <https://alloys.copper.org/alloy/C10100> (дата звернення: 10.04.2026).
18. Лашінський А. А., Толчінський А. Р. Основи конструювання та розрахунку хімічної апаратури: Довідник – Вид. друге. Л : “Машинобудування”, 1970. 752 с.
19. Беляєв Н.М. Опір матеріалів – 15-е вид. М : Видавництво “Наука”, 1976. 608 с.
20. ДСТУ 7806:2015. Прокат з легованої конструкційної сталі. Технічні умови. [Чинний від 01.04.2016]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 50 с.
21. Карвацький А. Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 392 с.

22. В.П. Володін. Екструзія профільних виробів з термопластів. СПб: Видавництво “ПРОФЕССИЯ”, 2005. 480 с.
23. Закон України “Про охорону праці” від 14.10.1992 № 2695-ХІІ.
24. Постанова Міністерства Охорони Здоров’я України “Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99” від 01.12.1999 № 42
25. Наказ Міністерства охорони здоров’я України “Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони” від 09.07.2024 № 1192.
26. Наказ Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду “Про затвердження Правил вибору та застосування засобів індивідуального захисту органів дихання (НПАОП 0.00-1.04-07)” від 28.12.2007 № 331.
27. Постанова Міністерства Охорони Здоров’я України “Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037.-99” від 01.12.1999 № 37.
28. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 01.01.2017]. Вид. офіц. Київ, 2016. 34 с.
29. Наказ Міністерства внутрішніх справ України “Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників” від 15.01.2018 № 25.
30. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 01.06.2017]. Вид. офіц. Київ, 2017. 47 с.
31. С.С. Добрянський, Ю.М. Малафєєв. Технологічні основи машинобудування. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 379 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Таблиця розглянутих патентів

№ п.п.	Предмет пошуку	№ свідоцтва, МПК, країна, автор	Сутність заявки, технічного рішення і ціль його створення
1	Головка екструдера	Патент № 153031U, МПК B29C 48/03, Україна, Витвицький В.М., Сокольський О.Л. та ін.	Конструкція трубної головки, в якій дорнотримач виконано у вигляді кільця з поздовжніми отворами. В робочому каналі між дорнотримачем і кільцевим випускним отвором розміщено кільцеву вставку з отворами, розташованими рівномірно вздовж співвісних з поздовжньою віссю кільцевої вставки кіл, що дозволяє вводити в робочий канал додаткові поздовжні неперервні елементи, за допомогою яких збільшується міцність кінцевого виробу.
2	Головка екструдера	Патент JP 2005246751A, МПК B29C 48/03, Японія, Ishikawa Izumi, Kikuta Kazuo та ін.	Конструкція трубної головки, завдяки якій полегшуються роботи по заміні деталей та очищенню, досягається зменшення розмірів конструкції та усувається необхідність у вирівнюванні вузла. Досягається це завдяки тому, що блок матриці, в якому об'єднані ніпельна частина, матрична частина, основний стрижень та картридж, можна легко з'єднувати з блоком основного корпусу головки по одному завдяки наведеним в патенті конструктивним рішенням.

3	Головка екструдера	Патент № 115094U, МПК B29C 47/20, Україна, Олексієвиць В.Ф., Двойнос Я.Г.	Конструкція кільцевої екструзійної головки, що складається з корпусу, дорнотримача, що містить радіальні канали розподілу полімеру і гвинтові канавки. Завдяки тому, що радіальні канали мають більший діаметр, та виконано поздовжні пази для перетоку розплаву з кожного радіального каналу у декілька гвинтових канавок, вдається досягти зменшення гідравлічного опору при достатній рівномірності розподілу розплаву у кільцевому зазорі на виході з головки.
4	Головка екструдера	Патент CN 204687312U, МПК B29C 48/32, Китай, Zhang Yi.	Конструкція головки в якій у дорнотримачі передбачено наскрізний отвір, а стінка цього отвору, що знаходиться найближче до дорну, розташована врівень із його зовнішньою поверхнею; це дозволяє гарантувати, що розплавлений матеріал зможе безперешкодно пройти через наскрізний отвір, не застрягаючи в тримачі, що призводить до зменшення гідравлічного опору розплаву та усунення зварних швів, що підвищує міцність труби.

