

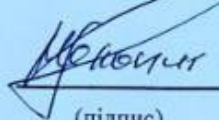
Міністерство освіти і науки України
Державний університет “Житомирська політехніка”
Кафедра механічної інженерії

“На правах рукопису”

УДК 621

“До захисту допущено”

Завідувач кафедри
механічної інженерії



(підпис)

Мельник О.Л.

(прізвище, ініціали)

БАКАЛАВРСЬКА
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

зі спеціальності 131 “Прикладна механіка” (ОПП “Високотехнологічний
комп'ютерний інжиніринг”)

на тему: “Конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення корпусу
одноступінчастого циліндричного редуктора”.

МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ

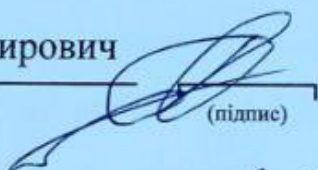
Студент групи

ПМ-142

шифр групи

Горобей Владислав Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

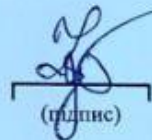


(підпис)

Керівник

д.т.н. Немировський Я. Б.

(науковий ступінь та вчене звання, прізвище, ініціали)



(підпис)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки

Кафедра механічної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри
механічної інженерії



(підпис)

Мельник О.Л.

(прізвище, ініціали)

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Горобею Владиславу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. **Тема роботи:** «Конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора».

Керівник роботи: Немировський Яків Борисович, д.т.н.

Затверджена наказом по університету від « 20 » « 03 » 2024 р. № 102C

2. **Строк подання студентом роботи** - 9 червня 2025 року.

3. **Вихідні дані до роботи:** типові конструкції одноступінчастих редукторів з атласів деталей машин; дані про стан редукторобудування в Україні; технічна інформація про металорізальні верстати, інструментальне та інше оснащення; стандарти для визначення допусків на креслениках, припусків на обробку, режимів різання; довідникові матеріали по загальному машинобудуванню та САПР.

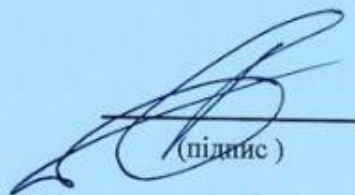
4. **Перелік завдань, які потрібно вирішити:** проаналізувати конструктивні рішення елементів редукторів для загального машинобудування; виконати аналіз конструктивних рішень провідних виробників редукторів; розробити 3D-модель редуктора; обґрунтувати розмірні та геометричні допуски корпусу редуктора на основі сучасних підходів до виготовлення та контролю

деталей; розробити конструкторську документацію на корпус редуктора; обґрунтувати вибір матеріалу та способу виготовлення заготовки корпусу редуктора; розробити технологічний процес виготовлення корпусу; виконати пошук можливих рішень в напрямку подальшого розвитку конструкцій корпусів редукторів на основі сучасних інструментів САПР та з урахуванням їх технологічності їх виготовлення.

5. Орієнтовний перелік графічного матеріалу: 1. Будова та функціонал редуктора – 1 арк. презентації; 2. Складальне креслення (або 3D-модель із відповідними анотаціями) корпусу редуктора (вигляд загальний) - 2 арк. А1; 3. Аналітичний огляд сучасних інженерних рішень в редукторобудуванні – 1 арк. презентації; 4. 3D модель розробленого редуктора (якщо цього не було в п.2) – 1 арк. презентації; 5. Технологія виготовлення корпусу редуктора – 3 арк. презентації; 6. Результати пошуку рішень в напрямку подальшого розвитку корпусів редукторів – 2 арк. А1.

6. Дата видачі завдання 20 02 2025 року.

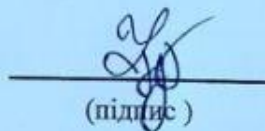
Студент


(підпис)

Горобей В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

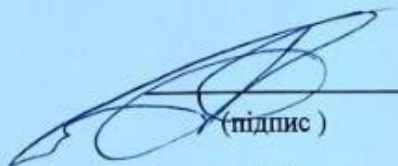
Немировський Я. Б.

(прізвище та ініціали)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН ВИКОНАННЯ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1.	Виконання розділу “Загально-технічний розділ”	22.02.2025	
2.	Виконання розділу “Технологічний”	17.03.2025	
3.	Виконання розділу “Спеціальний розділ”	27.04.2025	
4.	Кінцеве оформлення змісту, висновків, графічної частини бакалаврської роботи	06.05.2025	
5.	Підготовка доповіді, ілюстративного матеріалу та презентації	23.05.2025	
6.	Передзахист кваліфікаційної роботи	30.05.2025	
7.	Подання бакалаврської роботи на кафедру	10.06.2025	
8.	Захист кваліфікаційної роботи в ЕК	згідно графіку захистів	

Студент



(підпис)

Горобей В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Немировський Я. Б.

(прізвище та ініціали)

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
			<u>Документація</u>			
A4			МІ 131.00.1/Б 102/с 034 00-ПЗ	Пояснювальна записка	108	
			<u>Конструкторська документація</u>			
A3			МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Верхня частина корпусу одноступінчастого	1	
			МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Нижня частина корпусу одноступінчастого		
			<u>Технологічна документація</u>			
			МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Маршрутні карти		
			<u>Графічна частина</u>			
				Аналітичний огляд	4	
				Конструкційні рішення	6	
				Аналіз технологічності	1	
				Вибір заготовки	2	
				Маршрут обробки	2	
				Вибір обладнання	1	
				Режими оброблення	1	
				Статичне дослідження	1	
				Топологічне дослідження	1	

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ		
Зм.	Арж.	№ док.ум.	Підп.	Да	Відомість бакалаврської кваліфікаційної роботи		
Розроб.	Горобей						
Перевір.	Немировський						
Н. контр.							
Затверд.	Мельник				Літ.		
					Арк.		
					Аркушів		
					Державний університет «Житомирська політехніка», група ПМ-142		

АНОТАЦІЯ

Горобей В.В. **Конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора**

Бакалаврська кваліфікаційна робота представлена на здобуття ступеня вищої освіти «Бакалавр», галузі знань 131 «Механічна інженерія» спеціальності 131 «Прикладна механіка» (ОПП «Високотехнологічний комп'ютерний інжиніринг») – Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, 2025.

Кваліфікаційна робота містить 110 аркуша формату А4 пояснювальної записки, в тому числі 49 рисунків, 23 таблиць та список літератури з 23 джерела.

На основі літературного опрацювання фахових статей, статей закордонних видань, літературних джерел, інформації з сайтів виробників редукторів в даній кваліфікаційній роботі було проаналізовано службове призначення та технічні вимоги до деталі «Верхня кришка одноступінчастого циліндричного редуктора».

Розроблено збірку одноступінчастого циліндричного редуктора та креслення, а саме: робоче креслення деталі «Верхня кришка редуктора», «Нижня частина корпусу редуктора». При цьому застосовані сучасні підходи до встановлення баз, розмірних та геометричних допусків.

Обґрунтовано вибір матеріалу деталі, проаналізовано її технологічність конструкції деталі, проаналізовано сучасні підходи до виготовлення корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора та розроблено технологічний процес виготовлення даної деталі. Виконано розрахунок допусків заготовки деталі та встановлені припуски на механічну обробку, розроблено технологічну документацію.

Для дослідження подальших напрямків удосконалення конфігурації застосовано один з методів оптимізації розподілу матеріалу в заданому об'ємі – топологічну оптимізацію, яка реалізована в SolidWorks Simulation.

Ключові слова: виготовлення, одноступінчатий циліндричний редуктор, HAAS VF-4, припуски на обробку, шпонкові з'єднання, топологічна оптимізація

ANNOTATION

Horobei V. V. **Design and Technological Support for Manufacturing the Housing of a Single-Stage Cylindrical Reducer – Manuscript.**

The bachelor's qualification work is submitted for obtaining the degree of Bachelor in the field of knowledge 131 "Mechanical Engineering," specialization 131 "Applied Mechanics" (Educational and Professional Program "High-Tech Computer Engineering") – State University "Zhytomyr Polytechnic," Zhytomyr, 2025.

The qualification work consists of an explanatory note of 110 A4 pages, including 49 figures, 23 tables, and a reference list with 23 sources.

Based on the review of professional literature, foreign publications, technical sources, and information from gearbox manufacturers' websites, this qualification project analyzes the functional purpose and technical requirements for the "Upper Cover of a Single-Stage Cylindrical Gearbox."

A complete assembly of the single-stage cylindrical gearbox has been developed, including working drawings of the "Upper Cover" and the "Lower Housing Part." Modern approaches to datum specification, dimensional and geometrical tolerancing have been applied.

The material selection for the part has been justified, and the manufacturability of the part's design was assessed. Contemporary methods for producing the housing of a single-stage cylindrical gearbox were reviewed, and a technological process for manufacturing the part was developed. Tolerance calculations for the raw part were performed, machining allowances were defined, and accompanying process documentation was created.

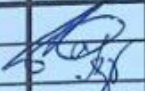
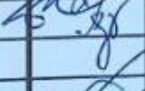
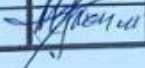
To explore potential improvements in the part's configuration, a method of material distribution optimization—topology optimization—was employed, as implemented in SolidWorks Simulation.

Keywords: manufacturing, single-stage cylindrical gearbox, HAAS VF-4, machining allowances, key joints, topology optimization

Зміст

Вступ	10
1. ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	12
1.1. Аналітичний огляд будови, функціоналу та технологічності елементів редукторів.	12
1.1.1. Шпонкові з'єднання в редукторах.....	17
1.2. Редукторобудування в Україні	23
1.3. Редукторобудування в світі.....	26
1.5. Розробка 3D-моделі корпусу редуктора	29
1.4.1. Схема базування та встановлення розмірних та геометричних допусків.....	38
Висновки до загально-технічного розділу.....	45
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	47
2.1 Аналіз технологічності конструкції корпусу редуктора.....	47
2. 2 Визначення програми випуску деталей та типу виробництва.....	49
2.3 Вибір матеріалу та способу виготовлення заготовки.....	50
2.4 Розробка технологічного процесу виготовлення корпусу	52
2.4.1. Розробка технологічного маршруту виготовлення деталі	52
2.4.2 Розрахунок загальних та міжопераційних припусків на обробку деталі ...	56
2.4.3 Розробка та обґрунтування операцій технологічного процесу	62
2.4.4 Вибір технологічного обладнання.....	62
2.4.5 Розрахунок режимів різання	69
Висновки до розділу 2.	78
3. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ.....	80
3.1 Аналітичний огляд сучасних технологій щодо пошуку інженерних рішень в конструкціях корпусів	80
3.2. Топологічна оптимізація	83

МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Горобей В.В.			Пояснювальна записка	Літ.	Арк.
Перевір.		Немировський					7
Реценз.						Група ПМ-142	
Н. Контр.							
Затверд.		Мельник О.Л.					

3.3. Генеративний дизайн	84
3.4. Статичне дослідження корпусу редуктора	84
3.5 Визначення виду дослідження	89
3.7. Виконання топологічної оптимізації корпусу редуктора	89
3.7.1. Статичне дослідження деталі	89
3.7.2. Опис моделі та умов дослідження	92
3.7.3. Процес виконання	93
3.7.4. Результати	95
Висновки до розділу 3	98
ВИСНОВОК ДО БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ	100
Список використаних джерел	102
ДОДАТКИ	105

Вступ

Сучасне машинобудування стикається з низкою складних завдань та проблем, що потребують вирішення для розвитку та вдосконалення в майбутньому. Серед них можна виокремити наступні: зростання вимог до точності та продуктивності, створення зелених технологій (економія енергії та матеріалів), застосування нових матеріалів (як оброблюваних, так і оброблюючих), автоматизація виробництва та підготовка висококваліфікованих кадрів.

Одним із ключових напрямів машинобудування є редукторобудування, оскільки редуктори широко застосовуються у всіх галузях техніки — від сільськогосподарської до авіаційної. Ефективність, надійність і довговічність роботи різноманітних механізмів у значній мірі залежать від якісного виготовлення та експлуатаційних характеристик редукторів. Особливо важливою частиною таких передач є корпус, який забезпечує точне взаємне розташування валів, захист внутрішніх елементів, жорсткість конструкції та відведення тепла.

У зв'язку з цим конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора є актуальним завданням, що потребує раціонального підходу до вибору заготовки, розробки технологічного маршруту, вибору обладнання, оснащення та режимів обробки. Від якості проектування та виготовлення корпусу залежить не лише точність роботи всієї передачі, а й її експлуатаційна надійність, ремонтпридатність та вартість.

Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є конструкторсько-технологічне забезпечення виготовлення корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора з урахуванням сучасних вимог до точності, технологічності та автоматизації виробництва.

Для досягнення мети сформовані **наступні задачі роботи**:

- виконати аналітичний огляд конструктивних рішень елементів редукторів загального машинобудування та вивчити досвід виробників редукторів;
- розробити 3D-модель редуктора із застосуванням технології визначення на основі моделі (MBD);

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- розробити технологічний процес виготовлення корпусу;
- виконати пошук рішень в напрямку подальшого розвитку конструкцій корпусів редукторів

Об'єктом даної роботи є конструкція та технологія виготовлення верхньої частини корпусу циліндричного редуктора.

Предметом даної роботи є підходи та методи до проектування та виготовлення верхньої частини корпусу циліндричного редуктора з урахуванням вимог сучасного виробництва.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1. ЗАГАЛЬНОТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Аналітичний огляд будови, функціоналу та технологічності елементів редукторів.

Більшість промислових механізмів, що працюють від електричного двигуна, потребують встановлення редукторів. Ці пристрої (редуктори), які є передавальною ланкою між електродвигуном і механізмом, збільшують крутний момент шляхом зниження кількості обертів.

Циліндричні редуктори – один з найпоширеніших типів передавальних механізмів. Завдяки відмінним експлуатаційним характеристикам, тривалому терміну служби і простоті експлуатації пристрої широко використовуються в різних промислових галузях.

Конструкція циліндричних редукторів.

Свою назву цей тип редуктора отримав завдяки циліндричній формі зубчастих коліс, з яких складена передача. Передавальні колеса розташовані всередині корпусу пристрою в два або більше рядів, при тому є мінімум одне циліндричне зачеплення. Обертання передається від одного вала до іншого, тільки якщо вони співвісні або паралельні один одному.

Циліндричне зачеплення здатне обертатися в обидві сторони. При необхідності ведений вал з колесом можна зробити привідним і підключити до двигуна (але таким це вже буде мультиплікатор, а не редуктор). Конструкція будь-якого циліндричного редуктора обов'язково включає такі складові:

- ведучий і ведений вали;
- шестерні;
- колеса;
- підшипники;
- корпус;
- кришки;
- систему змащення.

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

В одноступінчастому редукторі (див. приклад на рис.1.1.) в зачепленні знаходиться всього одна пара, що складається з шестерні і колеса. При збільшенні кількості ступенів збільшується і кількість деталей.

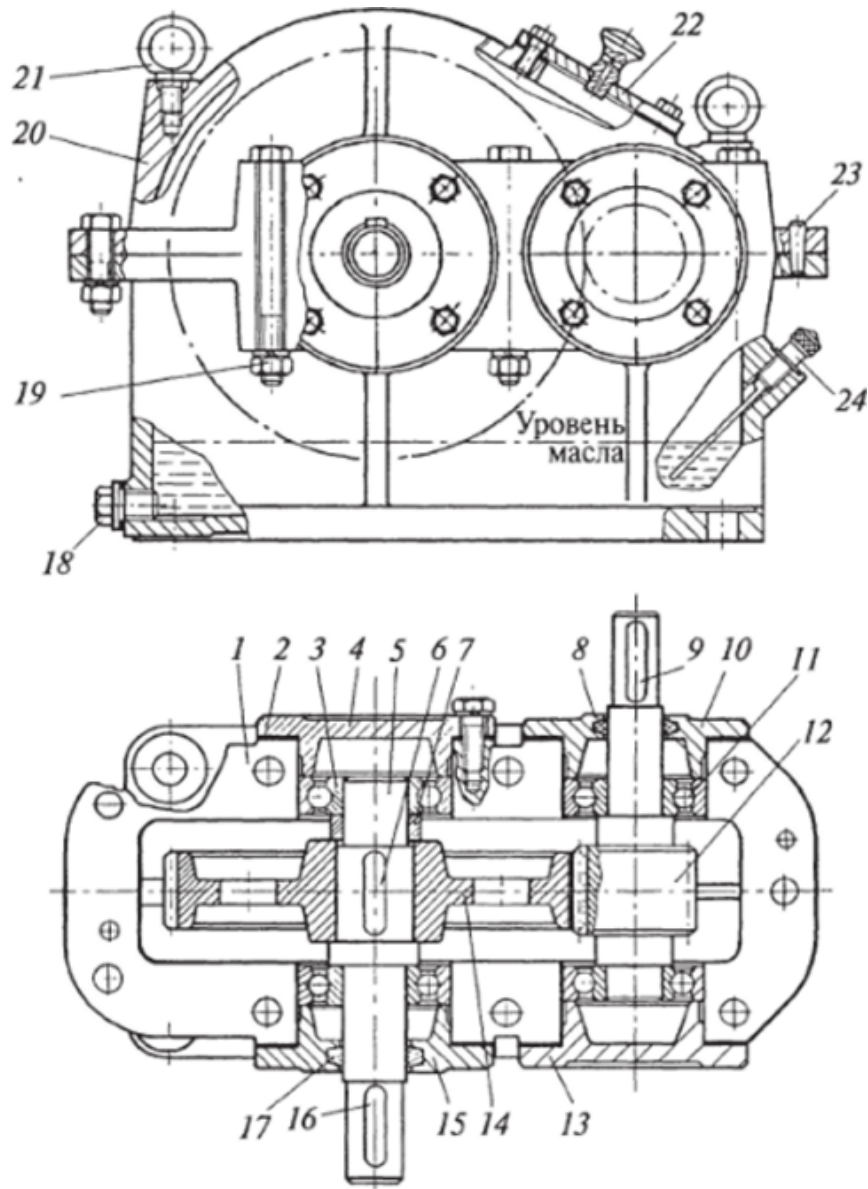


Рис. 1.1. Конструкція одноступінчастого редуктора [1.1]

Конструкція одноступінчастого редуктора з циліндричними колесами з отворами для кріплення редуктора на рамі. Середина корпусу служить масляною ванною, а для зливу масла передбачена пробка 18 з ущільненням. Для контролю рівня масла є щуп (стрижень) 24. Кришка корпусу 20 з'єднується з корпусом за опрацьованим поверхням болтами 19 з гайками та шайбами. Для правильності взаємної установки кришки і корпусу при обробці гнізд під опори валів

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

використовуються штифти 23. Для підйому редуктора служать римболти з петлями 21.

У верхній частині кришки передбачено оглядове вікно, що закривається пластиною 22. У ручці пластини є свердління для з'єднання нутрощі редуктора з атмосферою. Це так званий сапун (віддушини) для вирівнювання тиску при нагріванні і охолодженні редуктора [1].

Обидва вала редуктора встановлюються на шарикопідшипниках в розточеннях-гніздах корпусу і кришки. Ведучий вал 12 виконаний заодно з ведучою шестірнею і спирається на два шарикопідшипники 11. Зовнішній кінець вала має шпонку 9. Цей кінець вала ущільнений в кришці 10 сальником 8. Кришка 10, як і з протилежного боку кришка 13, підпирають зовнішні обойми підшипників, встановлених «в розпір». Для регулювання ступеня «підтискання» підшипників під фланцями кришок (10 і 13) передбачаються тонкі металеві прокладки відповідних товщини 2. Ведений вал 5 встановлений аналогічно ведучому на великих шарикопідшипниках 3, змонтованих також «в розпір», між кришками 4 і 15. Через кришку 15 вал виходить назовні. Він ущільнений сальником 17, а на кінці вала є шпонка 16. Усередині редуктора на ступиці вала посаджено колесо 14, а для передачі крутного моменту служить шпонка 6. Маточина колеса упирається у виступ вала, а з боку підшипника підперта втулкою 7.

При роботі редуктора крутний момент передається від провідної шестерні (вала) до колеса і відомому валу. Судячи з розмірів коліс, передавальне число і $\sim 3,46$. Колеса редуктора можуть бути як з прямими зубами, так і з косими. Розміри редуктора, діаметри коліс, міжосьова відстань і ширини коліс можуть бути різними в залежності від переданої навантаження. Ширина шестерні зроблена трохи більше, ніж колеса (розрахункової ширини) для забезпечення осьової «виставки» зачеплення.

Змащування зчеплення коліс і підшипників забезпечується розбризкуванням масла (і масляним туманом) внаслідок занурення в масляну ванну веденого колеса

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

редуктора. Охолодження редуктора забезпечується відведенням тепла через стінки корпусних деталей і лапи кріплення.

Конструкція трьохступінчастого циліндричного редуктора наведена на рис.1.2 [2].

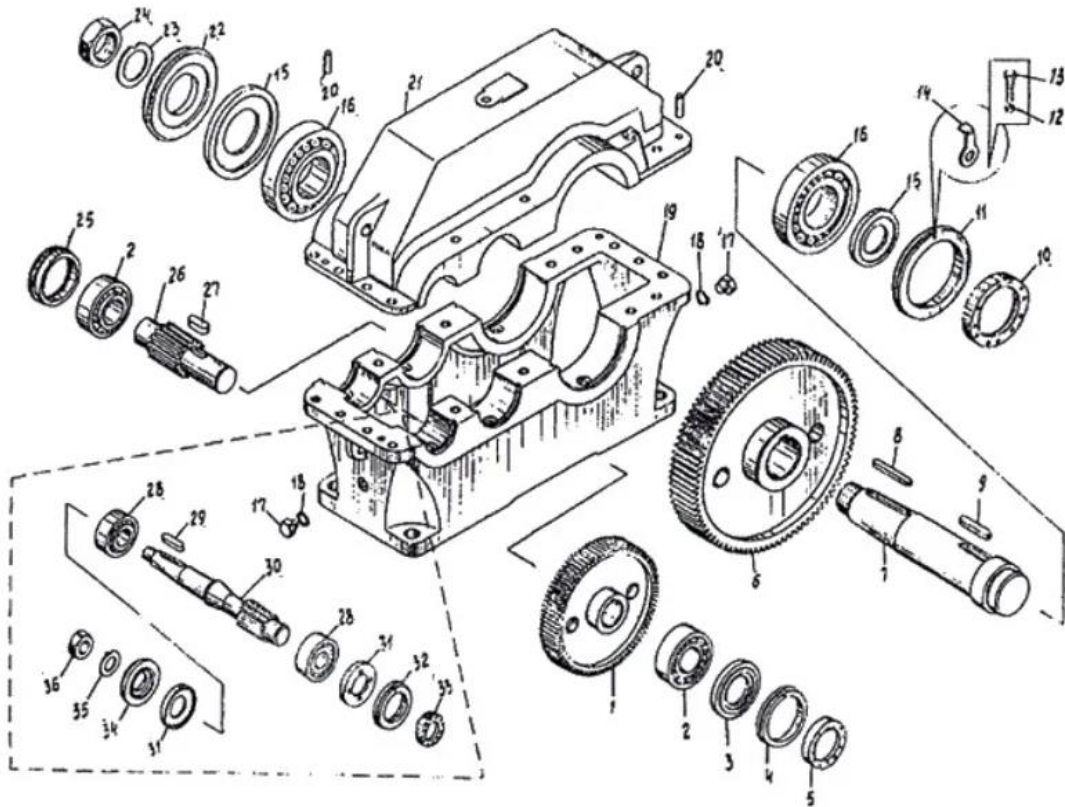


Рис. 1.2 Конструкція двухступінчастого редуктора [1,2].

Опис озицій з рис.2.1. відображено в таблиці 1.1.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Будова трьохступінчастого циліндричного редуктора з рис.1.2 [2]

	Найменування	№	Найменування	№	Найменування
1	Зубчате колесо	13	Болт	25	Кришка
2	Підшипник	14	Замок	26	Вал-шестерня
3	Натискна шайба	15	Натискна шайба	27	Шпонка
4	Кришка	16	Підшипник	28	Підшипник
5	Регулювальний винт	17	Пробка	29	Шпонка
6	Зубчате колесо	18	Прокладка	30	Вал-шестерня
7	Тихохідний вал	19	Корпус	31	Натискна шайба
8	Шпонка	20	Штифт	32	Кришка
9	Шпонка	21	Кришка	33	Регулювальний винт
10	Регулювальний винт	22	Кришка	34	Кришка
11	Кришка	23	Шайба	35	Шайба
12	Шайба	24	Гайка	36	Гайка

Джерело: побудовано то узагальнено автором з даних [1,2].

За конструкцією найпростішими є одноступінчасті редуктори, які складаються з однієї зубчастої пари і двох валів. Одноступінчасті циліндричні редуктори мають паралельні вали, які можуть бути розміщені в горизонтальній або вертикальній площинах. Передаточне число одноступінчастих циліндричних редукторів $i \leq 8$, а зубчасті колеса можуть бути прямо- і косозубими або

Циліндричні одноступінчасті горизонтальні редуктори типу ЦУ реалізують передаточні числа в межах 2,0...6,3 при обертальних моментах на тихохідному валу 250...4000 Н·м. Під час експлуатації редуктори типу ЦУ допускають короточасні перевантаження при пусках і зупинках, які в 2,2 рази перевищують номінальні при умові, що число циклів появи перевантажень не перевищує 105 протягом усього строку служби редуктора. Під час роботи редукторів у реверсивному режимі номінальні обертальні моменти на тихохідному валу треба зменшувати на 30%.

Шпонка – це деталь, яку вставляють у пази вала втулки з метою утворення з'єднання, здатного передавати обертовий момент від вала до втулки або від втулки до вала. На рис. 1.4 зображені деталі шпонкового з'єднання: 1- шпонка, 2 – вал, 3 – втулка.

					<i>МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

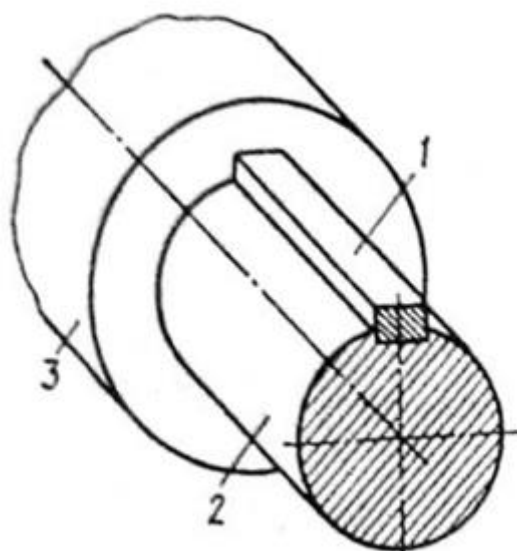


Рис 1.4. Шпонкове з'єднання [3]

Недоліки: послаблення вала та маточини шпонковими пазами. Переваги: простота, надійність, низька вартість, зручність складання. Розрізняють напружені і ненапружені шпонкові з'єднання. Не напружені шпонкові з'єднання здійснюють за допомогою призматичних та сегментних шпонок.

