

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Механіко-машинобудівний

(факультет)

Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну

(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

кваліфікаційної роботи ступеня бакалавра

(бакалавра, спеціаліста, магістра)

Студентки Крилова Ярослава Владленовича

(ПІБ)

академічної групи 132-22ск-2 ММФ

(шифр)

спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і назва спеціальності)

спеціалізації за освітньо-професійною програмою _____

(за наявності)

«Промислова естетика і сертифікація матеріалів та виробів»

(офіційна назва)

на тему “Обґрунтування матеріалу виготовлення колеса черв’ячної передачі редуктора”

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Федоряченко С.О.			
розділів:				
Аналіз стану питання та постановка задач роботи	Федоряченко С.О.			
Функціональний аналіз та моделювання об’єкта розробки	Федоряченко С.О.			
Інженерно- технологічний	Ротт Н.О.			
Експлуатаційний	Федоряченко С.О.			
Рецензент				
Нормоконтролер	Вернер І.В.			

Дніпро
2025

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри
конструювання, технічної
естетики і дизайну
(повна назва)

_____ Федоряченко С.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

«_____» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеню бакалавра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студентці Крилову Ярославу Владленовичу академічної групи 132-22ск-2 ММФ
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 132 Матеріалознавство
спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою «Промислова естетика і сертифікація матеріалів та виробів»

на тему «Обґрунтування конструкції та матеріалу виготовлення інсталяції СЕС»
затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 14.05.2025р.
№369-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Аналіз стану питання та постановка задач роботи	Аналіз розвитку сонячної енергетики в Україні, її екологічні переваги та можливості інтеграції сонячних установок у міське середовище	20.05.2025
Функціональний аналіз та моделювання об'єкта розробки	Аналіз ергономічних та функціональних характеристик інсталяції з сонячними панелями; 3D-моделювання конструкції.	05.06.2025
Інженерно-технологічний	Обґрунтування матеріалу виготовлення антикорозійного покриття; формування правил монтажу конструкції; методів з'єднання елементів і технології захисту від зовнішніх впливів.	15.06.2025
Експлуатаційний	Обґрунтування правил експлуатації та розрахунок захисного заземлення	20.06.2025

Завдання видано _____
(підпис керівника)

Федоряченко С.О.
(прізвище, ініціали)

Дата видачі 14.05.2025

Дата подання до екзаменаційної комісії 23.06.2025

Прийнято до виконання _____

Крилов Я.В.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: ___ с, ___ мал, ___ табл, ___ джерел.

ЛІФТОВА УСТАНОВКА, РЕДУКТОР, НАДМІЦНИЙ ЧАВУН, МЕТОД КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН

Об'єкт дослідження – редуктор механізму ліфтової установки.

Мета роботи – забезпечення високого ресурсу картеру редуктора шляхом заміни сірого чавуну на надміцний чавун із шаровидним графітом.

Результати та їх новизна – обґрунтовано конструкцію можливість використання надміцного чавуну як матеріалу для виготовлення коліс та корпусів редукторів.

Сфера застосування розробки – редуктори підйомних механізмів, які працюють в умовах агресивного середовища та високих динамічних навантажень..

Практична значимість кваліфікаційної роботи – підвищення техніко-експлуатаційних властивостей машин, які використовують черв'ячні редуктори.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОБОТИ.....	5
1.1 Аналіз умов експлуатації черв'ячних передач.....	5
1.2 Аналіз конструкції черв'ячної передачі.....	7
1.3. Аналіз режимів експлуатації редуктора приводу ліфтової установки	9
1.4 Застосування надміцних чавунів для отримання виливок деталі редуктора....	11
1.5 Постановка задач дослідження	15
2. ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА РОЗРОБКИ	16
2.1 Функціонально вартісний аналіз	16
2.2 Моделювання об'єкта розробки	19
2.3 Висновок за розділом.....	21
3 ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	22
3.1 Інженерний розрахунок редуктора.....	22
3.2 Дослідження напружено-деформованого стану редуктора	29
3.3 Обґрунтування вибору матеріалу та технології отримання деталі черв'ячного колеса.....	35
3.4 Висновки за розділом.....	40
4 ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ.....	41
4.1 Забезпечення якості виробу	41
4.2 Контрольовані параметри виливок.....	42
4.3 Метрологічне забезпечення проведення дослідження	44
4.4 Порядок проведення ультразвукового контролю	48
4.5 Аналіз результатів контролю	49
4.6 Висновки за розділом.....	52
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	54

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОБОТИ

1.1 Аналіз умов експлуатації черв'ячних передач

Для забезпечення ефективної та довговічної роботи черв'ячних передач важливим є вибір матеріалів. Найчастіше черв'як виготовляється з легованої або цементованої сталі з високою твердістю, тоді як колесо — з бронзи, латуні або антифрикційного чавуну. Така комбінація дозволяє досягати необхідного зносу стійкості, плавності ходу та надійності при високих навантаженнях. У галузях промисловості, де обладнання працює в умовах підвищеної запиленості, вологості та вібрації, використання якісних матеріалів у черв'ячних передачах стає критично важливим для уникнення простоїв і забезпечення безпеки праці.