5	Головка екструдера	Патент № 93664U, МПК В29С 47/20, Україна, Мікульонок І.О., Мойсєєв А.О.	Екструзійна гранулювальна головка для термопластів, що містить корпус з виконаними паралельно його поздовжній осі каналами, всередині кожного з яких розташована втулка, один торець якої зафіксовано буртиком каналу корпусу, а другий - знімним упором, в якій втулки розташовані в каналах з радіальним зазором, а упор виконано спільним для всіх каналів у вигляді різальної пластини з отворами навпроти каналів. Пропонована корисна модель поліпшує температурний режим течії термопласту в каналах екструзійної головки, що поліпшує якість одержуваного екструдату.
6	Головка екструдера	Патент № 68120U, МПК В29С 47/20, Україна, Гончаренко В.В., Мартиненко Н.М. та ін.	Конструкція екструзійної головки для формування порожнистого виробу, що містить корпус, розміщений в його порожнині дорн з каналом для подавання повітря всередину формованого порожнистого виробу. Корпус виконано з немагнітного матеріалу, із зовнішнього боку корпусу на ділянці розміщення дорна змонтовано котушку індуктивності, а дорн виконано з магнітного матеріалу з точкою Кюрі, що відповідає температурі перебігу процесу формування, завдяки чому вдається досягнути певного температурного режиму, використовуючи індукційне нагрівання.

7	Головка екструдера	Патент US 6551089B1, МПК B29C 48/09, США, Langos Peter, Lehmann Manfred та ін.	Конструкція головки, в якій розміщені два розподільних елементи, розташованих один навпроти одного в кільцевому зазорі: всередині — на внутрішній поверхні зовнішньої циліндричної втулки, а зовні — на зовнішній поверхні внутрішньої циліндричної втулки, розташованих по центру поршня виштовхувача, причому пластичний матеріал, розподілений по колу обох розподільних елементів, виходить у нижній частині поршня виштовхувача. Така конструкція дозволяє покращити розподіл потоків розплаву в матриці та безперебійну гомогенізацію в накопичувальному просторі при одночасному збільшенні пропускної здатності та швидкості виробництва.
8	Головка екструдера	Патент № 140036U, МПК B29C 48/30, Україна, Мікульонок І.О.	Конструкція головки, що містить циліндричний корпус з поздовжнім каналом, зафіксований на зовнішній поверхні циліндричного корпусу знімний радіатор охолодження, нагрівник, а також розташоване на виході з поздовжнього каналу сопло з конічним каналом. Радіатор охолодження виконано з поздовжнім розрізом для його фіксації на зовнішній поверхні циліндричного корпусу за рахунок сил пружності. Така конструкція призводить до запобігання передчасному плавленню полімеру в циліндричному корпусі та його надійного подавання до сопла, що покращує якість кінцевого виробу і забезпечує надійність роботи екструдера.

9	Головка екструдера	Патент № 112311U, МПК B29C 47/14, Україна, Сівецький В.І., Куриленко В.М. та ін.	Конструкція головки, що містить корпус та дорн, вставлений на дорнотримачі, утворюючи формуючий канал для протікання полімеру. В такій конструкції, принаймні один дорнотримач оснащено щонайменше одним пристроєм додаткового живлення з каналом, вихідний отвір якого направлений в напрямку вихідного формуючого каналу, за допомогою якого можливо регулювати розміщення вихідного отвору по висоті формуючого каналу. Завдяки такому рішення, через формуючу головку можливо вводити датчики у виріб для відстеження його стану, що дозволить зменшити кількість аварій з трубами, які знаходяться під високим тиском.
10	Головка екструдера	Патент № 94625U, МПК B29C 47/20, Україна, Мікульонок І.О., Письменний О.С.	Екструзійна головка для формування порожнистого виробу, що містить порожнистий корпус, розташований на його зовнішній поверхні щонайменше один нагрівник, а також розміщений у порожнині корпуса дорн, з'єднаний з корпусом за допомогою дорнотримача. Особливістю конструкції є те, що в дорнотримачі з боку зовнішньої поверхні корпуса виконано щонайменше один глухий отвір з розміщеною в ньому вставкою, коефіцієнт теплопровідності матеріалу якої більше за коефіцієнт теплопровідності матеріалу дорнотримача.