Призматичні шпонки за призначенням бувають звичайні (див. рис. 1.5, а) та напрямні (див. рис. 1.5, б). Звичайні призматичні шпонки (ISO 8062-1:2007) призначені для нерухомого з'єднання маточини (втулки) з валом. Вони бувають із скругленими або плоскими торцями. Напрямні шпонки (ISO 4014) застосовують у тих випадках, коли деталі, розміщені на валах, можуть рухатись вздовж валів. Напрямну шпонку прикручують до вала гвинтами.

Напрямні шпонки застосовуються у тих випадках, коли деталі, розміщені на валах можуть рухатись вздовж валів. Ненапружені шпонкові з'єднання здійснюються за допомогою призматичних та сегментних шпонок. Згідно із стандартом ширину призматичної шпонки b і висоту h вибирають залежно від діаметра вала. Стандарт також регламентує глибину паза на валу (t і у втулці $2t$). Довжину шпонки l вибирають за шириною деталі, розміщеної на валу, перевіряють розрахунком на міцність і також узгоджують зі стандартом. Робочими гранями призматичних шпонок є їхні бічні грані, які контактують з бічними гранями пазів. Робоча довжина призматичної шпонки зі скругленими торцями $l_0 = l - b$, а для

шпонки з плоскими торцями $l = 10$ (див. рис. 1.5, а). Ширину призматичної шпонки та ширину паза в маточині виконують з полем допуску відповідно р6 та Н7. Ширина паза вала має поле допуску JS6. З'єднання за допомогою сегментної шпонки показано на рис. 1.6.

Глибока посадка шпонки на валу забезпечує їй більш стійке положення, ніж призматичної шпонки. Це запобігає перекошуванню шпонок під навантаженням. Однак глибокий паз значно послаблює вал, тому сегментні шпонки використовують головним чином для з'єднання деталей на малонавантажених ділянках валів, наприклад, на кінцях валів. З'єднання сегментними шпонками є технологічним, оскільки виготовлення як шпонок, так і пазів на валах досить просте. Сегментні шпонки стандартизовані згідно ДСТУ ГОСТ 24071:2002.[3]

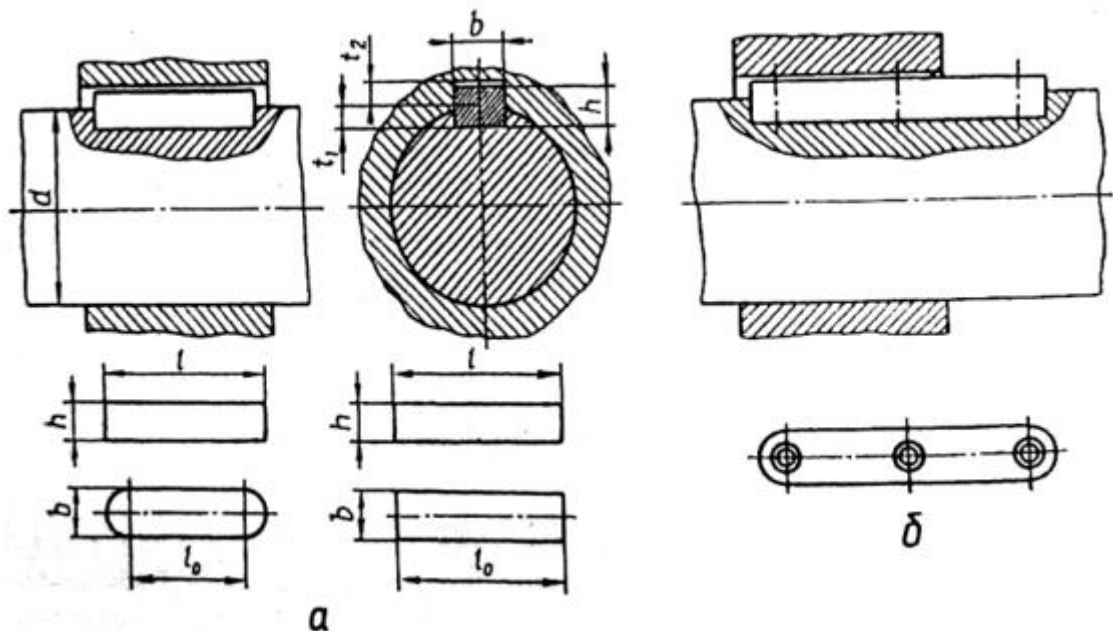


Рис. 1.5. Призматичні шпонки [3]

Напружені шпонкові з'єднання

Здійснюються за допомогою клинових та циліндричних шпонок (див. рис. 1.7). Клинові шпонки (ДСТУ ГОСТ 24068:2003) за способом розміщення на валах бувають врізні (рис. 1.7), на лисці (рис. 1.7, а), фрикційні (рис. 1.7, б) і тангенційні (рис. 1.7, в). Всі клинові шпонки виготовляють з ухилом 1:100. мають обмежене застосування, оскільки вони спричиняють зміщення осі маточини відносно осі

вала. Якщо перекося деталі, розміщеної на валу не допускається, наприклад для зубчастих коліс, то клинові шпонки не застосовуються.[3]

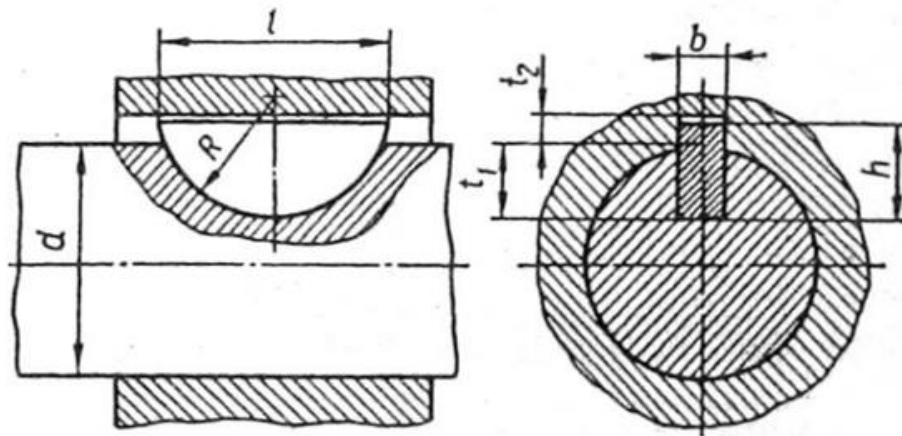


Рис 1.6. Сегментні шпонки [3]

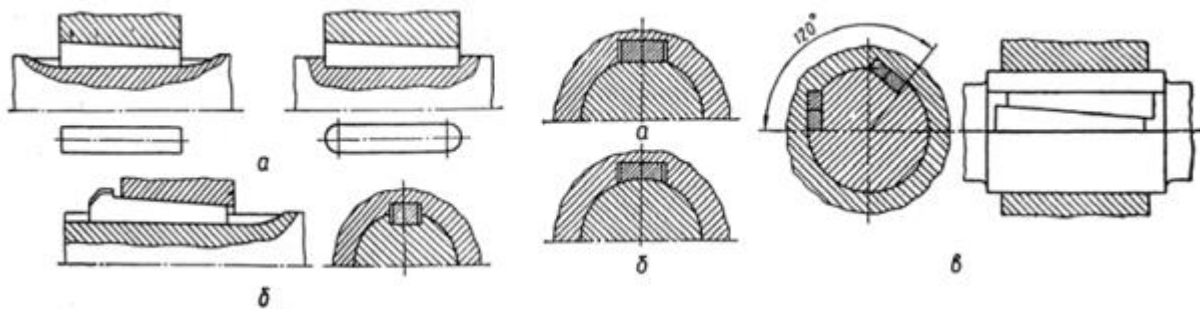


Рис 1.7. Клинові шпонки [3]

Циліндричні шпонки – це циліндричні штифти, що вставляються в отвори, паралельні осі з'єднання, по посадках з натягом (H7/r6). Застосовуються для закріплення деталей на кінці вала. Отвір під шпонку свердлять та обробляють розверткою після посадки деталі на вал.

Розрахунок ненапружених шпонкових з'єднань

Обертовий момент передається завдяки взаємодії бічних вузьких граней шпонки з бічними стінками пазів на валу та в маточині (рис. 1.8). Навантажені поверхні зминаються і при незначних мікропереміщеннях спрацьовуються. Основний розрахунок – розрахунок на зминання.

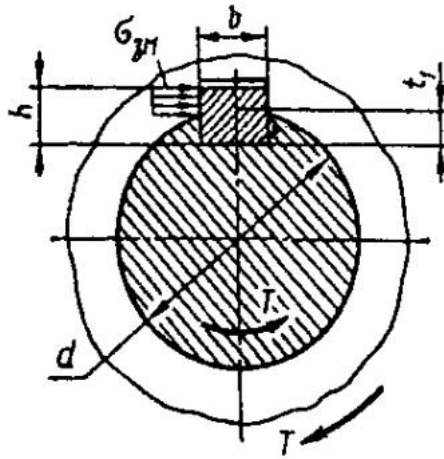


Рис 1.8. Обертовий момент шпонки [3]

Величина напруження зминання визначається згідно залежністю [3]:

$$\sigma_{зм} = \frac{F}{A_{зм}} \quad (1.1.)$$

Де $F = \frac{2T}{d}$ – сила, що діє на навантажені поверхні;

$A = (h - t_1)l_0$ – площа зминання;

l_0 – робоча довжина призматичної шпонки;

h – ширина шпонки;

t_1 – глибина шпонкового паза

Тоді критерій міцності на зминання можна записати в наступному вигляді

$$\sigma_{зм} = \frac{2T}{dl_0(h-t_1)} \leq [\sigma_{зм}] \quad (1.2)$$

Або, необхідна робоча довжина призматичної шпонки може бути вирахована:

$$l_0 = \frac{2T}{d(h-t_1)[\sigma_{зм}]} \quad [3]$$

Призматичні шпонки

Найбільш розповсюдженні призматичні шпонки, які встановлюються в пазі вала по посадкам з натягом Р9/н9 (врізні шпонки). Шпонки входять в паз маточини так, що між верхньою гранню шпонки і дном паза залишають зазор (див. рис. 1,9).

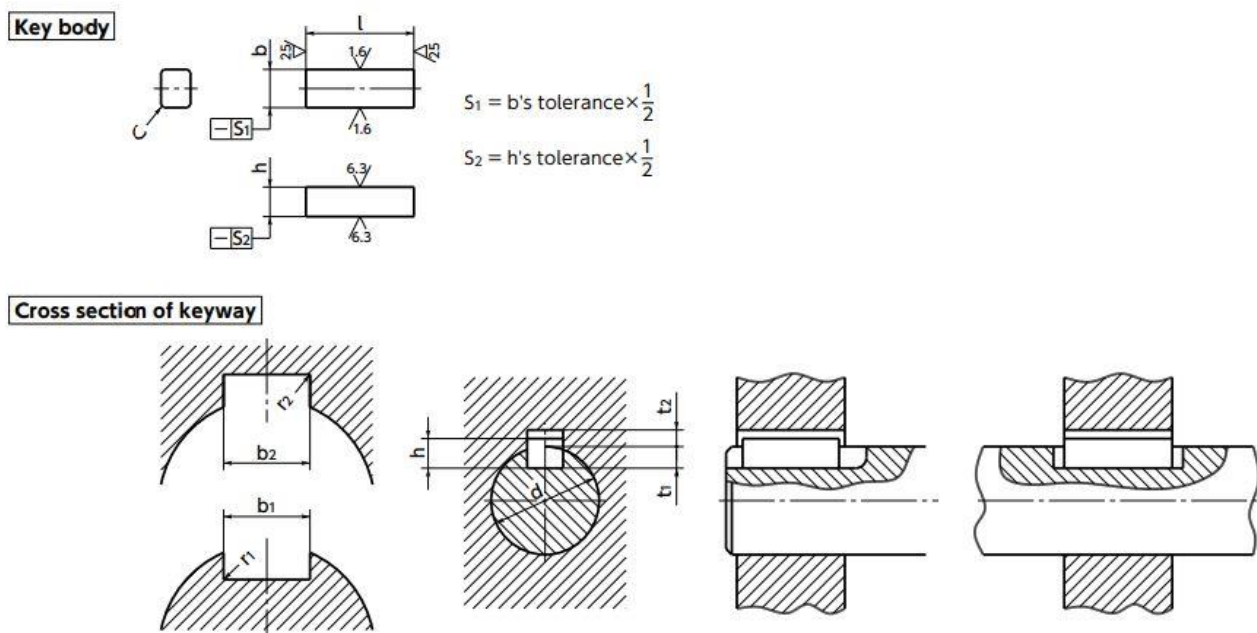


Рис 1.9. Форма і розміри призматичної шпонки та шпонкового паза [3.1]

Рекомендуються наступні посадки по бокових гранях паза маточини: з зазором (H9/h9) — для центрувальних з'єднань; D9/h9 — для рухомих з'єднань; перехідні та з натягом: J9/h9, N9/h9, P9/h9 — для з'єднань з циклічним навантаженням. Маточини зазвичай насаджують на вал за посадкою H7/h6. У з'єднаннях, що піддаються циклічним навантаженням, перевагу надають посадкам: H7/j6; H7/k6, H7/m6, H7/n6, H7/p6.

Дія крутного моменту на з'єднання викликає напруження зсуву в тілі шпонки і напруження зминання на бокових поверхнях шпонки [3].

Визначальним фактором, що впливає на міцність і стійкість шпоночного з'єднання, є згинаючий момент $M_{згин}$, який спрямований на вивертання шпонки з паза вала.

Посилення міцності шпоночного з'єднання

З метою підвищення міцності з'єднання доцільно:

- застосовувати посадку P9/h9 на валі;
- збільшувати глибину встановлення шпонки у паз вала (див. рис. б);
- у випадку, коли ширина шпонки перевищує 10 мм, здійснюється її додаткова фіксація гвинтами:

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

- з прорізною головкою, або з внутрішнім шестигранником.

Підвищення втомної міцності вала

Для зменшення концентрації напружень у зоні ослаблення шпоночним пазом застосовується обточування шпонки по контуру (вид. г, д), що сприяє підвищенню втомної міцності вала [3].

1.2. Редукторобудування в Україні

Редукторобудування — це важлива галузь машинобудування, яка спеціалізується на проєктуванні та виробництві редукторів. В умовах індустріалізації, автоматизації виробництва та розвитку агропромислового комплексу редуктори відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності обладнання. В Україні сформувався цілий ряд підприємств, які активно розвивають цю галузь, впроваджують нові технології та розширюють експортний потенціал. В даному підрозділі кваліфікаційної роботи виконано аналітичне дослідження продукції кількох українських редукторобудівних підприємств.

ТОВ "Завод Базальт" - українська компанія, що спеціалізується на виробництві загальнопромислових редукторів, а також деталей для різних галузей промисловості. Крім виробництва, вони також займаються ремонтом редукторів вітчизняного та зарубіжного виробництва [5].

Завод "Укрмотор" виробляє та пропонує мотор-редуктори з крутним моментом від 50 до 9000 Н*м та частотою обертання від 3,55 до 280 об/хв. Також у них є великий вибір запчастин до різних моделей редукторів та послуги з ремонту, заміни та обслуговування [6].

Слобожанський завод виробляє черв'ячні редуктори, зокрема модель РЧП-120. Цей редуктор має чавунний корпус та черв'ячну передачу. Основні характеристики РЧП-120: постійне або змінне навантаження, допустимий реверс, тривалий або частий режим роботи, вхідна швидкість до 1500 об/хв,

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

запиленість приміщення до 10 мг/куб.м. Типорозмір редуктора визначається відстанню між осями робочих органів, яка для РЧП-120 становить 120 мм. Схема розташування черв'ячної пари - черв'як під колесом [7].

Більш детальніше розглянемо підприємство “GSM Україна”. Компанія GSM Україна, зарекомендувала себе як надійний виробник редукторів різних типів і модифікацій. У даному розділі буде здійснено комплексний аналіз діяльності цього виробника, зокрема: технічні характеристики його продукції, особливості виробництва, напрями інноваційного розвитку та сфери застосування редукторів GSM у промисловості. Розгляд зазначених аспектів дозволить сформувати цілісне уявлення про місце та роль компанії GSM Україна на сучасному ринку редукторобудування [8].

Розглянемо декілька прикладів редукторів:

Конусно-циліндричні редуктори серії RXO-800, RXV-800

Серія універсальних конічно-циліндричних редукторів RXO-V-800 (див. рис. 1.17) представляє собою нове покоління приводної техніки, яке відповідає найвищим вимогам сучасного промислового виробництва. Завдяки оптимальному поєднанню габаритних параметрів, передавального моменту та конструктивної надійності, ці редуктори демонструють високу ефективність при експлуатації у складних умовах [8].



Рис. 1.17 Конічно-циліндричний редуктори серії RXO-800 [8]

					<i>MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Редуктори цієї серії забезпечують передавальне відношення в межах від 4,39 до 4839, при цьому вихідний крутний момент може досягати від 1100 до 692 000 Нм. Діапазон допустимої потужності становить від 0,12 до 2312 кВт, що дозволяє адаптувати пристрій до широкого спектру технологічних задач.

Корпус виконано у розбірному варіанті з площиною з'єднання, що спрощує монтаж, обслуговування та ремонт. Високий рівень надійності та ефективності робить серію RXO-V-800 оптимальним рішенням для потреб енергетичного сектора, а також середньої і важкої промисловості [8].

Конічно-циліндричні редуктори для екструдерів серій RXO-EST-700, RXV-EST-700, RXO-EST-800, RXV-EST-800 (див. рис. 1.18).



Рис. 1.18. Конічно-циліндричний редуктор для екструдерів серій RXO-EST-700 [8]

Ця серія редукторів призначена для приводів екструдерів і демонструє високі технічні характеристики, що зміцнюють позиції GSM Україна на ринку потужних приводних механізмів.

Завдяки застосуванню опорного важеля та фланцевого з'єднання, ці редуктори забезпечують максимальне забезпечення інтеграції з приводом екструдерів, що веде до зниження витрат на монтаж і обслуговування, а також до підвищення надійності та експлуатаційної стійкості [8].

Корпус виконаний розбірним, з чітко визначеною площиною з'єднання, що спрощує технічне обслуговування та заміну підшипників.

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Конічно-циліндричні редуктори серії RXO-800, RXV-800.

Серія універсальних редукторів RXO-V-800 являє собою новий етап у розвитку приводної техніки, що відповідає сучасним вимогам промисловості. Завдяки ретельно оптимізованим габаритним характеристикам, високій здатності передавати крутний момент та конструктивній надійності, ці редуктори забезпечують стабільну роботу навіть у складних умовах експлуатації [8].

Редуктори RXO-V-800 розроблені з урахуванням потреб енергетичної галузі, а також середнього та важкого промислового виробництва, де ключовими критеріями є ефективність, довговічність і потужність [8].

Сучасна інженерна реалізація серії RXO-V-800 дозволяє ефективно інтегрувати ці редуктори в широкий спектр технологічних процесів, де потрібна висока механічна потужність і надійність у довготривалій роботі[8].

ВИСНОВОК

Редукторобудування в Україні залишається важливою галуззю, що демонструє стійкий розвиток та високий рівень технічної інноваційності. Завдяки модернізації обладнання, широкому асортименту продукції та фаховому підходу до проєктування, українські підприємства успішно конкурують на внутрішньому ринку та мають потенціал для виходу на міжнародну арену. Галузь активно підтримує індустриальні, аграрні та енергетичні підприємства, що підтверджує її стратегічне значення для економіки країни.

1.3. Редукторобудування в світі

У сучасному промисловому світі редуктори відіграють важливу роль як елементи передачі руху в різноманітних галузях: від легкої промисловості до важкої металургії, сільського господарства та енергетики. Попит на якісні редуктори стимулює розвиток високотехнологічних підприємств у всьому світі.

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Даний підрозділ присвячений огляду провідних іноземних заводів з виробництва редукторів, які претендують на лідируючі позиції в даній галузі машинобудування.

СТАН РЕДУКТОРОБУДУВАННЯ У СВІТІ

Глобальний ринок редукторів продовжує зростати завдяки автоматизації, енергоефективності та зростаючому попиту на точне управління механізмами. Великі корпорації з Німеччини, Японії, Італії, США та Китаю займаються не лише виготовленням редукторів, але й розробкою інтелектуальних приводів з цифровим управлінням. Виробники також активно впроваджують принципи сталого розвитку, використовуючи енергоощадні технології та матеріали.

Команія

1. SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG [9]

- Країна: Німеччина
- Центр виробництва: Брухзаль
- Продукція: черв'ячні, планетарні, циліндричні, кутові редуктори, мотор-редуктори
- Особливості: один із лідерів у світі; має заводи в Європі, Азії, США та Бразилії. Відомий якістю, гнучкістю виробництва та автоматизацією.

SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG є німецьким виробником приводної техніки, включаючи редуктори. SEW-EURODRIVE пропонує широкий асортимент редукторів, включаючи циліндричні, конічні, черв'ячні та планетарні, а також мотор-редуктори.

Основні типи редукторів SEW-EURODRIVE:

- циліндричні редуктори;
- конічні редуктори;
- черв'ячні редуктори;
- планетарні редуктори;
- мотор-редуктори.

Інтегровані рішення, що поєднують електродвигун та редуктор, забезпечують компактність та ефективність [9].

Bonfiglioli Riduttori S.p.A.

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

- Країна: Італія
- Центр виробництва: Болонья
- Продукція: Планетарні, черв'ячні, промислові редуктори, приводи
- Особливості: Сильні позиції в агро, будівництві, логістиці; заводи в Індії, Китаї, Німеччині [10].

Bonfiglioli Riduttori S.p.A. - Італійський виробник редукторів, мотор-редукторів та інших приводних систем. Компанія випускає широкий асортимент редукторів, включаючи черв'ячні (серія W, VF), планетарні (серія 300) та циліндричні. Bonfiglioli відома своєю продукцією, що поєднує високу якість, надійність та конкурентоспроможні ціни.

Основні типи редукторів Bonfiglioli:

Черв'ячні редуктори (серії W, VF):

Оптимальне співвідношення ціни та якості, широко застосовуються у вентиляторах, повітрорудках та насосах.

Планетарні редуктори:

Застосовуються в приводах рухомих частин машин та механізмів у різних галузях промисловості.

Циліндричні редуктори:

Призначені для широкого кола промислових застосувань.

Матеріали корпусу: Силумін (серії VF 27, VF 30, VF 44, VF 49, W63, W75, W86) та чавун (серії W110, VF 130, VF 150, VF 185, VF210, VF250) [10].

Flender GmbH (раніше Siemens Mechanical Drives) [11]

- Країна: Німеччина
- Штаб-квартира: Бохум
- Продукція: Великогабаритні індустріальні редуктори, зубчасті передачі, муфти
- Особливості: використовуються в гірничій промисловості, вітроенергетиці, суднобудуванні.

Flender GmbH, яка раніше була частиною Siemens Mechanical Drives, є великим виробником промислових редукторів, включаючи планетарні редуктори.

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Компанія виробляє редуктори різних типів та розмірів, що використовуються у різних галузях промисловості, таких як гірничодобувна, деревообробна, машинобудування та сільське господарство. Вони також виробляють редуктори для вітряних турбін та інших спеціалізованих рішень [11].

Sumitomo Drive Technologies [12]

- Країна: Японія
- Виробничі бази: Японія, Китай, США, Німеччина
- Продукція: Черв'ячні, планетарні, циклоїдальні редуктори
- Особливості: Виробник легендарного Cyclo Drive — надміцного редуктора з високою ефективністю.

Sumitomo Drive Technologies - один з найбільших світових виробників редукторів і приводів, що входить до одного з найбільших світових холдингів, Sumitomo Group, заснованого ще далекого 1630 року [12].

ОСОБЛИВОСТІ ІННОВАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ

Іноземні виробники редукторів активно впроваджують:

- Індустрію 4.0 – автоматизоване та взаємозв'язане виробництво
- Енергоощадні технології – зменшення втрат енергії в редукторах
- Модульну архітектуру – легке обслуговування та налаштування під потреби
- Цифрові сервіси – онлайн-діагностика, управління з телефону
- Високоточну обробку деталей – зменшення зносу та шуму

Редукторобудування у світі — це приклад поєднання інженерної точності, інновацій та гнучкого підходу до потреб сучасної промисловості. Провідні іноземні заводи з виготовлення редукторів не лише підтримують високу якість, а й задають тренди цифровізації та автоматизації. Їх досвід і розробки можуть слугувати зразком для українських виробників і навчальних закладів технічного профілю.

1.5. Розробка 3D-моделі корпусу редуктора

Створення 3D збірки та 2D креслення деталі «**Корпус одноступінчастого циліндричного редуктора**» почнемо з визначення основних конструктивно-

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режимних параметрів даного редуктора. За основу був взятий одноступінчастий циліндричний косозубий редуктор з атласу редукторів Цехнович Л.І., Петриченко І.П. “Атлас конструкцій редукторів”. Зазначимо, що потужність на вході становить 60 кВт, кількість обертів швидкохідного вала становить 1500 обертів за хвилину, відповідно за формулою (1.5) розраховуємо крутний момент на швидкохідному валу:

$$T_1 = \frac{9550 * P}{n_1} = \frac{9550 * 60}{1500} = 382 \text{ Нм}$$

З урахуванням обраного придатного відношення яке становить 3,2 розрахуємо крутний момент та кількість обертів на тихохідному валу:

$$T_2 = T_1 * u = 382 * 3.2 = 1222 \text{ Нм}$$

Міжосьову відстань та основні габарити редуктора обрано на основі базової моделі з джерела Цехнович Л.І., Петриченко І.П. “Атлас конструкцій редукторів”

З урахуванням передатного відношення ($u_{ред} = 3.2$), крутного моменту на швидкохідному валу, габаритів редуктора 855x355 мм, кількості зубів шестерні 20 та колеса 64, модулів для шестерні 7,5 і зубчастого колеса 7,5 та міжосьової відстані (315 мм) виконано розроблення 3D моделі верхньої частини корпусу редуктора, а також нижньої частини корпусу редуктора з використанням САПР SolidWorks, як це показано на рис. 1.19 а та б. Зокрема, було використано твердотіле моделювання для формування даних деталей, для виконання отворів під кріпильні елементи використано спеціалізовані команди, як це показано на рис. 1.20.