ДОДАТОК Б
Специфікації до графічної частини

ДОДАТОК В
Програма розрахунку на ЕОМ

```

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

//Constants
const double PI = 3.14;

//Computational functions
double normal_stress(double LD_poch, double P, double M_bend, int
yield_strength){
    double A_poch = 0;
    double I_poch = 0;
    double sd_poch = LD_poch / 2;
    double W_poch = 0;
    double stress = 0;

    A_poch = PI * pow(LD_poch, 2) / 4; //m^2
    I_poch = PI * pow(LD_poch, 4) / 32 - PI * pow(sd_poch, 4) / 32; //m^4
    W_poch = I_poch / 0.5 / LD_poch; //m^3
    stress = (P / A_poch + M_bend / W_poch) / 10e5; // MPa

    std::cout << std::setprecision(3);
    std::cout << "A_poch is: " << A_poch << " m2" << std::endl;
    std::cout << std::setprecision(4);
    std::cout << "W_poch is: " << W_poch << " m3" << std::endl;
    std::cout << std::fixed << std::setprecision(1) << "Maximal normal stress is: " <<
stress << " MPa" <<std::endl;
    std::cout << std::setprecision(2) << "Normal stress safety factor is: ";

    return yield_strength / stress;
}

double shear_stress(double LD_op, double sd_op, double M_tors, double Q, double
shear_strength){
    double I_rho = 0;
    double W_rho = 0;
    double shear_stress_t = 0;
    double shear_stress_Q = 0;
    double d_av = 0;
    double stress = 0;

    I_rho = PI * pow(LD_op, 4) / 16 - PI * pow(sd_op, 4) / 16;
    W_rho = I_rho / LD_op;

```

```

    d_av = (LD_op + sd_op) / 2;
    shear_stress_t = M_tors / W_rho;
    shear_stress_Q = 2 * Q / PI / d_av / (LD_op / 2 + sd_op / 2);
    stress = (shear_stress_t + shear_stress_Q) / 10e5;

    std::cout << std::setprecision(7);
    std::cout << "W_rho is: " << W_rho << " m3" << std::endl;
    std::cout << std::fixed << std::setprecision(1) << "Maximal shear stress is: " <<
stress << " MPa" << std::endl;
    std::cout << std::setprecision(2) << "Shear stress safety factor is: ";

    return shear_strength / stress;
}

int main(){

    //Given data
    //Dimensions, where LD is "large diameter" and sd is "small diameter".
    Dimensions are in meters.
    double LD_poch = 0.018;
    double LD_op = 0.055;
    double sd_op = 0.03;
    //Loads
    double P = 22600; //Maximal axial force acting on worm in Newtons
    double M_bend = 78; //Maximal bending moment acting on worm in Newton-
meters
    double M_tors = 5090; //Maximal torsion moment acting on worm in Newton-
meters
    double Q = 1040; //Maximal shear force acting on worm in Newtons
    //Material properties
    int yield_strength = 835; //MPa
    double shear_strength = 0.5 * yield_strength; //MPa

    //Results
    std::cout << normal_stress(LD_poch, P, M_bend, yield_strength) << std::endl;
    std::cout << std::endl;
    std::cout << shear_stress(LD_op, sd_op, M_tors, Q, shear_strength) << std::endl;
    double pause;
    std::cin >> pause;

    return 0;
}

```

ДОДАТОК Г
Особисті досягнення студента

ДОДАТОК Д
Результати перевірки на плагіат