На рисунку 1,20 (а, б, в) показано деталь «верхня частина корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора». Ця деталь обрана для розробки технологічного процесу її виготовлення, що буде описано в розділі 2.3

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

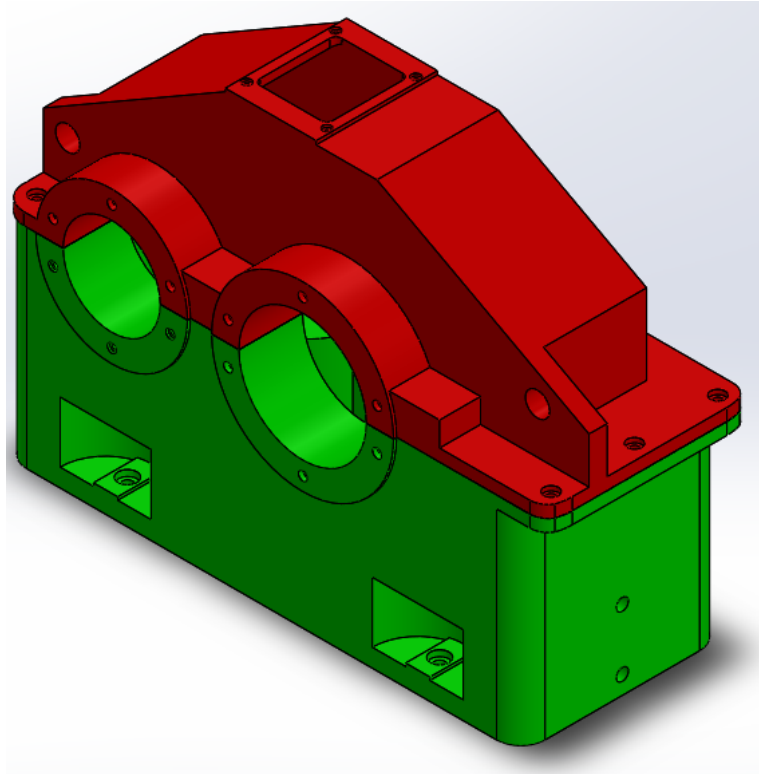


Рис. 1,19. Збірка деталі «корпус одноступінчастого циліндричного редуктора»

Джерело: розроблено автором

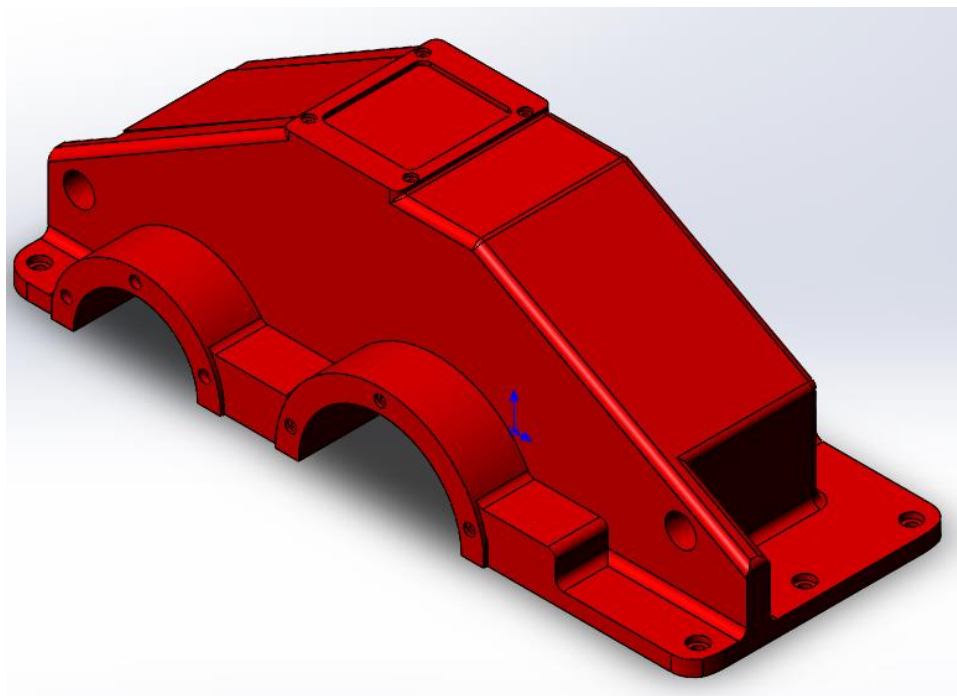


Рис 1,20 (а)

Джерело: розроблено автором

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

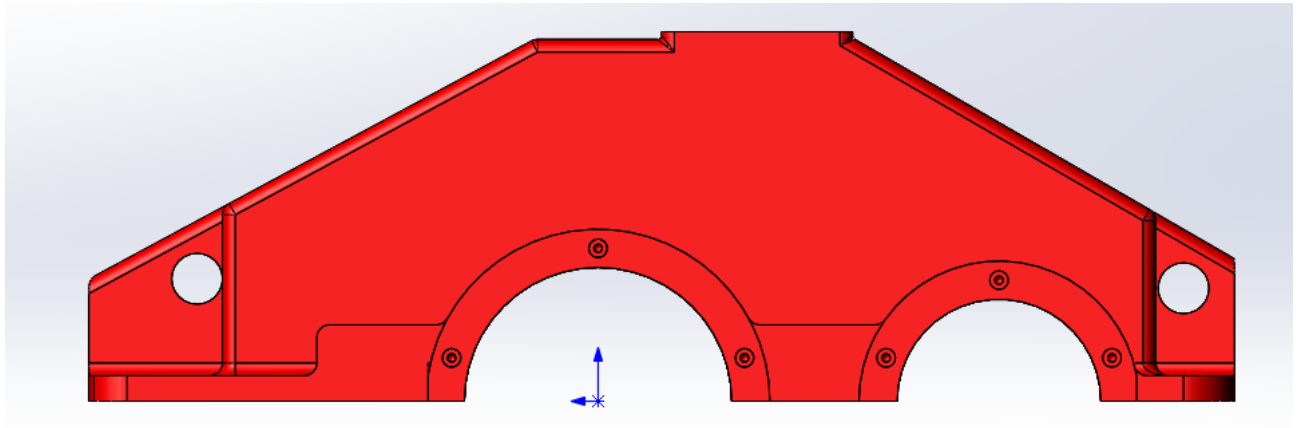


Рис 1,20 (б)

Джерело: розроблено автором

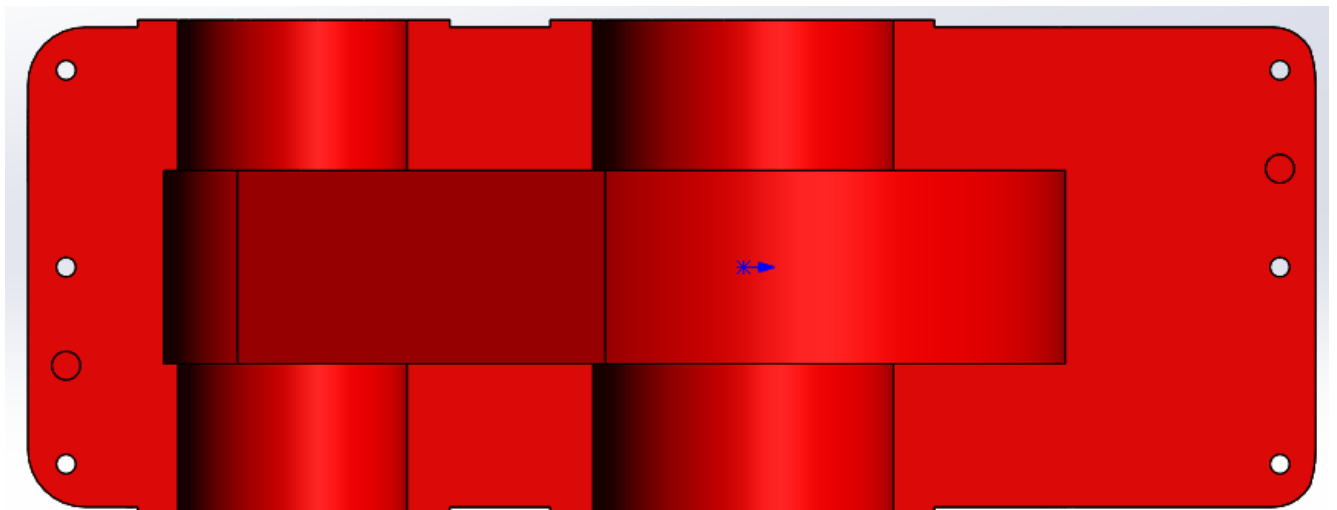


Рис 1,20 (в)

Джерело: розроблено автором

На рисунку 1,21 (а, б, в) показано деталь «верхня частина корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора».

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

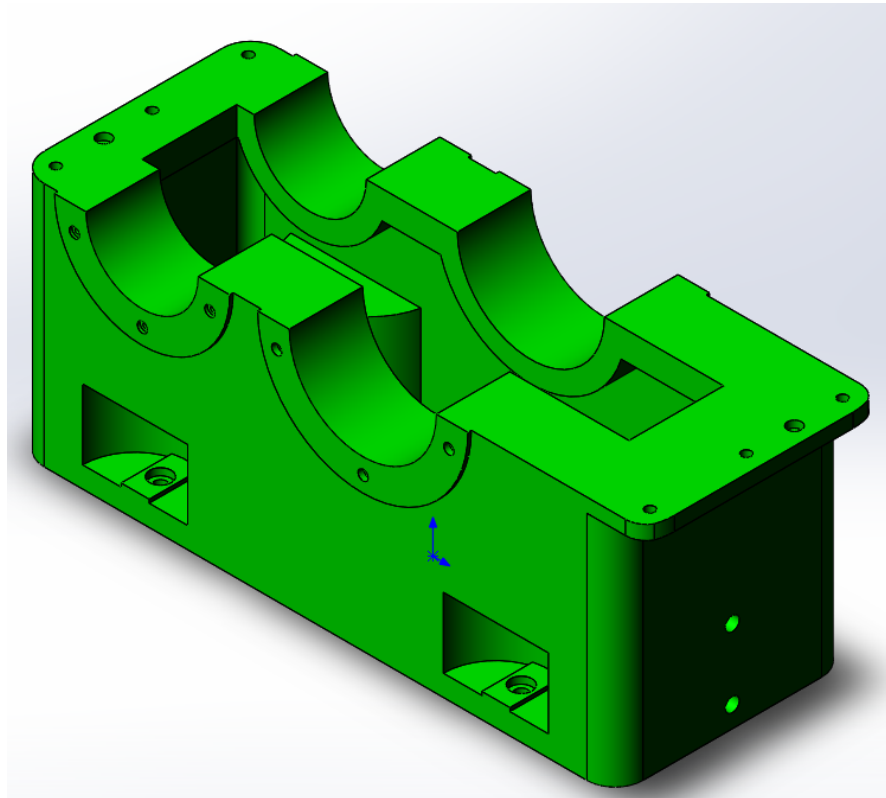


Рис. 1.21. (а) Нижня частина корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора

Джерело: розроблено автором.

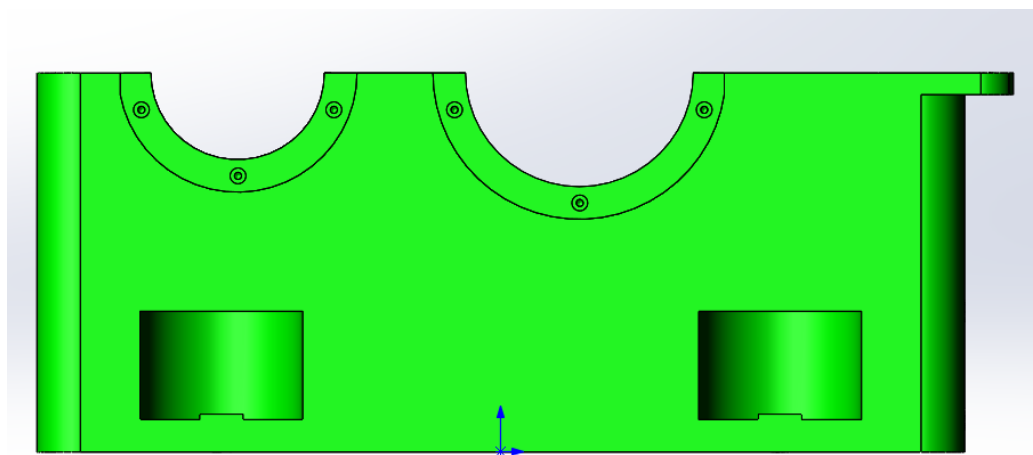


Рис. 1.21 (б)

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

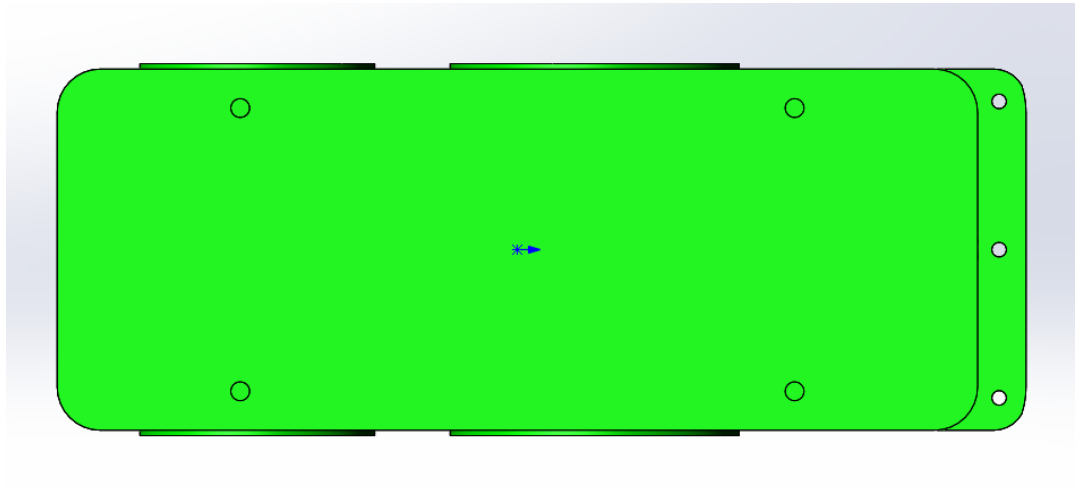


Рис. 1.21 (в)

Джерело: розроблено автором.

На рис. 1.22 показано метод розробки кріпильних отворів за допомогою програмного забезпечення Solidworks.

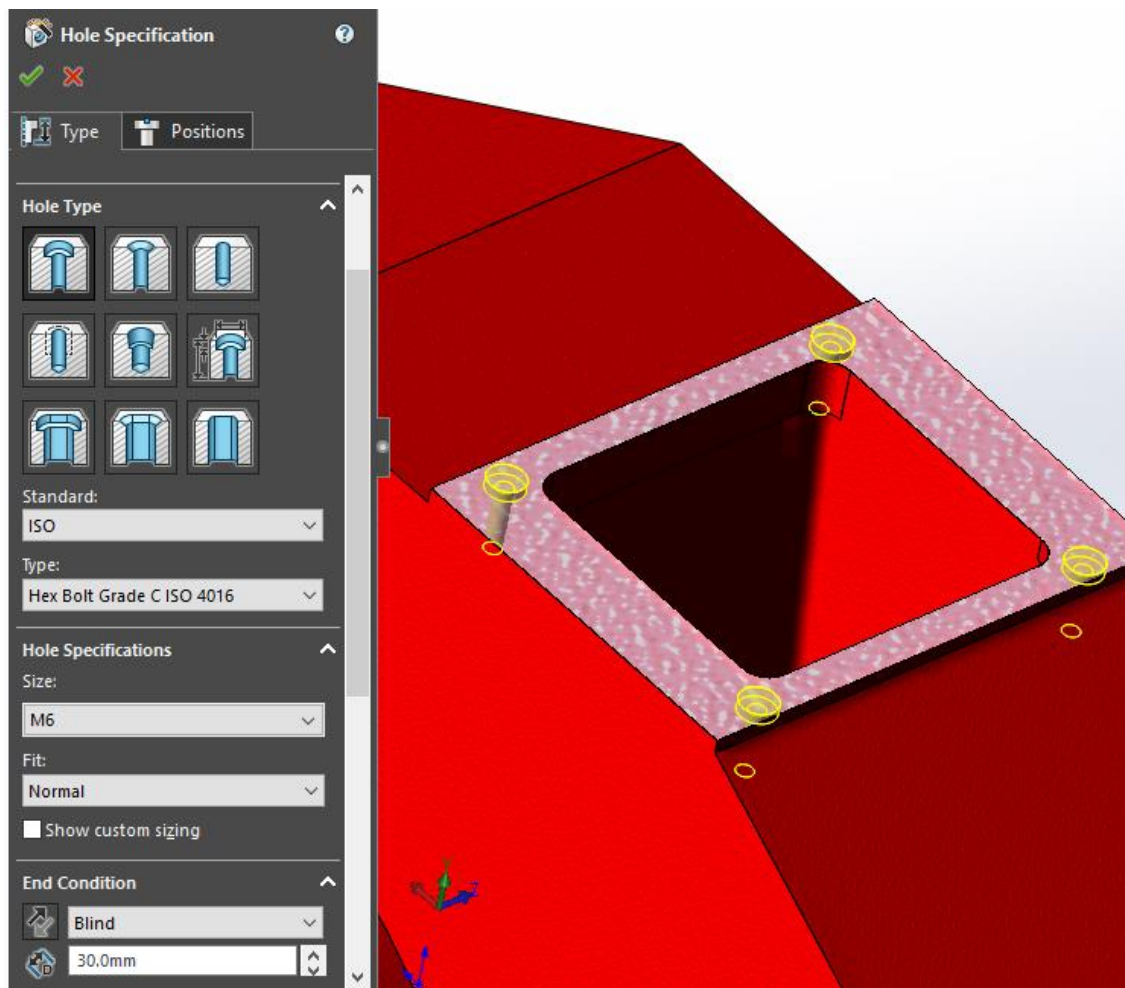


Рис. 1.22. Метод розробки кріпильних отворів

					<i>MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

На рис. 1.23 показано креслення деталі «верхня кришка циліндричного одноступінчастого редуктора».

На рис. 1.24 показано креслення деталі «нижня частина корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора».

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

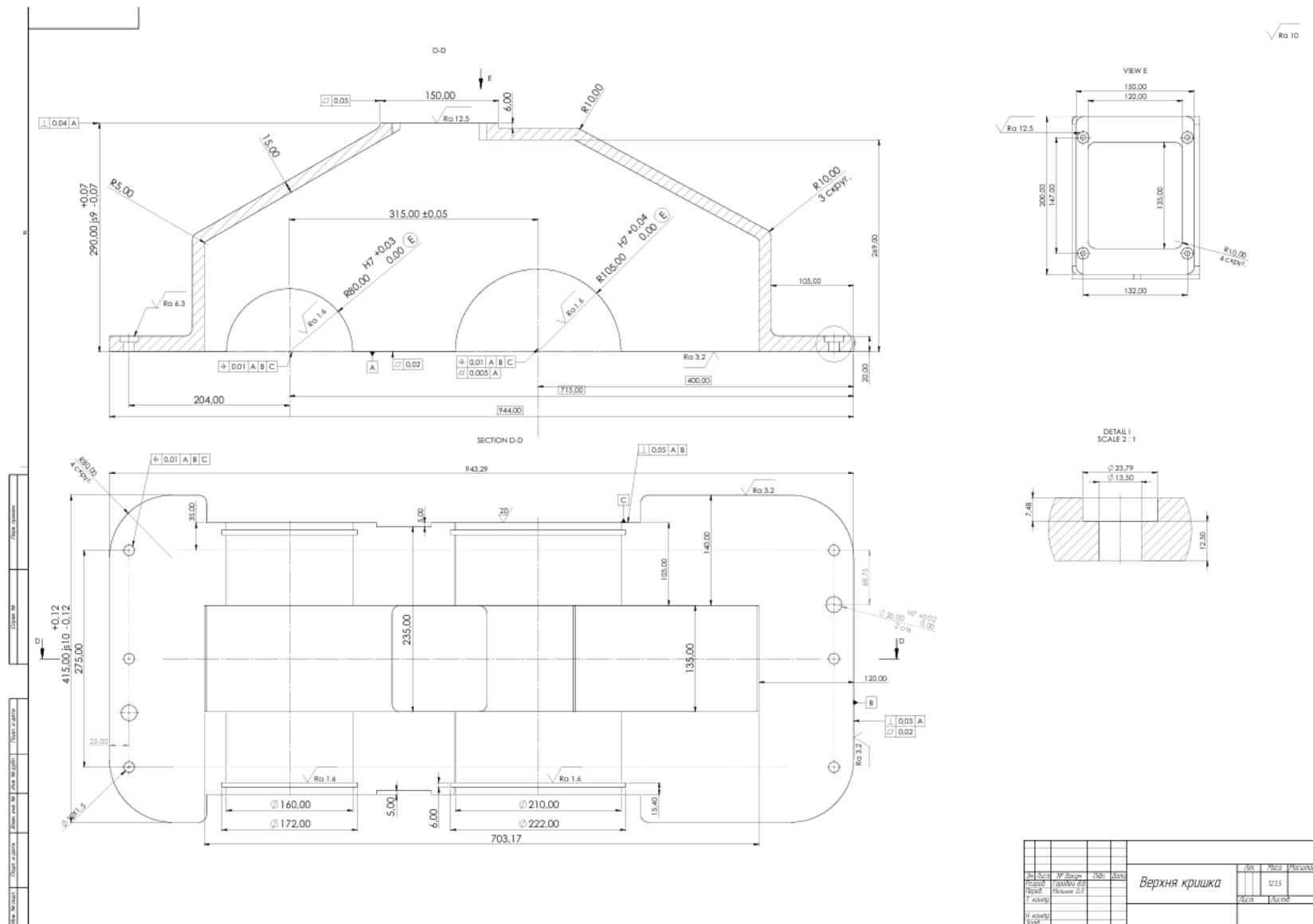


Рис 1.23. Креслення деталі «верхня кришка циліндричного одноступінчастого редуктора»

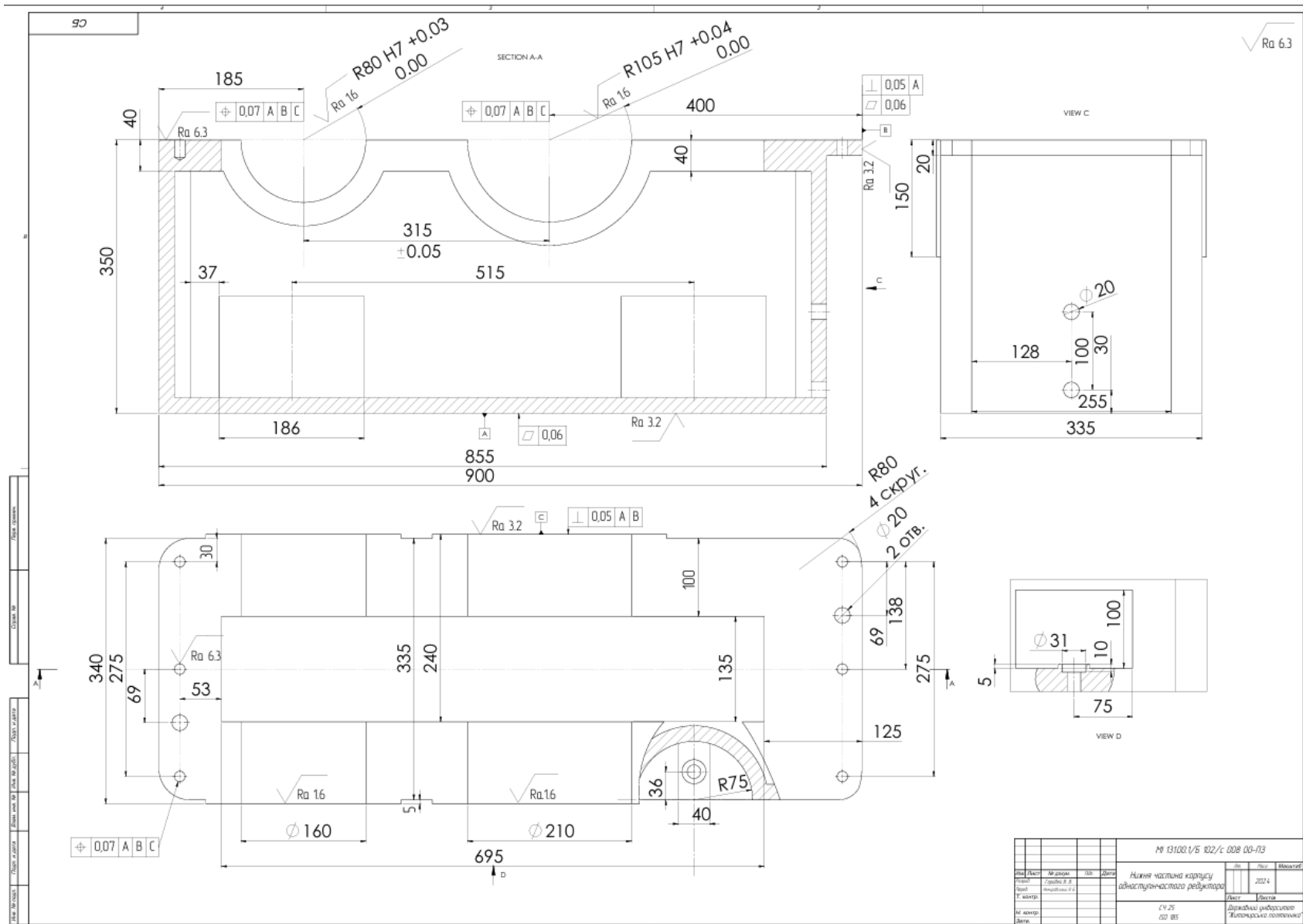


Рис. 1.24. Креслення деталі «нижня частина корпусу циліндричного одноступінчастого редуктора»

1.4.1. Схема базування та встановлення розмірних та геометричних допусків

Згідно ISO 1101, а також згідно ASME Y14.5 принципи встановлення баз є однаковими та полягають у послідовному забиранні або видаленні ступенів свободи деталі до повного її знерухомлення.

Згідно ISO 1101 / ISO 5459 перша база (база А) найчастіше це є поверхня, яка найбільше визначає функції деталі в збірці, вторинна база (В) уточнює орієнтацію, а третинна (С) остаточно фіксує деталь в збірці [14].

Згідно ASME Y14.5 перша база (база А) часто це велика плоска поверхня, що “забирає” найбільше ступенів свободи, тобто, часто це “опора” деталі. Як ми бачимо підходи щодо вибору вторинної та третинної бази також виражаються у термінах фіксування ступенів свободи, водночас вони є подібними до підходів ISO 1101 / ISO 5459 [14].

На основі вищевикладеного прийнято рішення, що базою А в даному випадку буде площина роз'єму верхньої кришки редуктора, як це показано на рис. 1.22

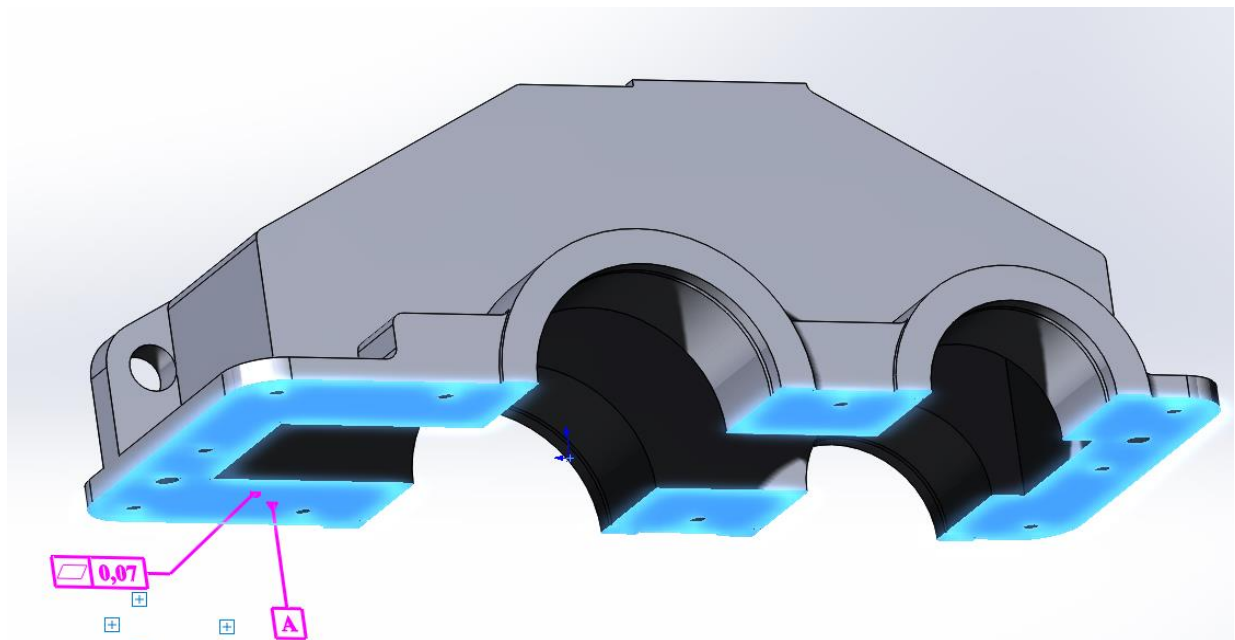


Рис.1.25. База А та геометричний допуск, що застосований до неї

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Згідно ISO 5459 первинна база повинна бути максимально просто для контакту із симулятором бази (наприклад, інструментальною гранітною плитою чи столом координатно-вимірювальної машини). Окрім того вказане значення допуску площинності (в нашому випадку він становить 0,07 мм) повинно забезпечити необхідні характеристики контакту з іншою частиною корпусу редуктора для забезпечення герметичності з'єднання, паралельність вісей валів редуктора та точне позиціонування при складанні [14].

Згідно ASME Y14.5. якщо первинною базою є площина, то найчастіше до неї застосовується допуск площинності.

За вторинну базу (база В) прийнято перпендикулярну до бази А поверхню, як це показано на рис.1.23.

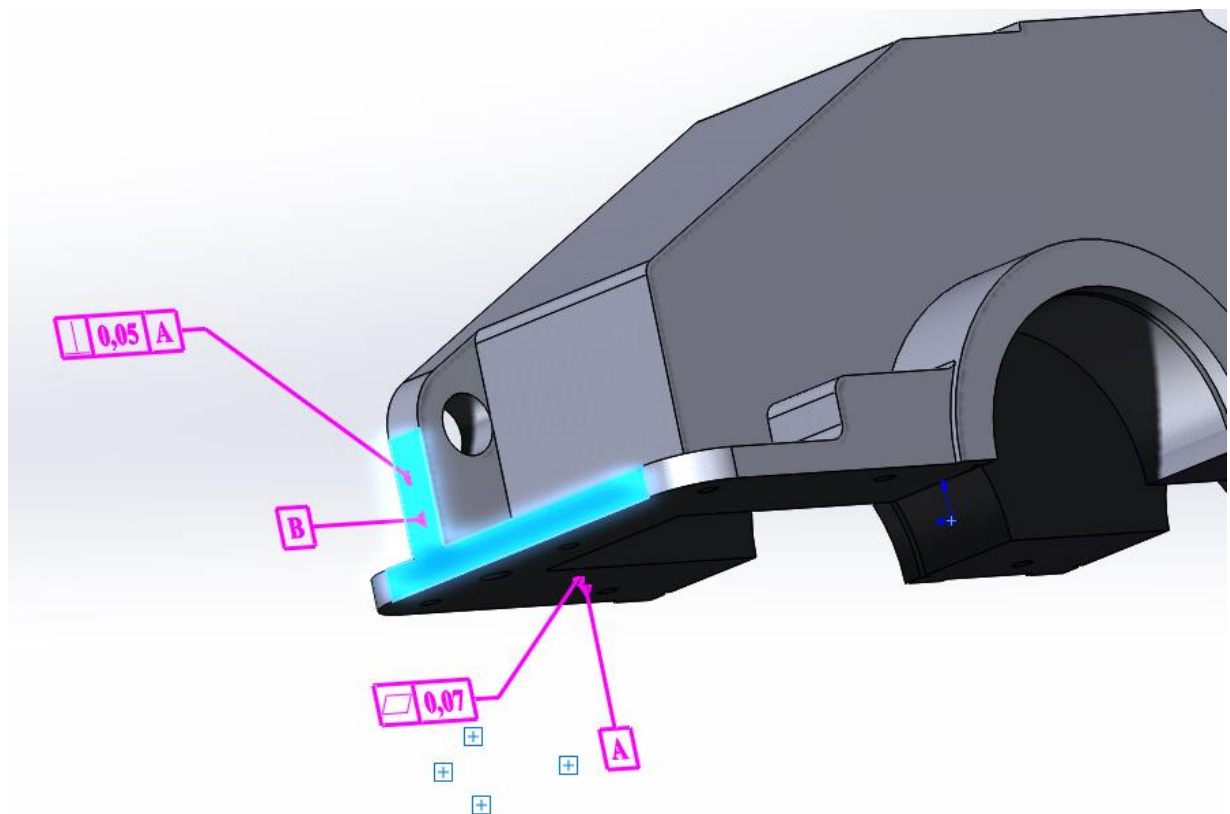


Рис.1.26. База В та геометричний допуск, що застосований до неї [14]

В даному випадку база В (вертикальна торцева грань) додатково визначає орієнтування деталі в збірці. База має геометричний допуск перпендикулярності до бази А, який становить 0,05 мм [14].

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Визначення бази С, що фіксує всі залишкові степені свободи, показано на рис.1.24.

Варто зазначити, що допуск форми в нашому випадку застосований тільки до бази А, а до баз В та С застосований тільки допуск орієнтації (перпендикулярність). Останнє пояснюється тим, що допуск орієнтації в нашому випадку автоматично контролює і форму елемента, що має бути перпендикулярним до бази.

Ілюстрація до пояснення зони допуску для перпендикулярності наведена на рис.1.25. [14]

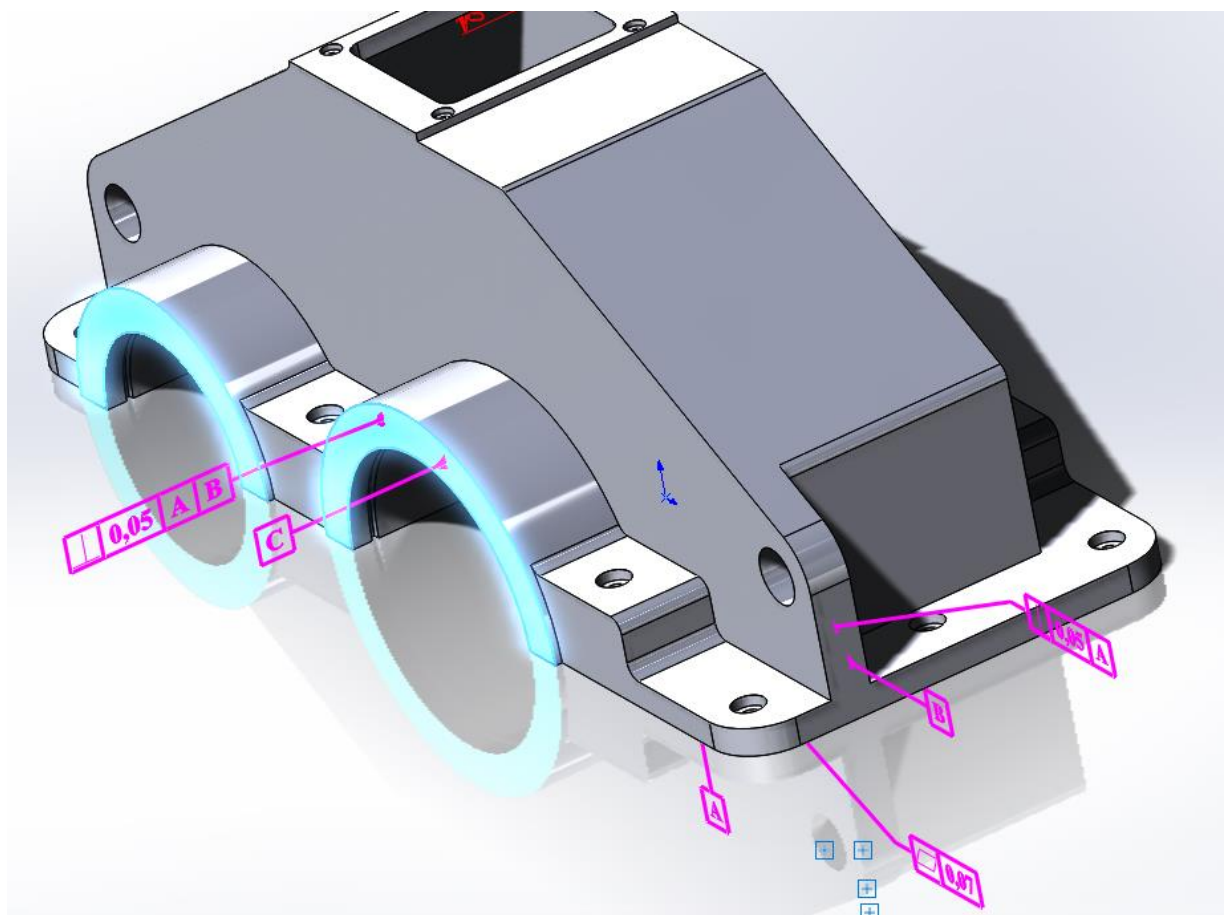


Рис.1.27. База С та геометричний допуск, що застосований до неї [14]

2 паралельні площини (див. рис.1.25.), відстань між якими становить допуск перпендикулярності, орієнтовані перпендикулярно до бази, контрольована фактична поверхні обов'язково має знаходитися у зоні допуску, що обмежена 2-ма площинами.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

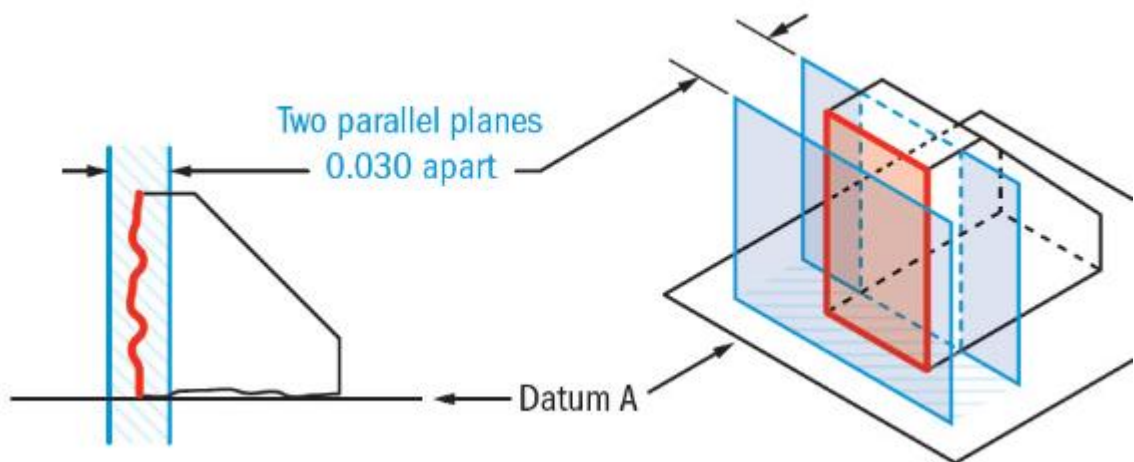


Рис.1.28. Відображення зони допуску перпендикулярності [14].

Водночас варто зазначити, що у більшості випадків при виготовленні кришок редукторів такого типу, базами В та С будуть штифти, котрі в даному випадку теж передбачені конструкцією для точного позиціонування при складанні, обслуговуванні та ремонті. Але, зважаючи на тип виробництва (спосіб отримання заготовки тощо), габарити деталі, можливість установки рамкового кондуктора для свердління кріпильних отворів (за відсутності обладнання з ЧПУ) та інші фактори, було прийнято рішення як бази В та С використовувати плоскі грані для фіксації редуктора під час операцій обробки, вимірювання та/або монтажу [14].

Позиційне відхилення

Позиційне відхилення EPP (Error of Position) - найбільша відстань між реальним розташуванням елемента (його центра, осі або площини симетрії) та його номінальним розташуванням в межах нормованої ділянки (рис. 1.26) [15].

Позиційний допуск TRP (Tolerance of Position) може задаватись в діаметральному або радіусному вираженні ($\varnothing$, R):

а) допуск в діаметральному вираженні - подвоєне найбільше допустиме значення позиційного відхилення елемента;

б) допуск в радіусному вираженні - найбільше допустиме значення позиційного відхилення елемента [15].

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Поле позиційного допуску осі (прямої) в площині – зона на площині, симетрична відносно номінального розташування розглядуваної осі (прямої) і обмежена двома паралельними прямими, віддаленими одна від одної на відстань 3σ , що дорівнює позиційному допуску в діаметральному вираженні TPP або подвоєному позиційному допуску в радіальному вираженні $TPP/2$. Поле позиційного допуску осі (прямої) в просторі - а) зона в просторі, обмежена циліндром, діаметр якого дорівнює позиційному допуску в діаметральному вираженні TPP або подвоєному позиційному допуску в радіусному вираженні $TPP/2$, а вісь співпадає з номінальним розташуванням розглядуваної осі (прямої);

б) зона в просторі, обмежена прямокутним паралелепіпедом, сторони перерізу якого дорівнюють позиційним допускам $TPP1$ і $TPP2$ в діаметральному вираженні або подвоєному позиційному допуску в радіальному вираженні $TPP1/2$ і $TPP2/2$ в двох взаємно перпендикулярних напрямках, а бічні грані відповідно є перпендикулярними до площин заданих напрямків. Поле позиційного допуску площини симетрії чи осі (прямої) в заданому напрямку - зона в просторі, обмежена двома паралельними площинами, віддаленими одна від одної на відстань, що дорівнює позиційному допуску в діаметральному вираженні TPP або подвоєному позиційному допуску в радіальному вираженні

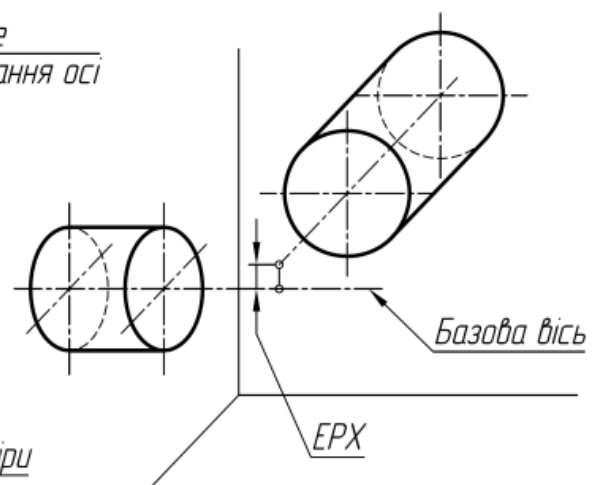
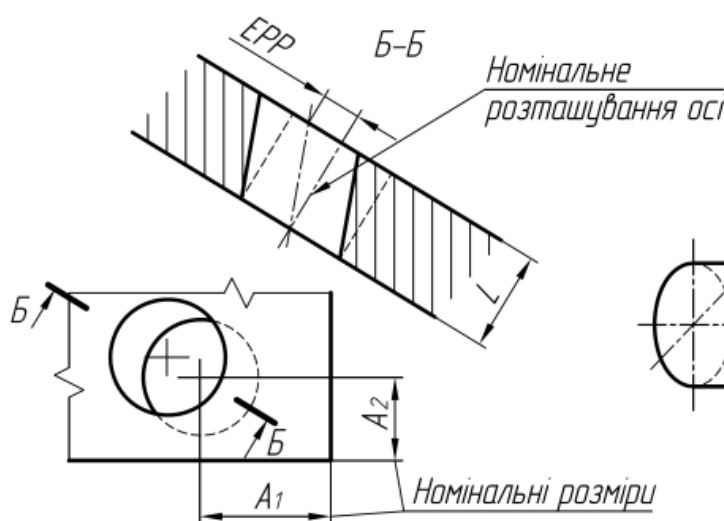


Рис. 1.29 Позиційне відхилення. Рис. 1.30– Відхилення від перетину осей [15].

ТРР/2, і симетричними відносно номінального розташування розглядуваної площини симетрії чи осі; для позиційних допусків осі в заданому напрямку площини, що обмежують поле допуску, є перпендикулярними до заданого напрямку [15].

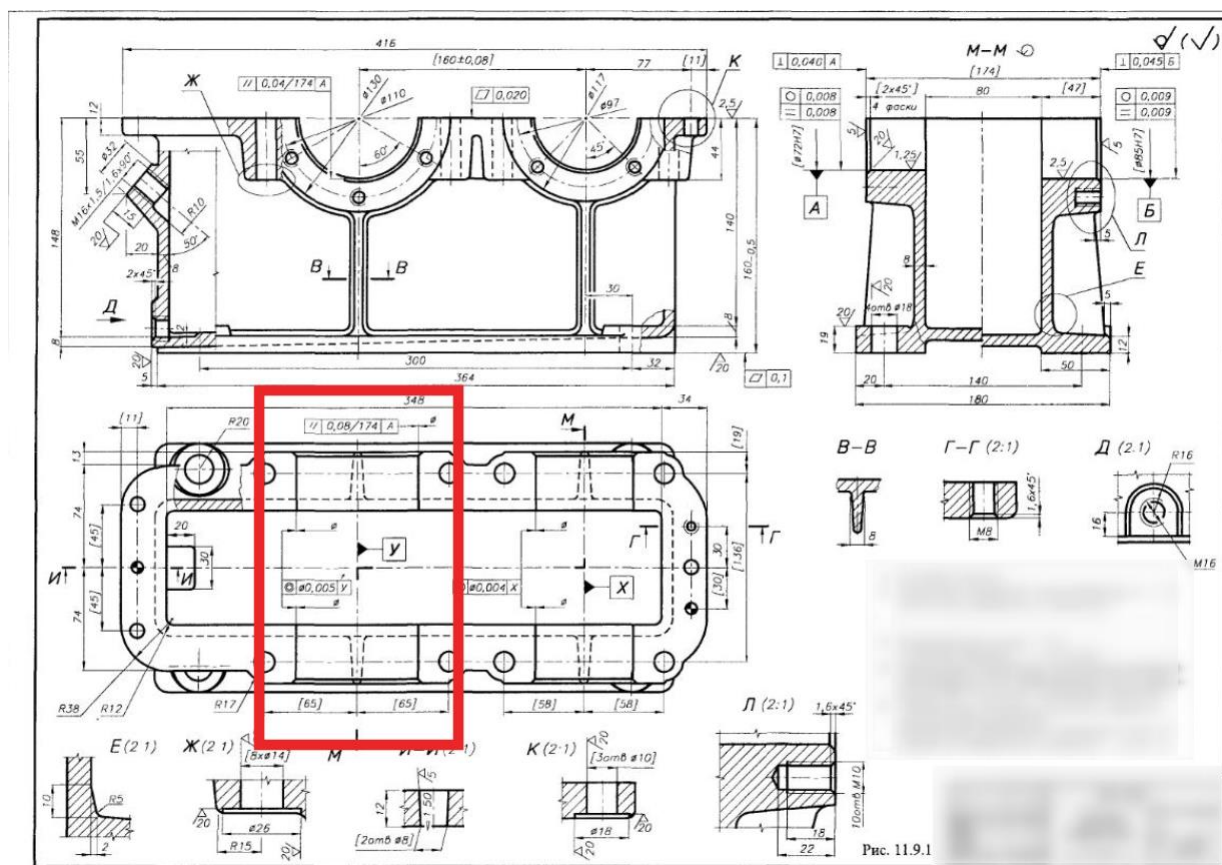


Рис. 1.31. Приклад позначення співвісності.

Для отворів, діаметром 100 мм, який показані у виділеному прямокутнику, ми бачимо, що встановлена вимога співвісності відносно бази У, база У являє собою вісь частин одного отвору, але з урахуванням сучасних тенденцій, співісність для деталей які не обертаються, тобто, не для валів, а для отворів використовується рідко у зв'язку з тим що її складно вимірювати

Часто у виробництві замість піввісності використовують контроль радіального биття або повного радіального биття, в тому числі через те, що дані геометричні допуски значно простіше технічно вимірювати. Водночас, слід

сказати що биття радіальне та співвісність відрізняється в тому числі і тим, що наприклад співвісність може стосуватися частин валу, одна з яких є циліндрична а інша наприклад квадратна. Вони можуть бути співвісні тому що співвісність визначає положення центра мас поперечного перерізу елемента.

На основі вищесказаного даній роботі прийнято рішення визначати замість співвісності чи радіального биття позиційний допуск осей отворів, як це показано на рис. 1.32.

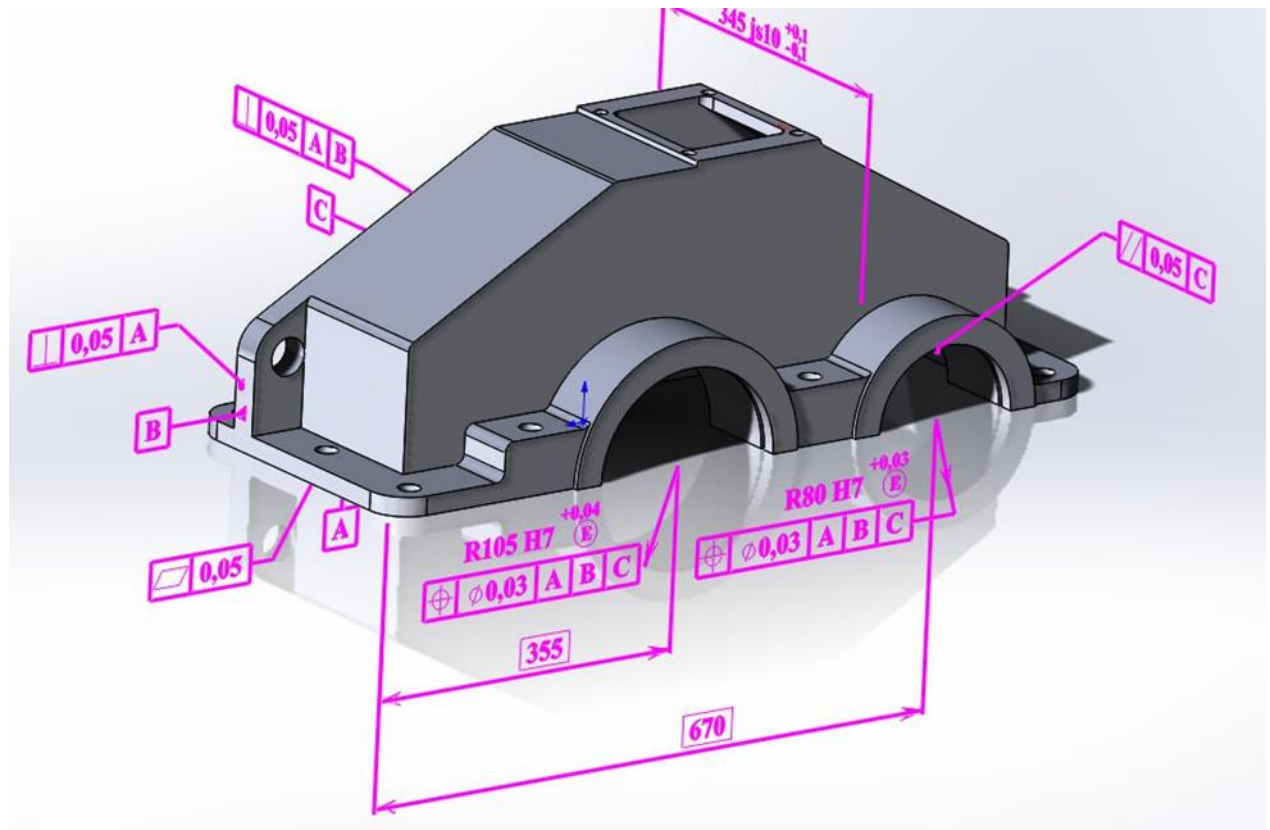


Рис.1.32. Контроль взаємного розташування отворів під підшипники

На рисунку 1.32 вказано, що для R105H7 та R80H7 визначено позиційний допуск $\varnothing 0,03$ відносно 3-х взаємоперпендикулярних баз. Коректніше вказувати діаметри отворів ($\varnothing 210H7$ та $\varnothing 160H7$), що утворюють після операції складання частин корпусу, але нижня частина корпусу не входить в задачі даної роботи. Отже, осі даних отворів повинні лежати в межах зони допуску, яка являє собою циліндр діаметром 0,03мм, який визначений відносно 3-х баз. Іншими словами: вісь отвору повинна знаходитися в циліндричній зоні допуску, яка повністю

визначена в просторі, при цьому розташування центру зони допуску від, наприклад, бази В позначено через теоретично точні розміри, бо положення отворів визначається саме позиційним допуском.

Важливо зазначити, що допуск контролюється для редуктора в зборі, тобто з нижньою частиною разом.

Для ($\varnothing 210H7$ та $\varnothing 160H7$ (на схемі верхньої частини корпусу це R105H7 та R80H7) не вказані жодні геометричні допуски стосовно форми поверхні (циліндричність, круглість тощо). Але після R105H7 та R80H7 вказано застосування енвелоп принципу (Envelope requirement), що означає, що реальна поверхня отвору не повинна виходити за уявну геометричну оболонку, яка утворена розміром при максимальному матеріальному стані (коли отвір найменший в дозволеному розмірі – матеріалу деталі найбільше). Таким чином Envelope requirement гарантує форму отвору і може використовуватися для гарантування якісної посадки підшипника.

Контроль даного позиційного допуску здійснюється на координатно-вимірювальній машині.

Висновки до загально-технічного розділу

У даному розділі було проведено комплексний аналіз конструкції редукторів, що застосовуються в сучасному машинобудуванні. На основі порівняння існуючих аналогів визначено їхні конструктивні особливості, сильні та слабкі сторони, що дозволило окреслити можливі напрями удосконалення конструкції корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора з урахуванням вимог підвищення технологічності, жорсткості та зручності складання.

Окрему увагу було приділено вибору типу з'єднання вала з передавальними елементами. Розглянуто різні типи шпонок (призматичні, клинові, сегментні тощо), їх переваги та обмеження. В результаті аналізу конструкції редуктора, умов навантаження, було прийнято рішення про застосування призматичної шпонки як найбільш надійного і універсального рішення для заданих умов роботи.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

На основі сучасних підходів щодо визначення параметрів геометричних моделей (визначення на основі моделі - MBD), що включає визначення розмірів та геометричних допусків на 3D моделях, встановлені бази, а також визначені розміри та геометричні допуски для поверхонь, що механічно обробляються. На основі базового редуктора на напрацьованих підходів щодо геометричних вимог функціональних поверхонь редуктора, створено тривимірну 3D-модель корпусу редуктора в середовищі SolidWorks, яка враховує всі ключові конструктивні вимоги: посадкові гнізда, монтажні отвори, ребра жорсткості, кріплення та точність взаємного розташування елементів.

Таким чином, розділ закладає основу для подальшої розробки підходів до конструкції корпусу редуктора, а також технології його виготовлення, що буде розроблено в наступних розділах проекту.

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз технологічності конструкції корпусу редуктора

Мета даного аналізу – це виявлення технологічних і конструкторських недоліків конструкції деталі за її вихідними даними, що містяться в кресленнях і технічних вимогах, а також розробка технічних пропозицій щодо поліпшення технологічності деталі, яку ми розглядаємо [13].

Розрахуємо складові параметри технологічності

1. Визначаємо коефіцієнт точності КІТ за формулою:

$$K_{IT} = 1 - \frac{1}{K_{IT\text{ ср}}}$$

де $K_{IT\text{ ср}}$ – середній квалітет точності.

$$K_{IT, \text{ср}} = \frac{\sum K_i * n_i}{\sum n_i}$$

$$K_{IT, \text{ср}} = \frac{(7*4)+(8*9)+(10*1)+(14*14)}{4+1+9+14} = 10,9$$

$K_1=7$, $n_1=4$ (поверхні з високою точністю обробки);

$K_2=10$, $n_2= 1$;

$K_3=8$, $n_3 = 9$

$K_4=14$, $n_4=14$

$$K_{IT} = 1 - \frac{1}{10,9} = 0,9$$

2. Визначаємо коефіцієнт шорсткості $K_{ш}$ за формулою:

$$K_{ш} = 1 - \frac{1}{Ш_{ср}}$$

де $Ш_{ср}$ – середній показник шорсткості.

$$Ш_{ср} = \frac{\sum Ш_i * n_i}{\sum n_i}$$

де $Ш_i$ – i -та шорсткість;

n_i – кількість поверхонь з i -ою шорсткістю;

$\sum n_i$ – загальна кількість поверхонь [15].

$$Ш_{ср} = \frac{(3,2*3)+(6,3*10)+(10*1,6)+(5*12,5)}{3+10+4+4+2+1+4} = 5,4$$

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_{ш} = 1 - \frac{1}{5.4} = 0.814$$

Таблиця 2.1

№ п/п	Назва поверхні або її позначення	Кількість поверхон ь	Кількість уніфікованих елементів	Квалітет точності ІТ	Параметр шорсткості, Ra, мкм
1	Установча опорна площина (база А)	1	1	8	3,2
2	Посадочна база під підшипники	1	1	8	3.2
3	Базова торцева площина корпусу	1	1	8	3.2
4	Штіфти	2	2	8	1.6
5	Кріпильні отвори для болтів	10	10	14	6.3
6	Підшипникові гнізда корпусу	4	4	7	1.6
7	Кільцева канавка під стопорне кільце	4	4	8	1.6
8	люк обслуговування	1	1	10	12.5
9	Кріпильні отвори під болти для люку обслуговування	1	1	14	12.5

Джерело: розроблено автором

2. 2 Визначення програми випуску деталей та типу виробництва

Тип виробництва - це сукупність ознак, що характеризують технічну, організаційну та економічну структуру виробництва. Ці ознаки визначаються спеціалізацією виробництва, обсягами та номенклатурою виробів, а також формою руху предметів праці по робочих місцях.

Виходячи з того, що маса деталі 123.5 кг. а річний випуску $N = 250$ шт. визначається тип виробництва табличним методом, в якому виготовляється деталь, це буде дрібносерійний тип виробництва.

Визначимо кількість деталей в партії для одночасного запуску у виробництво за формулою:

$$n = \frac{N * a}{254}$$

де N – річна програма, шт.; a – періодичність запуску в днях (рекомендовано періодичність 3, 6, 12, 24 дні). Беремо 24 днів.

$$n = \frac{250 * 24}{254} = 23$$

Характеристика типу виробництва:

Дрібносерійне виробництво характерне тим, що виготовлення здійснюється партіями невеликого розміру, при цьому асортимент продукції обмежений, а обробка здійснюється на універсальному обладнанні або з використанням ЧПК. Предмети праці надходять до робочих місць не поштучно, а малими серіями. Зміна продукції можлива без суттєвих переналаштувань виробництва [15].

Перевагами дрібносерійного виробництва є:

- висока гнучкість та можливість виготовлення складних конструкцій;
- невисокі витрати на підготовку виробництва;
- здатність адаптації під змінні потреби.

До недоліків відноситься:

					№ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

- менша продуктивність у порівнянні з масовим або середньосерійним виробництвом;

- більша тривалість виготовлення одиничної продукції;

- підвищені вимоги до кваліфікації персоналу [15].

Такий тип виробництва дозволяє ефективно забезпечити потреби у виготовленні корпусних деталей, зокрема при проектуванні та виготовленні дослідних зразків або невеликих партій продукції з високими технічними вимогами.

- більша тривалість виготовлення одиничної продукції;

- підвищені вимоги до кваліфікації персоналу [15].

Такий тип виробництва дозволяє ефективно забезпечити потреби у виготовленні корпусних деталей, зокрема при проектуванні та виготовленні дослідних зразків або невеликих партій продукції з високими технічними вимогами [15].

2.3 Вибір матеріалу та способу виготовлення заготовки

У виборі заготовки для корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора важливо врахувати механічні характеристики, точність та вимоги до оброблюваності матеріалу. Оскільки корпус зазнає впливу сил реакції зі сторони шпонки, підшипників та зубців шестерень, то деталь повинна мати достатню міцність, жорсткість та вібростійкість.

При виборі заготовки, я обираю між двома варіантами: СЧ20 та СЧ25, пропоную порівняти їх в таблиці:

Таблиця 2.2

Характеристика	СЧ20	СЧ25
Межа міцності, МПа	До 200	До 250
Твердість, НВ	170-190	180-207
Ударна в'язкість	Низька	Нижче середньої
Оброблюваність	Дуже хороша	Хороша
Вібростійкість	Висока	Висока

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Орієнтовна ціна, грн/кг	~21	~24
----------------------------	-----	-----

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [16]

Таблиця 2.3

Хімічний склад СЧ25

Вуглець (C)	Кремній (Si)	Марганець (Mn)	Фосфор (P)	Сірка (S)
3.0 – 3.4%	1.4 – 20%	0.5 – 0.8%	До 0.12%	До 0.12%

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [16]

Такий склад забезпечує гарне поєднання ливарних властивостей, жорсткості та термічної стабільності [16].

Якщо враховувати складність корпусу, наявність ребер жорсткості, перепадів товщин стінок та конструкції у вигляді порожнистої деталі, на мою думку, оптимальним способом виготовлення є лиття в піщанні форми. Такий спосіб є достатньо точним та якісним та забезпечує високий рівень економічної ефективності для даного типу деталі.

Є декілька типів виготовлення корпусів редуктора: лиття в кокіль, поковка, лиття в піщанні форми. Я обрав лиття в піщанні форми, ось переваги цього методу виготовлення:

- Підходить для складних форм із внутрішніми порожнинами
- Висока технологічна гнучкість: легко вносити зміни в модель
- Доступне у дрібносерійному та середньосерійному виробництві
- Не потребує дороговартісного обладнання

Тепер розберемо, чому я обрав саме цей варіант.

Чому не лиття в кокіль:

Лиття в кокіль не доцільне для великих партій і менше підходить для масивних корпусів складної форми;

Обмеження по складності та порожнистості форми;

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Висока вартість оснащення для виготовлення кокілю.

Чому не поковка:

Ковка не використовується для порожнистих деталей такої складності;

Висока трудомісткість та непридатність до виготовлення ребер, внутрішніх об'ємів;

Значні витрати матеріалу та ускладнена механічна обробка.

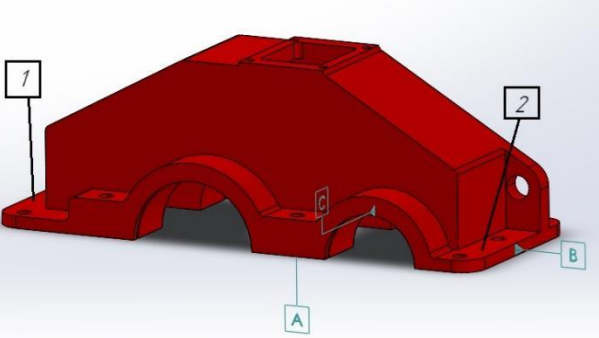
Таким чином, найбільш раціональним є вибір сірого чавуну СЧ25, так як він найбільш підходить для мого типу виробництв, та забезпечує достатню міцність та жорсткість при збереженні високої оброблюваності.

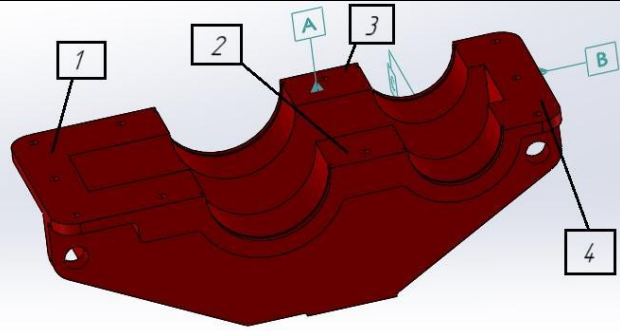
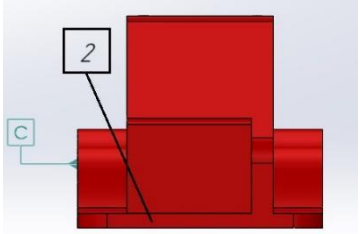
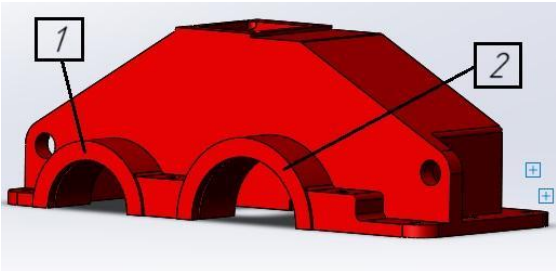
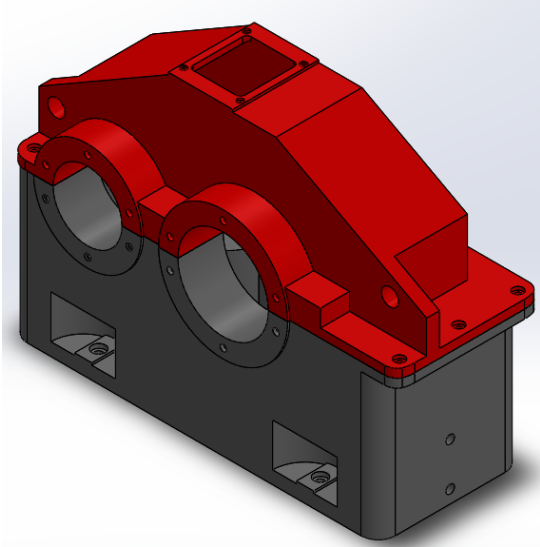
2.4 Розробка технологічного процесу виготовлення корпусу

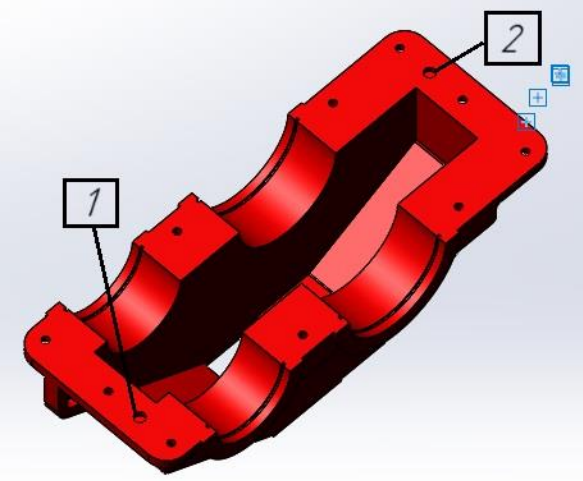
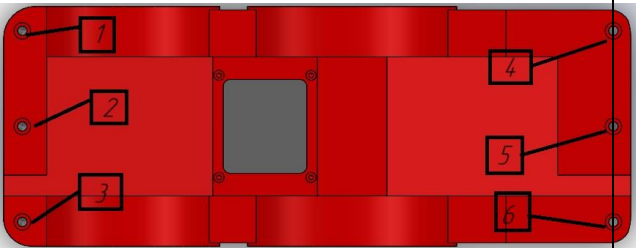
2.4.1. Розробка технологічного маршруту виготовлення деталі

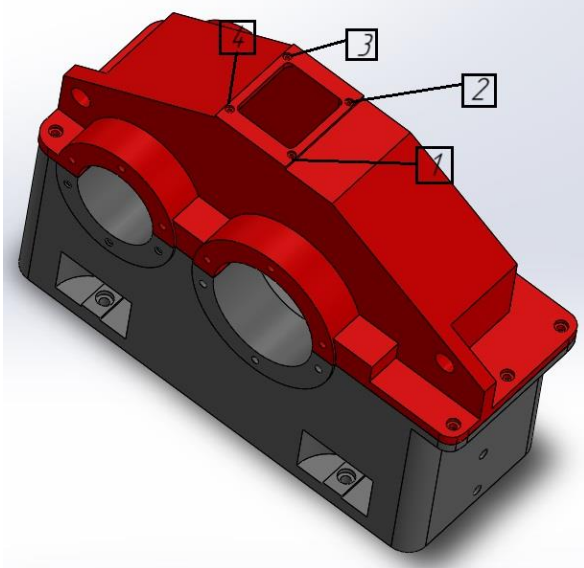
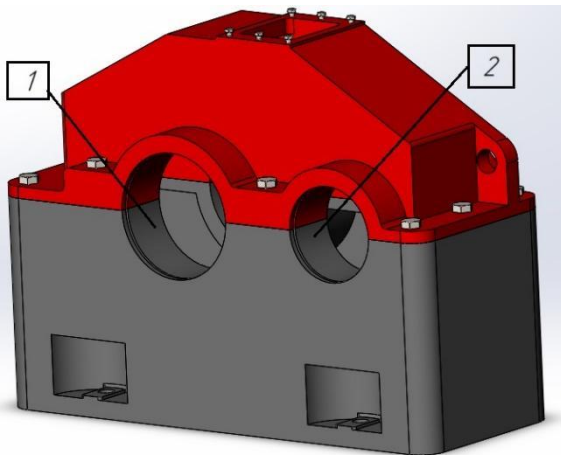
Таблиця 2.4

Технологічний маршрут виготовлення деталі

Операції	Назва та зміст операції	Ескіз обробки та базування	Обладнання
05	Заготівельна		Лиття в піщану форму
010	Фрезерна Фрезерувати поверхні: чорнові поверхні для закріплення деталі 1 та 2		HAAS VF-4

015	Фрезерна Фрезерувати поверхні: Установча опорна площина (база А) витримавши розмір 855х355 мм		HAAS VF-4
020	Фрезерна Фрезерувати площину 2 (база В)		HAAS VF-4
025	Фрезерна Фрезерувати площини 1 та 2 (база С)		HAAS VF-4
030	Складальна		

035	Свердління Зенкер Розгортка Свердли, зенкерувати, розгорнути отвори під штифти, 1 та 2 витримуючи розмір Ø20 Н6 х 2		HAAS VF-4
035	Свердління Зенкер Нарізання різі Свердли, зенкерувати, нарізати різь на кріпильних отворах 1 - 10 витримуючи розмір Ø23,8 Н7 х 10		Свердління Зенкер Нарізання різі Свердли, зенкерувати, нарізати різь на кріпильних отворах 1 - 10 витримуючи розмір Ø23,8 Н7 х 10

035	Свердління Зенкер Нарізання різі Свердли, зенкерувати, нарізати різь на кріпильних отворах 1 - 4 витримуючи розмір Ø14,54 H7 x 4		HAAS VF-4
040	Розточувальна Розточити отвір під підшипник 1, витримуючи розмір R 105 H7. Розточити отвір під підшипник 2, витримуючи розмір R 80 H7		TOS WHN 13.8 CNC
55	Контрольна		Стіл ВТК

Джерело: розроблено автором

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

2.4.2 Розрахунок загальних та міжопераційних припусків на обробку деталі

Розрахунок припусків виконується з метою визначення технологічно обґрунтованої товщини шару матеріалу, який необхідно видалити на кожній операції для досягнення заданої точності та шорсткості поверхні. У даному підрозділі проводиться розрахунок загальних та міжопераційних припусків та допусків на механічну обробку поверхонь корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора. Для визначення допусків та припусків на обробку деталі, я користувався підручником «ЗАГОТОВКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН: ФОРМОУТВОРЕННЯ, ПАРАМЕТРИ, ХАРАКТЕРИСТИКИ. Частина 1.».

Згідно стандартів точність відливки в цілому характеризується такими параметрами:

- клас розмірної точності;
- ступінь жолоблення;
- ступінь точності поверхонь;
- клас точності маси;
- допуск зміщення елемента відливки по площині роз'єму.

Для всіх видів відливок стандартом регламентовано:

- 22 класи точності розмірів (16 класів і 6 підкласів, що позначаються літерою $T - 1, 2, 3T, 3, 4, 5T, 5, \dots, 15$);
- 11 ступенів жолоблення (1, 2, 3, ..., 11);
- 22 ступені точності поверхонь відливок (1, 2, 3, ..., 22);
- 22 класи точності мас відливок (1, 2, 3T, 3, 4, 5T, 5, ..., 15)
- всього 16 класів та 6 підкласів.

З таблиці 2.17 оберемо наступний матеріал: лиття в піщано–глиняні сирі форми з низьковологих (до 2,8 %) високоміцних (більше 160 кПа або 1,6 кг/см²) сумішей, з високим і однорідним ущільненням до твердості, не нижче 90 одиниць. Також, оберемо тип сплаву: нетермооброблювані чорні і кольорові сплави та термооброблювані кольорові легкі сплави. Виходячи з цього, обираємо інтервал класу розмірної точності: 8-13. В табл. 2.17 вказані інтервали класів розмірної точності відливок, що забезпечуються різними ТП лиття. Менші їх

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значення відносяться до простих відливок та умов масового автоматизованого виробництва, більші – до складних відливок одиничного і малосерійного виробництва, середні – до відливок середньої складності та умов механізованого серійного виробництва. Отже, виходячи з цього, оберемо 10-й інтервал класу розмірної точності [17].

З таблиці 2.18 оберемо ступінь жолоблення елементів відливок. Для цього потрібно поррахувати відношення найменшого розміру елемента відливки до найбільшого: $\frac{335}{855} = 0,392 > 0,200$, отже, обираємо інтервал 3-6. Менші значення з інтервалів ступенів викривлення відносяться до простих відливок з легких кольорових сплавів; більші значення – до складних відливок з чорних сплавів. Отже, обираємо ступінь жолоблення 5 [17].

З таблиці 2.19 оберемо ступінь точності поверхонь відливок, за нашими показниками, оберемо діапазон 11-18. В табл. 2.19 вказані інтервали ступенів точності поверхонь відливок, що забезпечуються різними технологічними процесами лиття. Менші із значень відносяться до простих відливок та до умов масового автоматизованого виробництва, більші – до складних відливок одиничного і малосерійного виробництва, середні – до відливок середньої складності та до умов механізованого серійного виробництва. Отже оберемо значення 14 [17].

З таблиці 2.20 оберемо клас точності маси відливки, так як маса деталі 123 кг, обираємо діапазон 7т–14. З цього діапазон обираємо значення 9.

З таблиці 2.21 визначимо допуски лінійних розмірів відливок для поверхонь базування. Отже, виходячи з таблиці, установча база А (335x855 мм) – 2.4 мм, база В (96x255 мм) - 1.8 мм, для установчої бази С: для поверхні R80H7 – 1.1 мм, для поверхні R105H7 – 1.2 мм [17].

Таблиця 2.5

Установча база А 855мм	5.0
Установча база А 335мм	4.0
Установча база В 255 мм	4.0

Установча база В 96 мм	2,8
Поверхня R80H7	2.8
Поверхня R105H7	3.2
Поверхня 314 мм	4.0
Поверхня 200 мм	3.6
Поверхня 200 мм	3.6
Поверхня 97.5 мм	2,8
Поверхня 200 мм	3.6
Поверхня 6 мм	1,4
Поверхня 200 мм	3.6
Поверхня 150 мм	3.2
Поверхня 200 мм	3.6
Поверхня 263.5 мм	4.0
Поверхня 170 мм	3.6
Поверхня 122 мм	3.2
Отвір Ø 40 мм	2.2
Площина 69 мм	2.8
Площина 61 мм	2.4
Площина 237мм	4.0
Площина 69 мм	2,8
Площина 69 мм	2.8
Площина 67,5мм	2.8
Площина 90,5 мм	2.8
Площина 67,5 мм	2.8
Площина 84 мм	2.8
Площина 67,5 мм	2.8
Площина 237 мм	3.6
Площина 84 мм	2.8
Площина 124 мм	3.2

Площина 67 мм	2.8
Площина 297 мм	4.0
Площина 733 мм	5.0
Площина 180 мм	3.6
Площина 60 мм	2.4
Площина 90,5 мм	2.8
Площина 60 мм	2.4

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [17]

З таблиці 2.22 визначимо допуски форми і розташування поверхонь відливок для базових поверхонь:

Таблиця 2.6

Базова площина А 855 мм	Площинність, 2,4 мм
Базова площина А 335 мм	Площинність мм
Базова площина В 255 мм	Перпендикулярність, 0,80 мм
Базова площина В 96 мм	Перпендикулярність 0,32 мм
R80H7	Позиційний допуск 0,32
R105H7	Позиційний допуск 0,32
Верхня кришка розмір 200 мм	Площинність, 0.64 мм
Верхня кришка розмір 150 мм	Площинність, 0.40

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [17]

З таблиці 2.23 визначимо відповідність між ступенями точності та шорсткістю поверхонь відливок. Так як ступінь точності заготовки 10, обираємо значення Ra 10.

З таблиці 2.25, визначимо допуски маси відливок, так як ми обрали ступінь точності поверхоні відливки 14, обираємо значення 24

З таблиці 2,26 визначимо ряди припусків на обробку відливок, так як обраний ступінь точності поверхні поверхні – 14, з діапазону 5-8 оберемо значення 7, так як менші значення рядів припусків слід приймати для термооброблюваних відливок з кольорових легкоплавких сплавів, більші

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

значення – для відливок з ковкого чавуну, середні – для відливок із сірого і високоміцного чавуну, термооброблених відливок.

З таблиці 2,27 оберемо точність обробки та припусків відливок, так як заготовка буде оброблюватись на верстаті з ЧПУ оберемо нормальний рівень точності обробки при ступені точності верстатів, та середню точність обробки та припусків відливок.

З таблиці 2.28 оберемо загальні допуски елементів відливок, мм.

Таблиця 2.7

Базова площа А 855х355 мм	2,8
R80H7	2
R105H7	1,2
Верхня кришка розмір 200х150 мм	1,1
Канавка під стопорне кільце Ø 210 мм	1,2
Канавка під стопорне кільце Ø 160 мм	1,8

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [17]

За допомогою цієї табл. 2.28 одночасно визначається загальний допуск для двох складових: допуску лінійних розмірів і допуску форми і розташування поверхонь відливок. Якщо таких величин більше двох, то розрахунок загального допуску виконується послідовно: спочатку за табл. 2.28 визначається загальний допуск для двох величин, після чого – для отриманого загального допуску як результуючого двох величин та третьої величини і т. д. При цьому окремі складові загального допуску попередньо необхідно розташувати в порядку зменшення тобто: $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ [17].

Прорахуємо загальний допуск на поверхні R105H7 та R80H7 за формулою:

$$T_{B \text{ заг}} = \sqrt{T_{B \text{ л}}^2 + T_{B \text{ ф.}}^2 + T_{B \text{ н.}}^2 + T_{B \text{ зм}}^2}$$

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Де T_B , $T_{B.ф}$, $T_{B.п.}$, $T_{B.зм}$, відповідно допуски розміру, форми, позиційного розташування оброблюваної поверхні відливки та допуск заміщення елементів відливки [17].

R105H7:

$$T_{B.заг.} = \sqrt{3,2^2 + 0,32^2 + 1^2 + 0,6^2} = 3,42 \text{ мм}$$

$$T_{B.заг.} = \sqrt{2,8^2 + 0,32^2 + 2^2 + 1^2} = 3,60 \text{ мм}$$

За таблицею 2,29 оберемо мінімальні ливарні припуски, для цього, потрібно обрати ряд припусків відливок (від 7 до 18), скористаємось таблицею 2.17, так як ряд ливарних припусків визначається за класом розмірної точності відливок. З цього отримуємо 10-й ряд припусків відливок і значення 1.6 мм [17].

Величину загального припуску для кожного інтервалу загальних допусків на елемент поверхні в залежності від виду кінцевої механічної обробки (чорнова, напівчистова, чистова або тонка) та прийнятого ряду припусків вибирають за табл. 2.30 “Загальні припуски на сторону, що відповідають виду кінцевої механічної обробки поверхні відливки”. Значення загальних припусків, що наведені в табл. 2.30, слід використовувати для середнього рівня точності обробки (див. табл. 2.27). За цими вимогами фактично визначається послідовність обробки кожної поверхні відливки [17].

З таблиці 2.30 визначимо загальні припуски на сторону, що відповідають виду кінцевої механічної обробки поверхні відливки.

Таблиця 2.8

Базова площа А 855x355 мм	Чорнова	3.3
	Напівчистова	4,3
	Чистова	4.8
R80H7	Чорнова	3.6
	Напівчистова	4.9
	Чистова	5.6
R105H7	Чорнова	3.6

	Напівчистова	4.9
	Чистова	5.6
Верхня кришка розмір 200x150 мм	Чорнова	2.4
	Напівчистова	2.8
	Чистова	3.1
Канавка під стопорне кільце Ø 160 мм	Чорнова	2.7
	Напівчистова	3.5
	Чистова	3.8
Канавка під стопорне кільце Ø 210 мм	Чорнова	2.4
	Напівчистова	2.9
	Чистова	3.1

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [17]

2.4.3 Розробка та обґрунтування операцій технологічного процесу

Операційні карти (ОК) - це документ, який призначений для опису технологічної операції із зазначенням послідовного виконання переходів, даних про засоби технологічного оснащення, і режими різання. Застосовується при розробці одиничних технологічних процесів.

ОК містить детальний опис операції ТП з розгорнутими операціями по переходах, вказаним режимом роботи, розрахункових норм, пристосування, обладнання, робочого та вимірювального інструменту.

2.4.4 Вибір технологічного обладнання

Обирання технологічного обладнання також є важливим етапом у проектуванні та організації виробничого процесу. Якість продукції та ефективність виробництва залежить від правильного вибору обладнання. Для заготовки деталі глобoidного черв'яка, використовуємо верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), що дозволяє автоматизувати весь цикл обробки до початку самої обробки завдяки розробленій програмі. Таким чином забезпечується гнучкість виробничого процесу та багаторазове використання

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

програм, досягається висока точність виготовлення завдяки самої точності та жорсткості верстатів. Ці параметри вищі ніж у звичайних верстатів такого ж призначення [18].

Для фрезерних операцій було обрано вертикальний верстат HAAS VF-4 з ЧПУ.

HAAS VF-4 — це універсальний високотехнологічний вертикальний фрезерний верстат з числовим програмним керуванням (ЧПК), який широко застосовується у машинобудуванні, зокрема для обробки корпусних деталей середніх розмірів [18].

Вертикальний фрезерний обробний центр HAAS VF-4 є сучасним високоточним верстатом з числовим програмним керуванням, призначеним для складної обробки корпусних і плоских деталей. Верстат оснащено системою ЧПК Haas Control, що забезпечує автоматизацію та високу точність обробки. HAAS VF-4 характеризується стабільною конструкцією, що гарантує низький рівень вібрацій навіть під час інтенсивної обробки. Верстат забезпечує точність до 5 мкм, що дозволяє виконувати високоточне фрезерування, свердління, розсвердлювання та нарізання різьб. Інтерфейс управління є зручним та інтуїтивно зрозумілим, підтримує створення складних оброблювальних програм. Система керування також підтримує функцію HaasConnect — віддалений моніторинг і контроль роботи верстата. Верстат дозволяє одночасну обробку в трьох керованих координатах (осі X, Y, Z) та підтримує автоматичну зміну інструменту з магазином на 20 позицій, що значно підвищує продуктивність та зменшує час переналагодження [18].

Основні характеристики:

Робочі переміщення по осях:

X — 1270 мм

Y — 508 мм

Z — 635 мм

Максимальна швидкість обертання шпинделя: 8100 об/хв (опціонально до 15000)

					№ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Потужність двигуна шпинделя: 22.4 кВт

Кількість інструментів у магазині: 20 позицій

Система керування: HAAS CNC

Переваги:

Підходить для обробки великогабаритних корпусних деталей;

Висока точність та жорсткість конструкції;

Можливість виконання складних фрезерних, свердлильних і різьбових операцій без переналагодження;

Зручне інтегрування з CAM-системами (наприклад, SolidCAM, Fusion 360).



Рис 2.1. Вертикальний верстат HAAS VF-4 [18]

Для розточувальних операцій було обрано верстат TOS WHN 13.8 CNC з ЧПУ

TOS WHN 13.8 CNC — це високоточний горизонтально-розточувальний верстат з числовим програмним керуванням, призначений для обробки великих корпусних деталей, зокрема для свердління, розточування, фрезерування й нарізування різьби. Верстат широко застосовується у важкому машинобудуванні, енергетиці та виробництві редукторів [19].

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Основні характеристики:

Тип верстата: горизонтально-розточувальний з ЧПУ

Діаметр шпинделя: 130 мм

Конус шпинделя: ISO 50 (DIN 69871 або аналог)

Хід шпинделя (вісь W): ≈ 730 мм

Поздовжнє переміщення (вісь X): ≈ 3500 мм

Вертикальне переміщення (вісь Y): ≈ 2000 мм

Поперечне переміщення (вісь Z): ≈ 1250 мм

Робоча плита (стіл):

Розмір: 1800×2200 мм (може змінюватися залежно від комплектації)

Максимальне навантаження: $\approx 12\text{--}15$ тонн

Обертання стола (вісь B): 360° , індексована або безперервна

Система керування: Heidenhain iTNC або Fanuc (залежно від моделі)

Точність позиціонування: до ± 0.005 мм

Максимальна швидкість обертання шпинделя: до 3000 об/хв

Передача приводу шпинделя: через редуктор, з плавним регулюванням

Особливості:

Висока жорсткість станини, що забезпечує стабільну обробку великих заготовок.

Можливість виконання складних комбінованих операцій (розточування, фрезерування, свердління) без переустановки деталі.

Висока точність досягається завдяки прецизійним напрямним і компенсації температурних деформацій [19].

Оснащення автоматичним змінником інструментів (опціонально).

Сумісність із системами CAD/CAM для автоматичного створення програм.

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65



Рис. 2.2. горизонтально-розточувальний верстат з числовим програмним керуванням TOS WHN 13.8 CNC [19]

Таблиця 2.9

опер.	Назва опер.	Модель верстата	Засоби технологічного оснащення			
			Пристрій	Допоміжний інструмент	Різальний інструмент	Вимірювальний інструмент
005	Лиття	Піщана форма	-	-	-	-
010	Фрезерна	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цанговий патрон ER25	Торцева фреза CoroMill ® 345 ISO 6462	Штангенрейсмус (ISO 13385-2)

020	Фрезер на	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цангов ий патрон ER25	Торцева фреза CoroMill ® 345 ISO 6462	Штангенрейсмус (ISO 13385-2)
025	Фрезер на	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цангов ий патрон ER25	Торцева фреза CoroMill ® 345 ISO 6462	Штангенрейсмус (ISO 13385-2)
030	Фрезер на	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цангов ий патрон ER25	Торцева фреза CoroMill ® 345 ISO 6462	Штангенрейсмус (ISO 13385-2)
035	Свердл ильна	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цангов ий патрон ER25	Циліндри чне, спіральне свердло ISO 235	Глибиномір штангенциркуль ний, Кільцевий калібр-пробка Ø20 H7 (за ISO 1938-1)
040	Зенкер увальн а	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цангов ий патрон ER25	циліндри чний машинни й зенкер з напрямно ю	Глибиномір штангенциркуль ний, Кільцевий калібр-пробка Ø20 H7 (за ISO 1938-1)

					частиною ISO 2480	
045	Розгор тка	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цангов ий патрон ER25	Циліндри чна ,спіральн а розгортк а ISO 236	Глибиномір штангенциркуль ний, Кільцевий калібр-пробка Ø20 H7 (за ISO 1938-1)
050	Свердл ильна	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цангов ий патрон ER25	Циліндри чне, спіральне свердло ISO 235	Глибиномір штангенциркуль ний, Кільцевий калібр-пробка Ø20 H7 (за ISO 1938-1)
055	Зенкер увальн а	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цангов ий патрон ER25	циліндри чний машинни й зенкер з напрямно ю частиною ISO 2480	Глибиномір штангенциркуль ний, Кільцевий калібр-пробка Ø20 H7 (за ISO 1938-1)
060	Наріза ння різі	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цангов ий патрон ER25	Циліндри чна ,спіральн а розгортк а ISO 236	Глибиномір штангенциркуль ний, Кільцевий калібр-пробка M6

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

065	Свердильна	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цанговий патрон ER25	Sandvik CoroDrill ® R840ISO 513	мікрометр
070	Зенкувальна	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цанговий патрон ER25	HSS-Co ISO 8478	телескопічний нутромір + мікрометр
075	Нарізка різи	HAAS VF-4	Механічні лещата + призматичні упори	Цанговий патрон ER25	машинний мітчик для наскрізних отворів ISO 529	різбовий калібр-пробка M12
080	Розточувальна	TOS WHN 13.8 CNC	Механічні лещата + призматичні упори	Цанговий патрон ER25	Розточувальна оправка з твердосплавною пластинкою ISO 5600	телескопічна двоточкова внутрішня мікрометрична головка

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20]

2.4.5 Розрахунок режимів різання

Розрахунок режимів різання для обробки верхньої частини корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора був виконаний з використанням рекомендацій та інструментального калькулятора від провідного виробника Sandvik Coromant. Для забезпечення максимальної точності та узгодженості

					№ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

обробки використовувалася фреза CoroMill® 345, код 345-100Q32-13H, з діаметром 100 мм, що встановлюється на шпиндель із кріпленням Arbor ISO 6462 (діаметр хвостовика 32 мм).

В якості пластин використовувались змінні ріжучі елементи типу 345R-1305E-KM 3330, квадратної форми, з радіусом заокруглення 0,8 мм, покриттям CVD TiCN+Al₂O₃+TiN, призначені для чорнового фрезерування матеріалів групи К (сірий чавун СЧ25) [20].

Додаткова інформація щодо інструменту:

- Кут установки пластини: 45° (KAPR)
- Максимальна глибина різання: 6 мм (APMX)
- Кількість зубців: 10
- Тип охолодження: концентричне, 10 бар
- Вага фрези: 2.06 кг

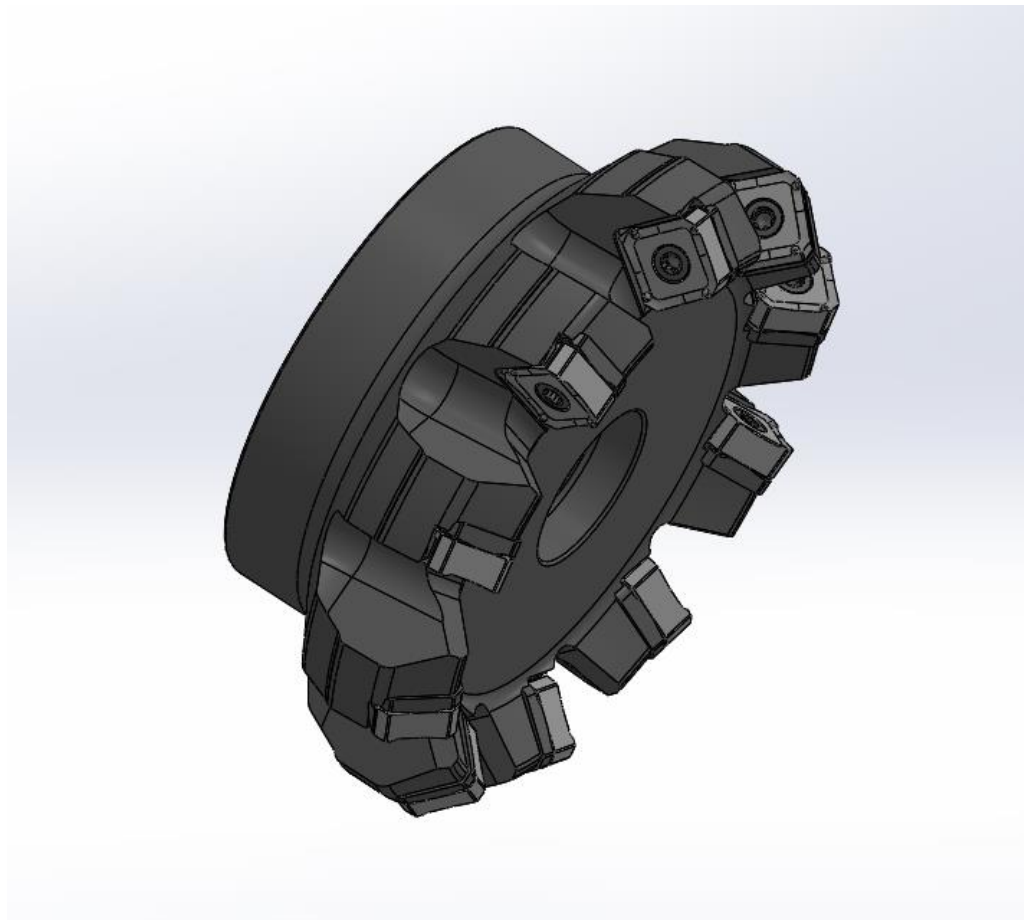


Рис 2.3. Фреза CoroMill® 345 [20]

Для вибраного інструменту та матеріалу обробки було розраховано режими різання за двома проходами — чорновим і чистовим:

Таблиця 2.10

015 Фрезерна. Установча база А		
Параметр	Чорнове фрезерування	Чистове фрезерування
Робоча ширина фрезерування, мм	71	71
Глибина різання AP, мм	2,5	0,5
Кількість проходів	5	5
Частота обертання шпинделя, об/хв	668	785
Швидкість різання, м/хв	222	251
Подача на зуб, мм/зуб	0,278	0,16
Подача на хв. у робочому діаметрі, мм/хв	1850	1260
Потужність різання, кВт	6,49	1,13
Крутний момент, Н·м	92,8	13,8
Макс. товщина стружки, мм	0,196	0,113
Об'єм знімання матеріалу, см³/хв	329	44,6
Повний час фрезерування, хв	2:26,4	3:48.0
Допоміжний час обробки, хв	0:05,43	0:05,73
Довжина шляху обробки, м	55,62	31,28
Строк служби інструмента, хв	30	25

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.11

020 Фрезерна Установча база В		
Параметр	Чорнове фрезерування	Чистовве фрезерування
Робоча ширина фрезерування, мм	20	20
Глибина різання, мм	2,5	0,5
Кількість проходів	1	1
Частота обертання шпинделя, об/хв	1250	1360
Швидкість різання, м/хв	269	275
Подача на зуб, мм/зуб	0,305	0,229
Подача на хв. у робочому діаметрі, мм/хв	2670	2170
Потужність різання, кВт	4,73	0,913
Крутний момент, Н·м	36,2	6,43
Макс. товщина стружки, мм	0,196	0,149
Об'єм знімання матеріалу, см³/хв	133	21,7
Строк служби інструмента, хв	30	23

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.12

025 Фрезерна, установча база С, R110		
Параметр	Чорнове фрезерування	Чистовве фрезерування
Робоча ширина фрезерування, мм	30	30
Глибина різання AP, мм	2,5	0,5
Кількість проходів	1	1
Частота обертання шпинделя, об/хв	1790	2030
Швидкість різання, м/хв	246	254

Подача на зуб, мм/зуб	0,278	0,222
Подача на хв. у робочому діаметрі, мм/хв	1980	1800
Потужність різання, кВт	5,55	1,18
Крутний момент, Н·м	29,7	5,53
Макс. товщина стружки, мм	0,196	0,157
Об'єм знімання матеріалу, см³/хв	149	27
Довжина шляху обробки, м	59,51	40,56
Строк служби інструмента, хв	30	22

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.13

030 Фрезерна, установча база С, R135		
Параметр	Чорнове фрезерування	Чистовве фрезерування
Робоча ширина фрезерування, мм	30	30
Глибина різання AP, мм	2,5	0,5
Кількість проходів	1	1
Частота обертання шпинделя, об/хв	1790	2030
Швидкість різання, м/хв	246	254
Подача на зуб, мм/зуб	0,278	0,222
Подача на хв. у робочому діаметрі, мм/хв	1980	1800
Потужність різання, кВт	5,55	1,18
Крутний момент, Н·м	29,7	5,53
Макс. товщина стружки, мм	0,196	0,157
Об'єм знімання матеріалу, см³/хв	149	27

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Довжина шляху обробки, м	59,51	40,56
Строк служби інструмента, хв	30	22

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.14

035 Свердлильна, штифти	
Параметр	Чорнове свердління
Робоча ширина свердління, мм	19,5
Робоча глибина різання, мм	9,75
Частота обертання шпинделя, об/хв	897
Швидкість різання, м/хв	60
Подача на зуб, мм/зуб	0,25
Подача на хв. у робочому діаметрі, мм/хв	
Потужність різання, кВт	2,95
Крутний момент, Н·м	25,5
Сила подачі	2120

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.15

040 зенкерування, штифти	
Параметр	Зенкерування
Робоча ширина фрезерування, мм	19,9
Глибина різання, мм	0,2
Частота обертання шпинделя, об/хв	559
Швидкість різання, м/хв	40
Подача на зуб, мм/зуб	0,25

Сила різання, Н	52,8
Сила подачі, Н	10,56
Строк служби інструмента, хв	99

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.16

045 розгортка, штифти	
Параметр	Розгортка
Робоча ширина фрезерування, мм	20
Глибина різання AP, мм	0,05
Кількість проходів	1
Частота обертання шпинделя, об/хв	127
Швидкість різання, м/хв	8
Подача на зуб, мм/зуб	0,4
Потужність різання, Квт	0,0035 кВт
Сила різання, Н	26,4
Сила подачі, Н	5,28

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.17

050 свердління, кріпильні отвори M12	
Параметр	Свердління отворів
Робоча ширина свердління, мм	13
Глибина різання AP, мм	80
Кількість проходів	1
Частота обертання шпинделя, об/хв	2760
Швидкість різання, м/хв	117
Подача на зуб, мм/зуб	0,215

Подача на хв. у робочому діаметрі, мм/хв	594
Потужність різання, кВт	3,92
Крутний момент, Н·м	13,5
Сила подачі, Н	1580
Строк служби інструмента, хв	180

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.18

055 нарізання різі, кріпильні отвори М12	
Параметр	Чорнове фрезерування
Робоча ширина нарізу різі, мм	0,5
Глибина різання АР, мм	80
Кількість проходів	1
Частота обертання шпинделя, об/хв	1840
Швидкість різання, м/хв	69,2
Подача на оберт, мм	1,75
Потужність різання, кВт	2,13
Крутний момент, Н·м	11,1

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.19

060 свердління, кріпильні отвори М6	
Параметр	Свердління отворів
Робоча ширина свердління, мм	6
Глибина різання АР, мм	30
Кількість проходів	1

Частота обертання шпинделя, об/хв	4820
Швидкість різання, м/хв	100
Подача на зуб, мм/зуб	0,186
Подача на хв. у робочому діаметрі, мм/хв	899
Потужність різання, кВт	1,41
Крутний момент, Н·м	2,8
Сила подачі, Н	664
Строк служби інструмента, хв	198

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.20

065 нарізання різі, кріпильні отвори М6	
Параметр	Чорнове фрезерування
Робоча ширина нарізу різі, мм	0,6
Глибина різання AP, мм	30
Кількість проходів	1
Частота обертання шпинделя, об/хв	449
Швидкість різання, м/хв	8,46
Подача на оберт, мм	1,5
Потужність різання, кВт	0,183
Крутний момент, Н·м	3,9

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Таблиця 2.21

070 Фрезерна Кришка люку обслуговування		
Параметр	Чорнове фрезерування	Чистовве фрезерування

Робоча ширина фрезерування, мм	32,5	32,2
Глибина різання AP, мм	2,5	0,5
Кількість проходів	5	5
Частота обертання шпинделя, об/хв	2350	2360
Швидкість різання, м/хв	236	236
Подача на зуб, мм/зуб	0,224	0,24
Подача на хв. у робочому діаметрі, мм/хв	2110	2270
Потужність різання, кВт	2,18	0,532
Крутний момент, Н·м		
Макс. товщина стружки, мм	0,224	0,222
Об'єм знімання матеріалу, см³/хв	158	34
Довжина шляху обробки, м	63,19	51,11
Строк служби інструмента, хв	30	23

Джерело: узагальнено та побудовано автором на основі даних [20].

Висновки до розділу 2.

На основі аналізу технологічності деталі, властивостей матеріалу деталі та інших факторів розроблено маршрутний технологічний процес виготовлення деталі.

З урахуванням точності розмірів, форми та розташування елементів деталі обрано спосіб отримання заготовки, розраховано її допуски та визначено припуски на механічну обробку.

Режими різання розраховано на основі калькулятора режимів різання компанії Sandvic Coromant, підібрано металорізальне обладнання та інструмент.

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

Як було зазначено в загальнотехнічному розділі на сьогодні існують принципово нові інженерних інструментів для пошуку рішень щодо конструювання корпусів редукторів. Зокрема, сучасні засоби машинобудівних САПР дозволяють знаходити найкраще співвідношення жорсткості та маси, наприклад, за рахунок виконання топологічної оптимізації або генеративного дизайну.

3.1 Аналітичний огляд сучасних технологій щодо пошуку інженерних рішень в конструкціях корпусів

Протягом останніх десятиліть методи топологічної оптимізації активно впроваджуються у низці науково-технічних галузей, зокрема в аерокосмічній промисловості, автомобілебудуванні, робототехніці, біомедичній інженерії тощо. На мій погляд, розширенню сфер застосування та підвищенню ефективності методів топологічної оптимізації значною мірою сприяв розвиток адитивних технологій (3D-друку), а також впровадження відповідного інструментарію в середовища CAD/CAE-систем [4].

Так, наприклад, у 2018 році функціонал топологічної оптимізації було інтегровано в одну з найпоширеніших САПР для машинобудування — SOLIDWORKS. Крім того, подібні інструменти доступні й у таких системах, як Autodesk Inventor Fusion 360, Nastran, ANSYS, COMSOL Multiphysics, PTC Creo Simulate тощо. [4]

Засоби топологічної оптимізації в САПР продовжують розвиватися й застосовуються не лише у випадках, пов'язаних з адитивними технологіями. Зокрема, у роботі проведено оптимізацію топології корпусу двоступінчастого циліндричного редуктора (рис. 3.1). Варто зазначити, що використання топологічної оптимізації корпусних деталей у машинобудівному проєктуванні доцільне на стадії концептуального або попереднього дизайну [4], оскільки під час остаточного проєктування необхідно враховувати низку конструктивних і технологічних обмежень. [4]

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для прикладу, на рисунку 1 наведено результат оптимізації частини корпусу редуктора, що був отриманий у роботі з використанням модулю SOLIDWORKS Simulation. [4]

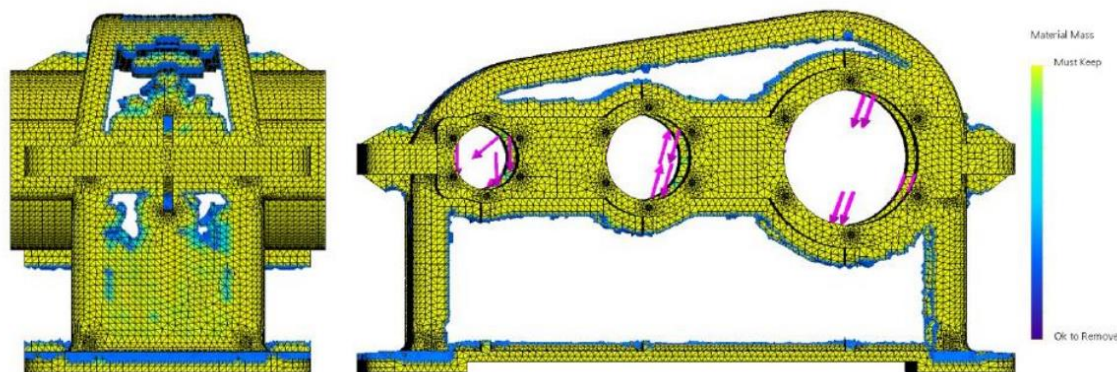


Рис 3.1. Результат оптимізації топології частини корпусу редуктора (епюра маси матеріалу) [4]

Як видно з рисунка 1, повністю реалізувати згенеровану форму деталі неможливо. Це пов'язано з тим, що з одного боку, стінки корпусу повинні забезпечувати герметичність редуктора, а з іншого — існують певні технологічні вимоги до геометрії, наприклад, мінімальна товщина стінки при виготовленні деталі методами лиття. Разом з тим, у зонах, де оптимізаційний алгоритм «вилучив» матеріал (елементи сітки скінченних елементів), можливо зменшити товщину стінок настільки, наскільки це дозволяє технологічний процес. Зменшення товщини стінки корпусу редуктора не призвело до критичного зниження його жорсткості або зростання еквівалентних напружень, водночас забезпечивши зменшення маси деталі на 7,33 %. [4]

У програмному забезпеченні Autodesk Inventor Fusion 360 функція топологічної оптимізації реалізована через інструмент генератор форм. Цей модуль дозволяє автоматично генерувати форму деталі, яка забезпечує необхідну жорсткість при мінімальній масі. У роботі цей інструмент був використаний для зменшення маси деталі робота на етапі концептуального проектування. Порівняння маси деталі до і після застосування генератора форм Autodesk наведено на рисунку 1,16. [4]

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

З рисунка 1,16 видно, що застосування генератора форм дозволяє зменшити масу деталі на 35 %, не погіршуючи її жорсткісних характеристик. Однак слід зазначити, що на сьогодні більшість «середніх» машинобудівних CAD/CAM/CAE-систем мають обмеження в реалізації інструментів топологічної оптимізації для збірок. Наприклад, у таких системах як SOLIDWORKS або Inventor можливо здійснити оптимізацію лише окремих компонентів, але не всієї складальної одиниці повністю. У деяких випадках, як-от у PTC Creo Simulate, може бути оптимізована лише одна частина збірки. [4]

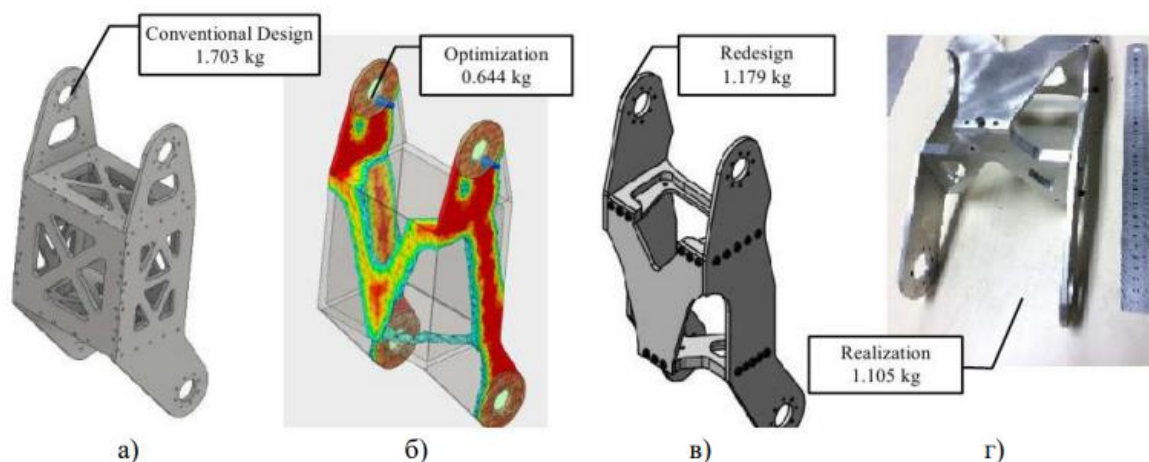


Рис 3.2. Порівняння вагових характеристик деталі при традиційному процесі проектування (а), на етапах застосування генератора форм (б, в) та кінцевого «виробничого» варіанту деталі (г) [4]

Крім того, «середні» САПР часто не дозволяють враховувати повний перелік критеріїв при виконанні топологічної оптимізації. Наприклад, не завжди можливо задати бажаний розподіл матеріалу відповідно до частотних характеристик конструкції (власні форми коливань, частота резонансу) або ж забезпечити інші експлуатаційні обмеження при мінімізації маси. Серед відомих методів топологічної оптимізації також варто згадати метод SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), розроблений Bendsoe і Kikuchi у 1988 році та вдосконалений пізніше Rozvany і Zhou [1992]. Метод SIMP активно використовується в академічних дослідженнях для багатофазних, ізотропних і анізотропних матеріалів, і має потенціал для подальшого впровадження в

машинобудівні CAD-системи, зокрема на стадії концептуального проєктування.[4]

Основні тенденції розвитку в цій сфері можна окреслити так:

1. Поширення застосування методів топологічної оптимізації у галузях, де виготовлення деталей здійснюється адитивними технологіями або литтям (наприклад, складні об'ємні корпуси, важковидалювані внутрішні порожнини тощо).

2. Зростання популярності генераторів форм у середовищах CAD, що дозволяє використовувати топологічну оптимізацію навіть у межах простих інтерфейсів для користувача [4].

Удосконалення алгоритмів генерації форм: вони стають придатнішими для початкових етапів проєктування, дозволяючи шукати оптимальні за масою та жорсткістю рішення ще до виконання повного конструювання [4].

3.2. Топологічна оптимізація

Топологічна оптимізація (ТО) – це математичний метод, який оптимізує компоновку матеріалів в заданому просторі проєктування для заданого набору навантажень, граничних умов і обмежень з метою максимізації продуктивності системи. ТО відрізняється від оптимізації форми і оптимізації розмірів тим, що дизайн може досягати будь-якої форми в просторі, замість того, щоб мати зумовлені конфігурації.

Тобто процес топологічної оптимізації – це пошук оптимальної форми деталі при заданих умовах закріплення і навантаження. Підкреслимо, що оптимальною в даному випадку вважається форма, що забезпечує найменшу вагу.

Цей вид генеративного дизайну реалізований в Solid Edge ST10, Altair Inspire, Ansys Mechanical.

Зазвичай оцінювання ефективності проєктування з використанням ТО здійснюється методом кінцевих елементів. Тобто, конструкція оптимізується з використанням методів математичного програмування на основі градієнта, таких

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

як алгоритми критеріїв оптимальності і методи переміщення асимптот або використання алгоритмів на основі неградієнта, таких як генетичні алгоритми.

Комп'ютерна оптимізація топології дає дивовижні і абсолютно незвичайні варіанти геометрії. Вона дозволяє знизити вагу виробів без погіршення характеристик міцності, оптимізувати витрати матеріалу, відповідно знижуючи вартість виробу. Однак при всьому цьому відразу ж виникає питання про технологічність продукту та технології його виготовлення.

3.3. Генеративний дизайн

Генеративний дизайн – це ітеративний процес дослідження дизайну, який використовує програмну програму, керовану штучним інтелектом, для створення ряду проектних рішень, які відповідають набору обмежень. На відміну від традиційного проектування, де процес починається з моделі, заснованої на знаннях інженера, генеративний дизайн починається з параметрів проектування і використовує ІІІ для створення моделі.

Змінюючи параметри конструкції у все більш вдосконаленому циклі зворотного зв'язку, інженери можуть знайти оптимізовані та індивідуальні дизайнерські рішення для широкого кола інженерних завдань, таких як зробити компоненти продукту легшими, міцнішими та більш рентабельними.

3.4. Статичне дослідження корпусу редуктора

Для виконання FEM дослідження корпусу редуктора скористаємося алгоритмом виконання досліджень в solidworks simulation що наведений на рис. 3.3.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

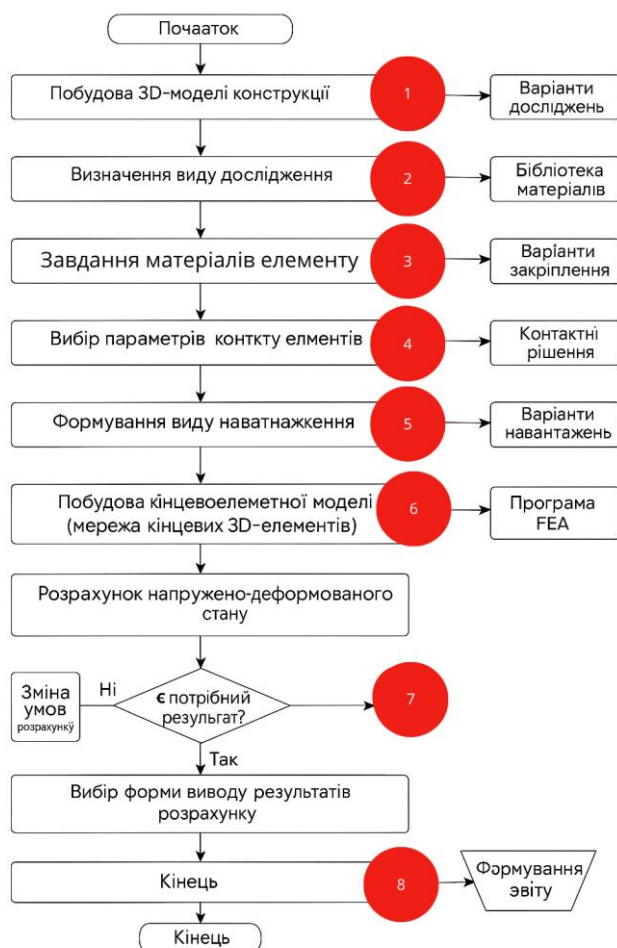
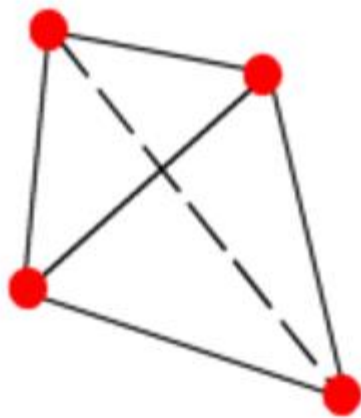


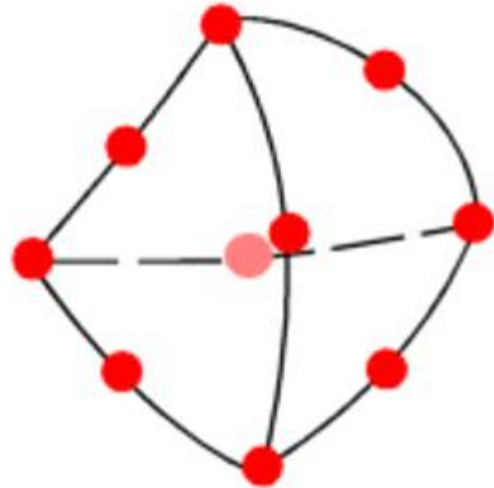
Рис. 3.3. Алгоритм виконання досліджень в solidworks simulation.

В нашому випадку для виконання елементів корпусу редуктора використано твердотіле моделювання, що в свою чергу визначає тип скінченних елементів за замовчуванням, зокрема, в даному випадку це будуть тетраедри.

Також слід зазначити, що об'ємні скінченні елементи, котрі використовують за замовчуванням для дискретизації твердотільної геометрії, можуть бути високої якості (параболічні) та низької якості (лінійні), як це показано на рис. 3.4.



а



б

Рис. 3.4 Об'ємні скінченні елементи SolidWorks Simulation: а – лінійні (нижчого порядку, чорнові); б - параболічні (вищого порядку)

Для визначення типу дослідження проаналізуємо силов фактори, які сили виникають в зачепленні, та через вали і підшипники передаються на корпус редуктора.

Визначимо колову силу на шестерні і колесі та радіальну силу на шестерні та колесі за формулами:

$$F_{t1} = F_{t2} = \frac{2 * T_1}{d_1} \quad [13]$$

$$F_{r1} = F_{r2} = F_{t1} * \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \quad [13]$$

Для розрахунку цих формул, маємо наступні вихідні дані

Ділильний діаметр шестерні (d_1) - 150 мм

Міжосьова відстань - 315 мм, вона є сумою ділильних діаметрів шестерні та колеса, що поділені на 2, отже - 480 мм: $\frac{150+480}{2} = 315$. [13]

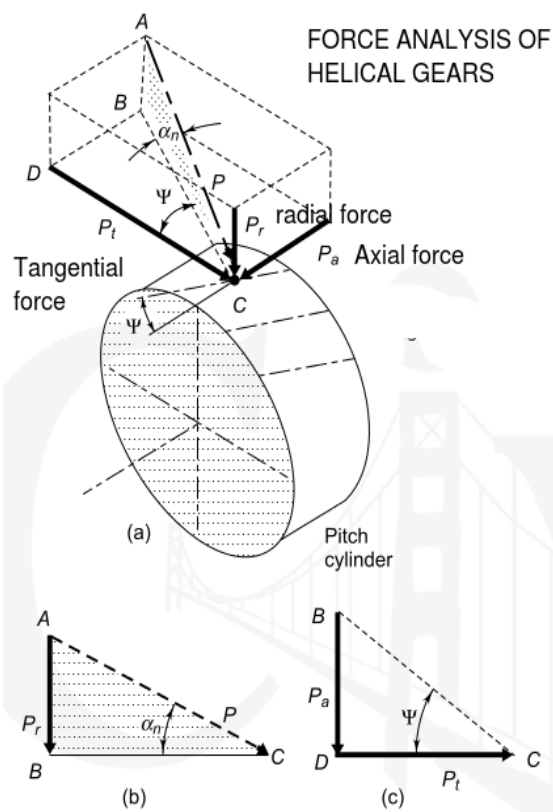


Рис.3.5. Аналіз сил при косоzubого зубчастого зачеплення [21]

Передавальне відношення: $u = \frac{480}{150} = 3,2$ [13]

Модуль шестерні: $m_1 = \frac{d_1}{Z_1} = \frac{150}{20} = 7.5$ [13]

Модуль колеса: $m_2 = \frac{d_2}{Z_2} = \frac{480}{64} = 7.5$ [13]

Швидкохідний вал має 1500 об/хв (n_1), розрахуємо оберти на тихохідному валі:

$$n_2 = \frac{1500}{3,2} = 470 \text{ об/хв [13]}$$

Потужність на вході (P) - 60 кВт

розрахуємо крутний момент на вході: $T_1 = \frac{9550 \cdot P}{n_1} = \frac{9550 \cdot 60}{1500} = 382 \text{ Нм [13]}$

На виході: $T_2 = T_1 \cdot u = 382 \cdot 3.2 = 1222 \text{ Нм [13]}$

За цими даними розрахуємо колову силу на шестерні і колеса та радіальну силу на шестерні та колеса:

$$F_{t1} = F_{t2} = \frac{2 \cdot T_1}{d_1} = \frac{2 \cdot 382 \cdot 10^3}{150} = 5093 \text{ Н [13]}$$

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

$$F_{r1} = F_{r2} = F_{t1} * \frac{\cos\alpha_{20}}{\cos\beta_{10}} = 5093 * \frac{0.3640}{0.9848} = 1881 \text{ Н} \quad [13]$$

3.4.1. Визначення реакцій опор

Реакції в опорах А і В, Н: – в площині :

- в площині ХZ:

$$R_{XA} = R_{XB} = \frac{F_{t1}}{2}$$

$$R_{XA} = R_{XB} = \frac{5093}{2} = 2546.5$$

- в площині YZ:

$$R_{YA} = \frac{F_{r1} * l_1 + 0.5F_{a1} * d_1}{2l_1}$$

$$R_{YA} = \frac{1881 * 172,5 + 0,5 * 1777 * 150}{2 * 172,5} = 1327$$

$$F_{t1} = \frac{2T_2}{d_2} = \frac{2 * 1222 * 10^3}{480} = 5092 \text{ Н}$$

$$F_{a1} = F_{t2} * \tan\beta = 5092 * 0.349 = 1777 \text{ Н}$$

$$R_{YB} = \frac{F_{r1} * l_1 - 0.5F_{a1} * d_1}{2l_1}$$

$$R_{YB} = \frac{1881 * 172,5 - 0,5 * 1777 * 150}{2 * 172,5} = 554$$

Сумарні реакції в опорах, Н:

$$F_{rA} = \sqrt{R_{XA}^2 + R_{YA}^2}$$

$$F_{rA} = \sqrt{2546.5^2 + 1327^2} = 3873 \text{ Н}$$

$$F_{rB} = \sqrt{R_{XB}^2 + R_{YB}^2}$$

$$F_{rA} = \sqrt{2546.5^2} + \sqrt{554^2} = 3100 \text{ Н}$$

3.5 Визначення виду дослідження

Так як в нашому випадку всі силові фактори прикладаються повільно та поступово до моменту досягнення максимального значення, а після цього не змінюють значення, то дане дослідження вважаємо статичним.

Також для всіх матеріалів в дослідженні виконується закон Гука (фізична нелінійність)[22], а деформації, котрі виникають в моделі, є малі і не впливають на жорсткість, а також не змінюється характер закріплення чи інших граничних умові під дією навантаження (конструктивна нелінійність). На основі останнього обґрунтовано тип дослідження, а саме – лінійна статика.

3.7. Виконання топологічної оптимізації корпусу редуктора

3.7.1. Статичне дослідження деталі

Для початку створимо нове дослідження Solidworks Simulation. Для того, щоб дослідити деталь “верхня кришка одноступінчастого редуктора” створимо додаткову площину, та зафіксуємо її з базовою установчою площиною А, за допомогою прив’язки “coincident”. Після цього, додамо додаткову фіксацію болтами на місцях, де є отвори під кріпильні болти, з допомогою команди віртуальних болтових з’єднувачів, як це показано на рис. 3.4.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

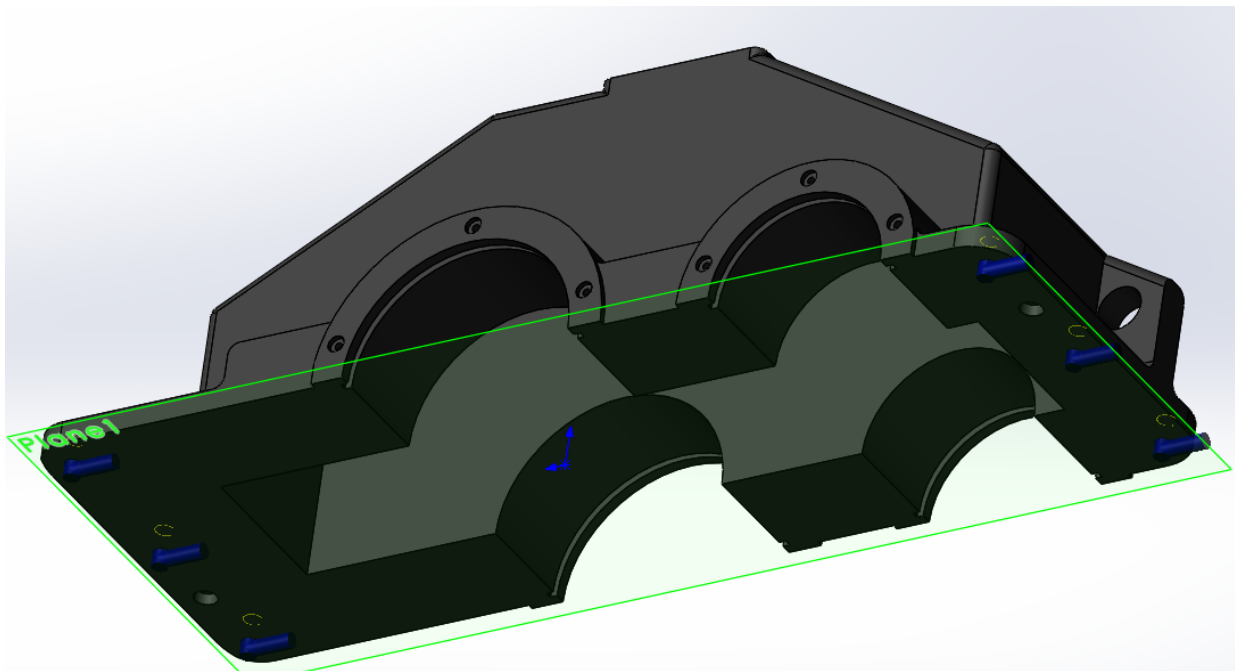


Рис. 3.6. Додавання додаткової площини та болтів для закріплення верхньої кришки до віртуальної площини, що імітує нижню частину редуктора.

Слід зауважити, що між віртуальною площиною та плоскою поверхнею редуктора встановлені умови взаємодії «Virtual Wall»

Після цього були прикладені сили в опорах корпусу, які попередньо визначені як реакції опор на дію силових факторів, що виникають в зубчастому з'єднанні. Для реалізації прикладення отриманих реакцій в опорах використано команду “Bearing Load”, що дозволила прикласти силу, яка була обрахована в розділі 3.3.1 до отворів під підшипники, рис. 3.5 та встановити відповідне значення сили.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

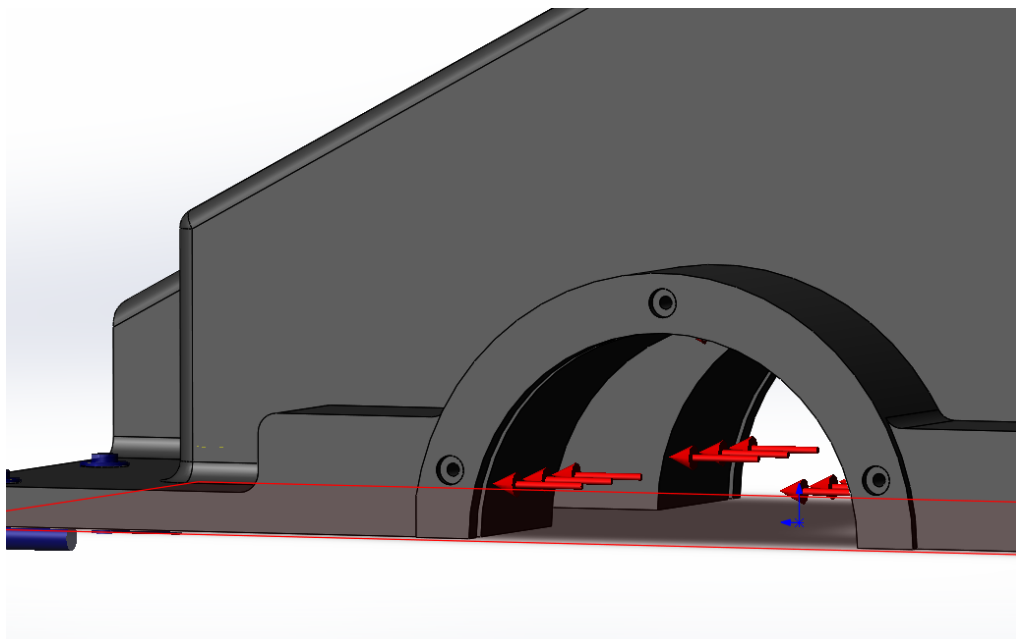


Рис. 3.7. Статичне дослідження реакцій в опорах.

Джерело: розроблено автором

Прикладаємо силові фактори для всіх отворів під підшипники, як це показано на рис. 3.6

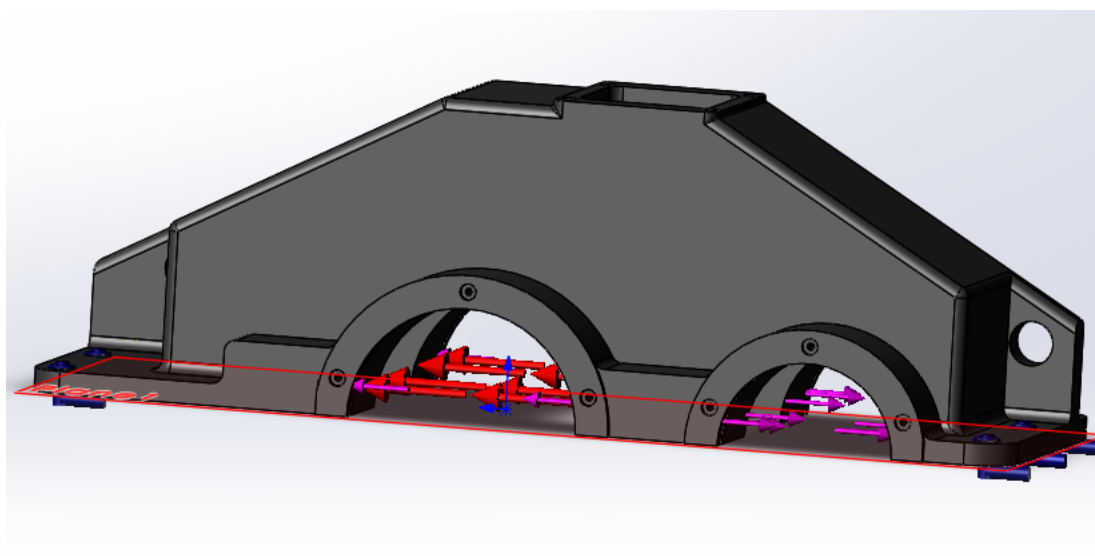


Рис. 3.8. Прикладання сил до отворів під підшипники.

Джерело: розроблено автором

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

Після цього, можемо запускати дослідження. Результати дослідження показані на рис. 3.7

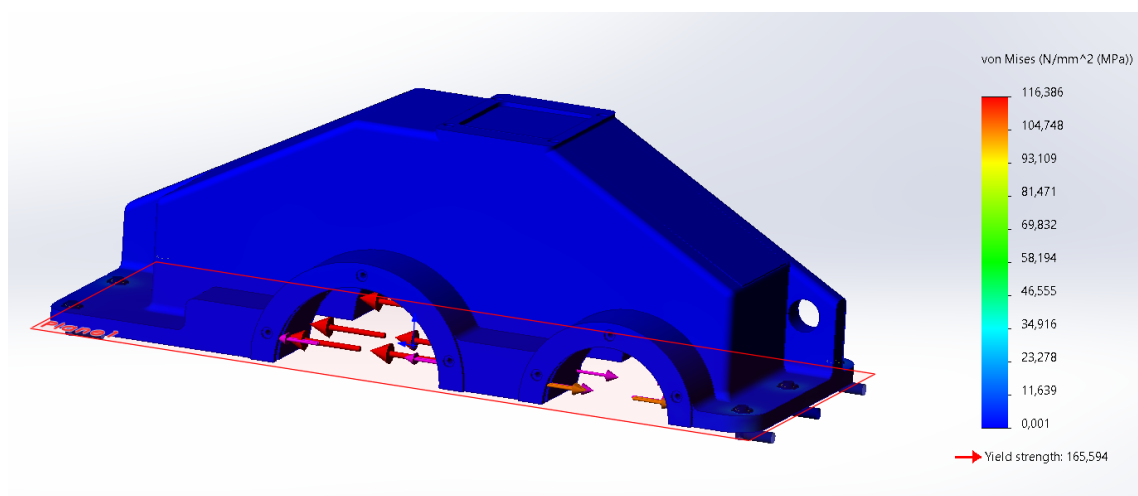


Рис. 3.9. Результати статичного дослідження.

Джерело: розроблено автором

3.7.2. Опис моделі та умов дослідження

Дослідження топології проводилось на 3D-моделі верхньої частини корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора, розробленої, як уже зазначалось, в програмному середовищі SolidWorks. Модель представляє собою складну геометрію з отворами для кріплення та дугоподібними виїмками, що забезпечують розміщення валів редуктора, рис. 3.8.

Основним параметром оптимізації було встановлено зменшення маси деталі на 30%, що відповідає вимогам до зниження ваги при збереженні механічної міцності.

Для забезпечення високої точності обчислень використано чистову сітку скінченних елементів (fine mesh), яка дозволила деталізувати геометрію моделі, включаючи тонкі ребра та переходи. Процес топологічного аналізу проводився в модулі SolidWorks Simulation з урахуванням статичного навантаження, симуюючого робочі умови редуктора. Загальна тривалість обчислень склала 7 годин 34 хвилини, що свідчить про високу складність моделі та деталізацію сітки рис. 3.9.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

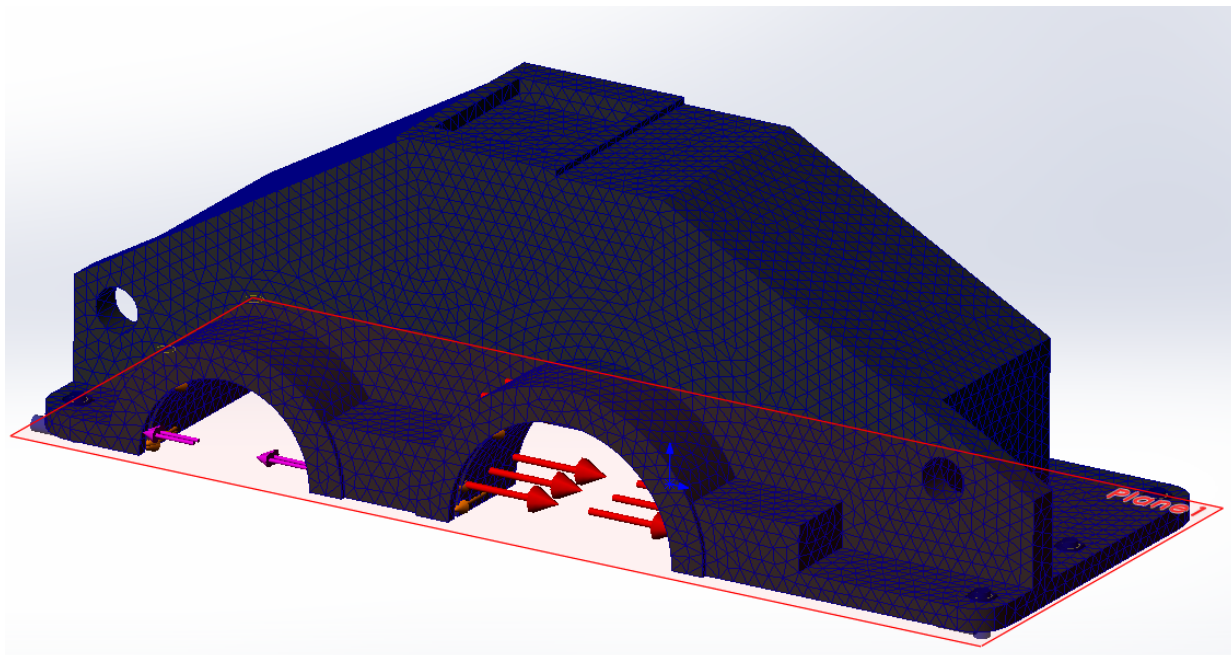


Рис. 3.10. Сітка скінченних елементів.

Джерело: розроблено автором

3.7.3. Прецес виконання

На початковому етапі модель деталі була проаналізована для визначення критичних зон, таких як місця кріплення та опори валів. Внутрішня "бобишка" була спроектована як замкнутий об'єкт, що визначав цільову форму деталі після оптимізації, дозволяючи алгоритму вільно видаляти матеріал у межах цієї зони рис. 3.10. Водночас, для захисту ключових областей (наприклад, отворів та дугоподібних виїмок) використано команду "Manufacturing Controls" із опцією "Add Reserved Region", яка забезпечила збереження цих елементів від змін рис. 3.11.

У модулі SolidWorks Topology Study задано цільове зменшення маси на 30%, що було обрано з урахуванням балансу між вагою та жорсткістю конструкції. Матеріал деталі визначено як чавунну відливку, із властивостями, отриманими з бібліотеки матеріалів SolidWorks. Обмежувальна геометрія та "reserved region" були інтегровані в налаштування для точного керування процесом оптимізації.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		93

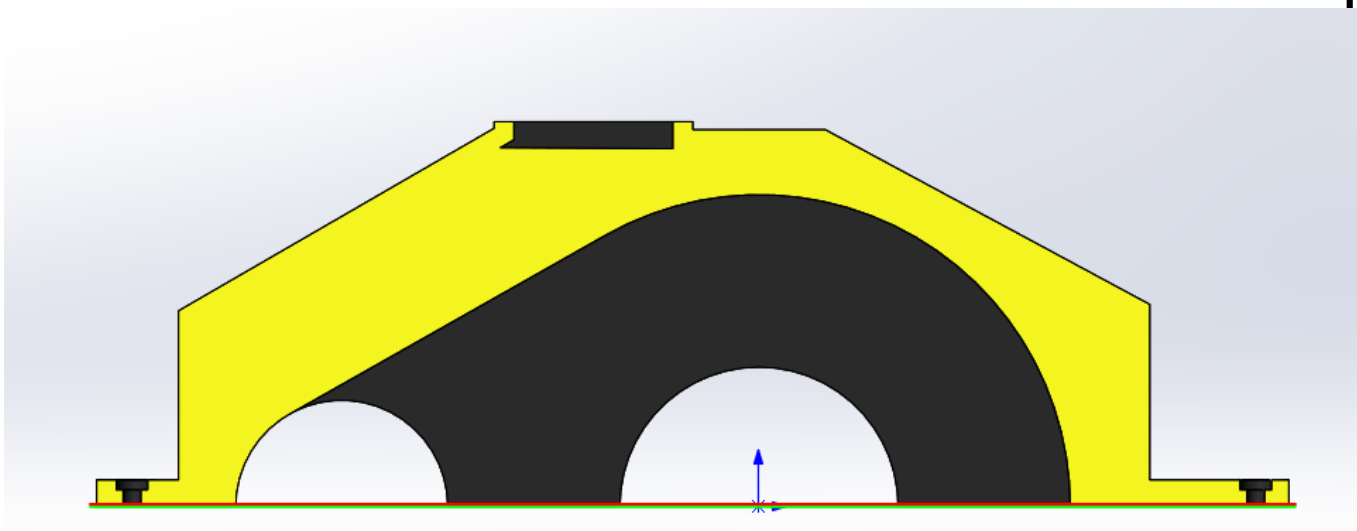


Рис. 3.11. Внутрішня додаткова геометрія

Джерело: розроблено автором

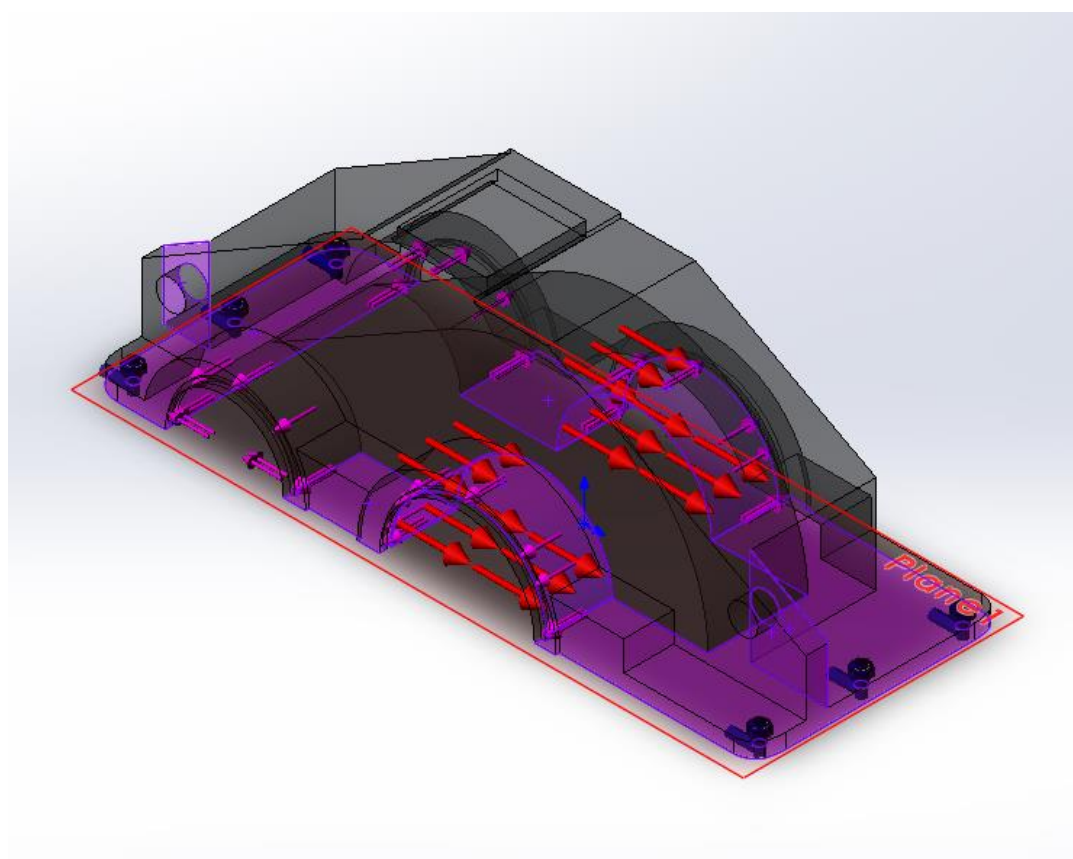


Рис. 3.12. Команда «Add Reserved Region».

Джерело: розроблено автором

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		94

Після підготовки моделі сформовано чистову сітку з високою роздільною здатністю, що включала деталізацію внутрішніх і зовнішніх поверхонь. Кількість елементів сітки складала 146990 од., що забезпечило точність обчислень. Аналіз запущено з використанням обчислювальних ресурсів системи, і процес тривав 7 годин 34 хвилини через складність геометрії та щільність сітки. Деталі сітки показані на рис. 3.12.

Mesh Details	
Study name	Topology Study 1* (-По умолчанию-)
DetailsMesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 points
Max Element Size	13,0116 mm
Min Element Size	13,0116 mm
Mesh quality	High
Total nodes	146990
Total elements	96502
Maximum Aspect Ratio	428
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	99,1
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0,205

Рис. 3.13. Деталі створення сітки скінченних елементів.

Джерело: розроблено автором

3.7.4. Результати

В результаті топологічного дослідження отримано оптимізовану геометрію деталі, де надлишковий матеріал був видалений у зонах, визначених "бобишкою", зберігаючи цілісність областей, позначених як "reserved region". Оптимізація призвела до утворення внутрішніх порожнин і тонших стінок у не критичних областях, зберігаючи опорні поверхні та зони кріплення рис. 3.14 (а, б, в, г, д).

Зменшення маси досягло цільового показника 30%, що підтверджено даними SolidWorks Simulation.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		95

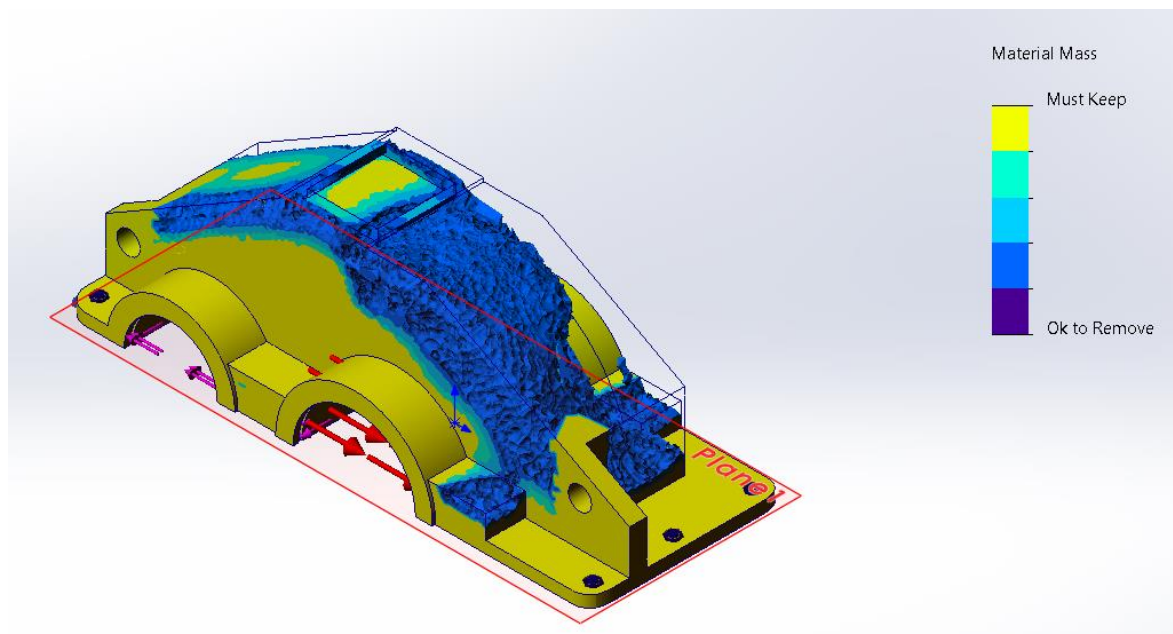


Рис. 3.14. Результати топологічного дослідження а

Джерело: розроблено автором

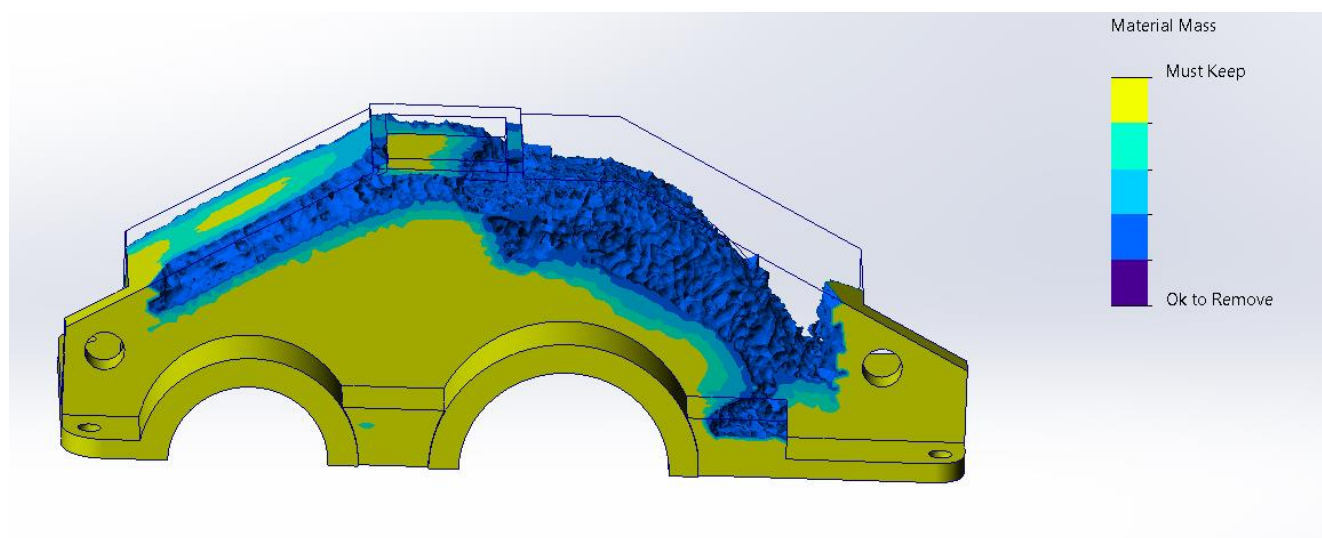


Рис. 3.14. Результати топологічного дослідження б

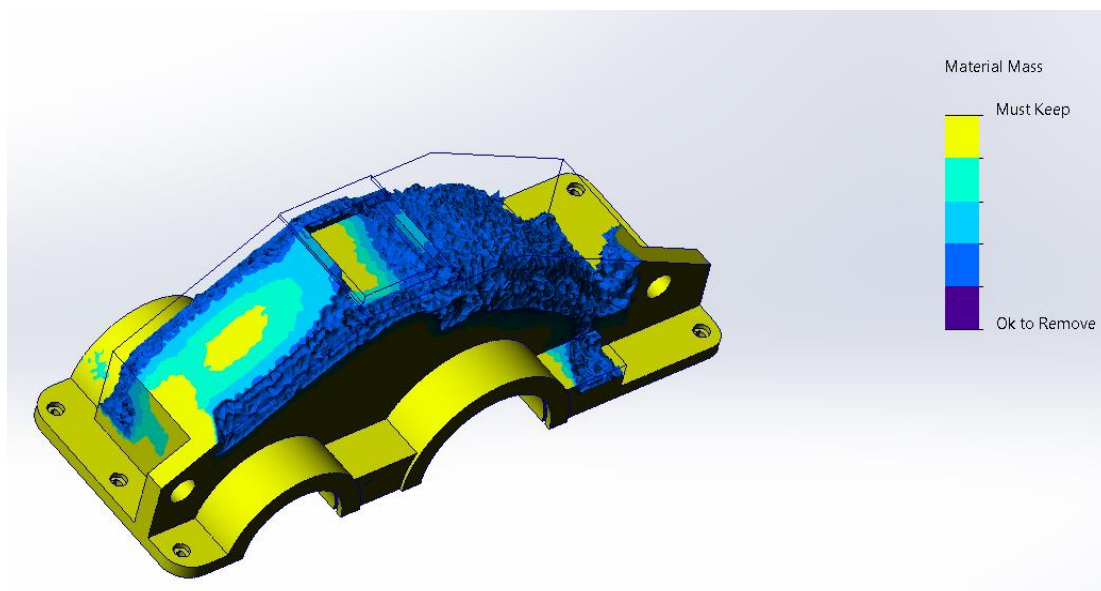


Рис. 3.14. Результати топологічного дослідження в

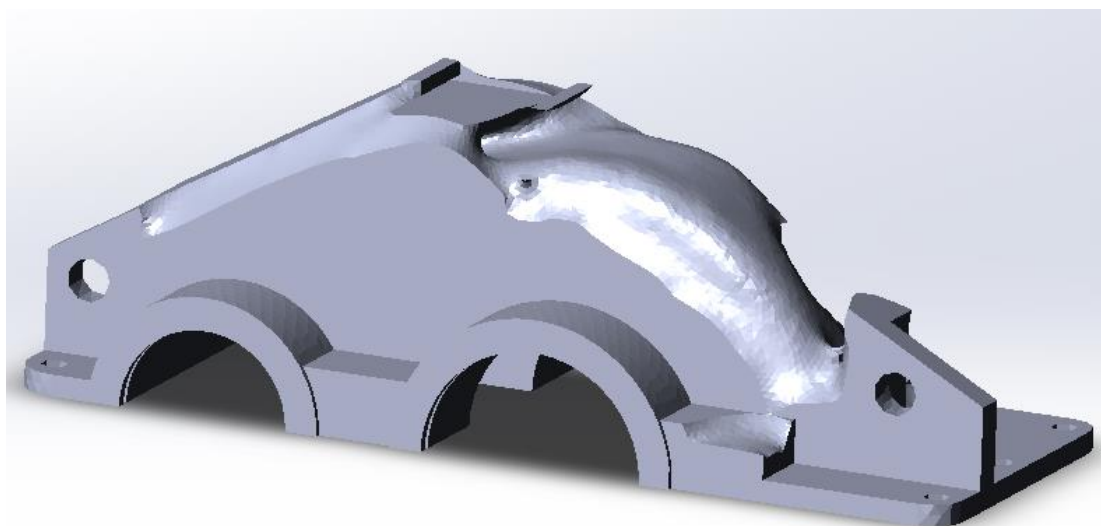


Рис. 3.14. Результати топологічного дослідження г

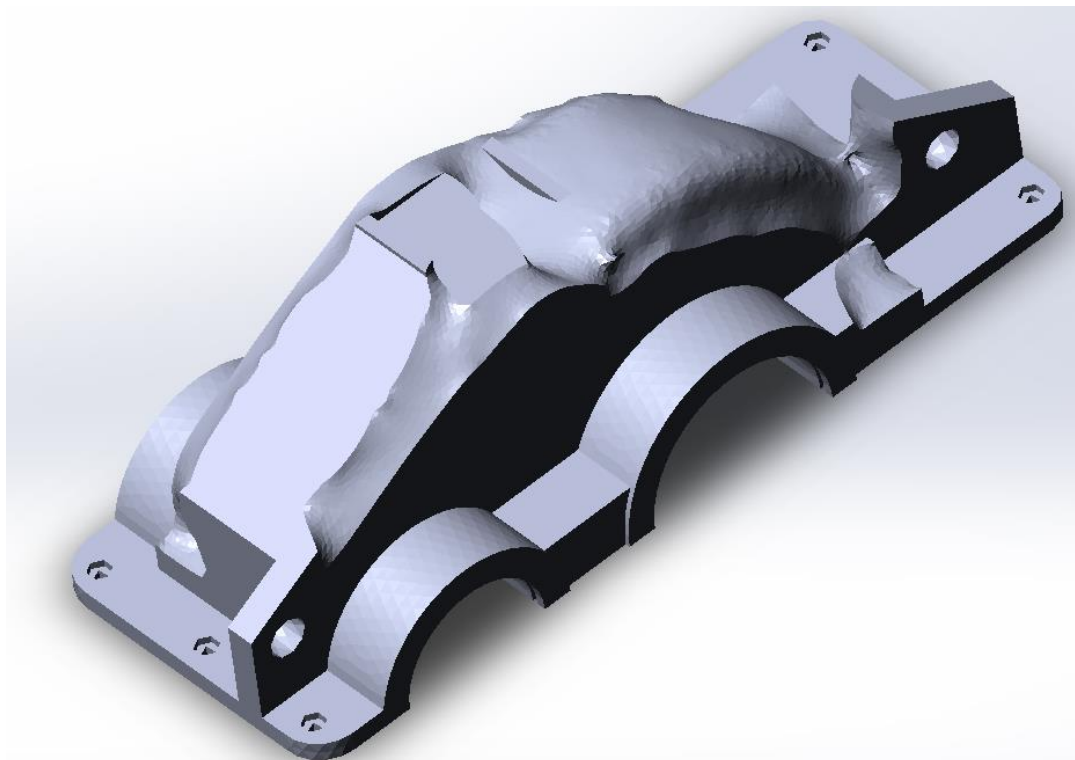


Рис. 3.14. Результати топологічного дослідження

Аналіз максимальних напружень показав, що значення залишались у межах допустимих для вибраного матеріалу, а деформації не перевищували встановлених лімітів.

Висновки до розділу 3

Нові можливості в сучасних САПР дозволяють інженеру-машинобудівнику знаходити найкращий розподіл матеріалу в заданій формі для, наприклад, найкращого співвідношення маси до жорсткості, що і було реалізовано в даному розділі.

Перед виконанням топологічної оптимізації засобами solidwork simulation було виконано лінійне статичне дослідження верхньої частини корпусу редуктора. Для виконання даного дослідження було проведено розрахунки силових факторів, які виникають в косозубому зубчастому зачепленні, а на їх основі були розраховані реакції в опорах, які виникають внаслідок дії вказаних силових факторів.

Для пришвидшення розрахунків нижню частину корпусу редуктора було замінено на віртуальну стінку. Для цього було створено додаткову площину, яка

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		98

співпадає з площиною, що є базою А для верхньої кришки корпусу редуктора. Між створеною площиною та плоскої поверхнею базою А був створений відповідний тип контакту, після чого застосовані з'єднувачі, які називаються болт основи. Виконані попередні статичні дослідження даної конструкції показали загальну картину напружено деформованого її стану.

В завершальному етапі даного розділу була виконана топологічна оптимізація результати якої продемонстровані на рисунку 3.13. На основі отриманих результатів обґрунтовано подальше удосконалення конструкції верхньої кришки редуктора, на основі кращого розуміння оптимального розподілу матеріалу в заданій формі, для забезпечення найкращого співвідношення маси до жорсткості

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99

ВИСНОВОК ДО БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

На основі порівняння існуючих аналогів редукторів визначено їхні конструктивні особливості, сильні та слабкі сторони, що дозволило окреслити можливі напрями удосконалення конструкції корпусу одноступінчастого циліндричного редуктора з урахуванням вимог підвищення технологічності, жорсткості та зручності складання.

Окрему увагу було приділено вибору типу з'єднання вала з передавальними елементами. Розглянуто різні типи шпонок (призматичні, клинові, сегментні тощо), їх переваги та обмеження. В результаті аналізу конструкції редуктора, умов навантаження, було прийнято рішення про застосування призматичної шпонки як найбільш надійного і універсального рішення для заданих умов роботи.

На основі сучасних підходів щодо визначення параметрів геометричних моделей (визначення на основі моделі - MBD), що включає визначення розмірів та геометричних допусків на 3D моделях, встановлені бази, а також визначені розміри та геометричні допуски для поверхонь, що механічно обробляються. На основі базового редуктора на напрацьованих підходів щодо геометричних вимог функціональних поверхонь редуктора, створено тривимірну 3D-модель корпусу редуктора в середовищі SolidWorks, яка враховує всі ключові конструктивні вимоги: посадкові гнізда, монтажні отвори, ребра жорсткості, кріплення та точність взаємного розташування елементів.

На основі аналізу технологічності деталі, властивостей матеріалу деталі та інших факторів розроблено маршрутний технологічний процес виготовлення деталі.

З урахуванням точності розмірів, форми та розташування елементів деталі обрано спосіб отримання заготовки, розраховано її допуски та визначено припуски на механічну обробку.

Режими різання розраховано на основі калькулятора режимів різання компанії Sandvic Coromant, підібрано металорізальне обладнання та інструмент.

					MI 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нові можливості в сучасних САПР дозволяють інженеру-машинобудівнику знаходити найкращий розподіл матеріалу в заданій формі для, наприклад, найкращого співвідношення маси до жорсткості, що і було реалізовано в даному розділі.

Перед виконанням топологічної оптимізації засобами solidworks simulation було виконано лінійне статичне дослідження верхньої частини корпусу редуктора. Для виконання даного дослідження було проведено розрахунки силових факторів, які виникають в косозубому зубчастому зачепленні, а на їх основі були розраховані реакції в опорах, які виникають внаслідок дії вказаних силових факторів.

Для пришвидшення розрахунків нижню частину корпусу редуктора було замінено на віртуальну стінку. Для цього було створено додаткову площину, яка співпадає з площиною, що є базою А для верхньої кришки корпусу редуктора. Між створеною площиною та плоскою поверхнею базою А був створений відповідний тип контакту, після чого застосовані з'єднувачі, які називаються болт основи. Виконані попередні статичні дослідження даної конструкції показали загальну картину напружено деформованого її стану.

В завершальному етапі даної бакалаврської роботи була виконана топологічна оптимізація результати якої продемонстровані на рисунку 3.13. На основі отриманих результатів обґрунтовано подальше удосконалення конструкції верхньої кришки редуктора, на основі кращого розуміння оптимального розподілу матеріалу в заданій формі, для забезпечення найкращого співвідношення маси до жорсткості.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		101

Список використаних джерел

1. Передавальне число циліндричних, конічних і циліндро-конічних редукторів. Конструктивні рішення [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://stud.com.ua/176602/tehnika/peredavalne_chislo_tsilindrichnih_konichnih_tsilindrichnih_reduktoriv_konstruktivni_rishennya.
2. Будова трьохступінчастого циліндричного редуктора [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://xn--80aqy.com.ua/reduktory/podrobnee_o_reduktorakh_ts2u/.
3. Орлов П. І. Основи конструювання. Книга 2. Шпонкові з'єднання [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://chertezhi.zp.ua/index.php/literatura/83-proektirovanie/detali-mashin/538-orlov-p-i-osnovy-konstruirovaniya>.
4. Форма і розміри призматичної шпонки та шпонкового паза [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.nbk1560.com/en/resources/other/article/technical-09-keys-and-their-corresponding-keyways/>.
5. Остапчук І. Ю., Данюк В. М., Отаманський В. В., Мельник О. Л. Перспективи використання топологічної оптимізації у машинобудуванні [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/05/2.-per-vy-roz-ku-mashynobud.-in-riyi...-s.-2.pdf>.
6. ТОВ “Завод Базальт” [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.basalt-tov.com/ooo-zavod-bazalt>.
7. Завод “Укрмотор” [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ukrmotor.in.ua/about_us.
8. Слобожанський завод черв'ячних редукторів [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zavod-slemz.com>.
9. GSM Україна [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://gsm-ukraine.com/uk>.
10. SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG. Редуктори [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sew-eurodrive.ua/produkty/reduktory/reduktory.html>.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Bonfiglioli Riduttori S.p.A. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.oborud.info/brands/?t=748>.

12. Flender GmbH [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.sumitomodrive.com/en-us>.

13. Sumitomo Drive Technologies [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://promprivod.org/ru-kg/brands/sumitomo-drive-technologies>.

14. Головня В. Д., Виговський Г. М., Балицька Н. О. Деталі машин. Курсове проектування: навч.-метод. посіб. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/94867/mod_resource/content/1/Навчально-методичний%20посібник%20Деталі%20машин.%20Курсове%20проектування.pdf.

15. Perpendicularity [Електронний ресурс]. GD&T Basics. Режим доступу: <https://www.gdandtbasics.com/perpendicularity/>.

16. Допуски, посадки та технічні вимірювання. Практикум. Частина 1: навч. посіб. / Ю. І. Адаменко, О. М. Герасимчук, С. В. Майданюк, Н. В. Мініцька, В. А. Пасічник, О. А. Плівак. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/30119/1/VSTV_T.1_2019.pdf.

17. Фізичні та хімічні властивості СЧ20 та СЧ25 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://evек.com.ua/materials/chugun-sch25.html>.

18. Кирилович В. А., Мельник О. Л., Мельничук П. П., Яновський В. А. Заготовки деталей машин: формоутворення, параметри, характеристики. Частина 1 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/104260/mod_resource/content/5/ЗАГОТОВКИ%20ДЕТАЛЕЙ%20МАШИН_ФОРМОУТВОРЕННЯ,%20ПАРАМЕТРИ,%20ХАРАКТЕРИСТИКИ.%20Частина%201.pdf.

19. Характеристика верстату HAAS VF-4 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://vitcompany.com.ua/stanki/stanki-frezernye-s-chpu/vertikalno-frezernye-stanki/vertikalno-frezernyy-standok-s-chpu-haas-vf-4-ss-id15437.html>.

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		103

20. Характеристика верстату TOS WHN 13.8 CNC [Електронний ресурс].
Режим доступу: <https://vitcompany.com.ua/stanki/gorizontalno-rastochnye-stanki/gorizontalno-rastochnoy-standok-s-chpu-tos-wnh-13-id15803.html>.

21. Розрахунок режимів різання [Електронний ресурс]. Sandvik Coromant.
Режим доступу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb>.

22. Аналіз сил при косоzubого зубчастого зачеплення [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://msbte.engg-info.website/helical-gear-design>.

23. Автоматизоване проектування елементів автотранспортних засобів та засобів їх діагностування: навч. посіб. / О. М. Артюх, О. В. Дударенко, В. В. Кузьмін та ін. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 540 с

					МІ 131.00.1/Б 102/с 008 00-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		104

ДОДАТКИ

[illegible]