На підприємствах активно впроваджується схема конвеєризації та перевантаження малими підйомними установками, комбіновані транспортні системи та рейкове транспортування матеріалів і персоналу. У всіх цих системах широко застосовуються редуктори з черв'ячними передачами, що забезпечують необхідне передатне відношення при компактних габаритах, а також підвищену стійкість до навантажень.

Таким чином, інтеграція сучасних матеріалів у виробництво черв'ячних передач є одним з ключових чинників ефективної роботи гірничого обладнання в складних умовах експлуатації, що, в свою чергу, сприяє стабільному функціонуванню промисловості в цілому

У таких умовах критично важливим є застосування надійного обладнання, зокрема механізмів з черв'ячними передачами. Ці передачі активно використовуються в редукторах, які встановлюються у приводах ліфтових установок, транспортерів, підйомних і навантажувальних систем. Їх головна перевага — здатність забезпечувати значне передатне відношення при малих розмірах, що дозволяє застосовувати їх у вузьких та важкодоступних виробках.

Якість і довговічність черв'ячних передач значною мірою залежить від матеріалів, з яких вони виготовлені. Найчастіше черв'як виготовляється зі сталей з високою твердістю (наприклад, легована або цементована сталь), тоді як черв'ячне

колесо — з бронзи або латуні, які мають гарні антифрикційні властивості. Така комбінація матеріалів забезпечує зниження зносу, стійкість до ударних навантажень та тривалу безвідмовну роботу обладнання у складних умовах шахтного середовища.

Таким чином, ефективне використання черв'ячних передач у системах транспорту є важливою умовою для стабільного функціонування промисловості, підвищення продуктивності робіт та зниження ризику аварій у складному геологічному середовищі.

Ключову роль у забезпеченні стабільної роботи таких ліфтових установок відіграють механізми з черв'ячними передачами. Вони використовуються в приводах редукторів, системах подачі, натягу, повороту та переміщення агрегатів. Основними перевагами черв'ячних передач є компактність, плавність ходу, високий момент, що передається, та здатність до самотормозіння — особливо важлива функція при роботі в похилих виробках.

Вибір матеріалів для черв'ячних передач є критичним чинником їх надійності. Черв'яки зазвичай виготовляють із загартованих легованих сталей (наприклад, 40Х або 38ХН3МФА), що забезпечує необхідну твердість робочої поверхні, тоді як черв'ячні колеса — з бронзи типу БрАЖ9-4 або БрОФ10-1, завдяки її чудовим антифрикційним властивостям. Такий матеріальний тандем знижує тертя та знос, подовжує строк служби вузлів і зменшує потребу в технічному обслуговуванні.

Особливо актуальним є застосування черв'ячних передач у вузлах, де компактність і точність передавання моменту мають критичне значення — наприклад, у механізмах повороту різальних головок ліфтових установок або системах регулювання швидкості подачі. Завдяки цьому підвищується не лише ефективність робіт, а й загальна надійність виробничого процесу.

Таким чином, оптимізація технологічних схем транспорту та широке впровадження якісних черв'ячних передач, виготовлених із сучасних зносостійких матеріалів, є запорукою підвищення ефективності функціонування прохідницького обладнання в умовах складної гірничої геології.

1.2 Аналіз конструкції черв'ячної передачі

Черв'ячна передача (рис. 1.1) — різновид зубчастої передачі, що забезпечує передавання обертального моменту між мимобіжними в просторі валами, осі яких перетинаються під прямим кутом.



Рисунок 1.1 –Черв'ячна передача

Черв'ячна передача містить два основні елементи: гвинтоподібний черв'як і черв'ячне колесо — зубчастий вінець із ввігнутими косозубими зубцями. Обертальний момент передається за рахунок дії гвинтової пари, де черв'як виконує функцію гвинта, а колесо, що нагадує згнутий по колу фрагмент довгої гайки, слугує «гайкою» цієї пари.

Зазвичай саме черв'як є ведучим елементом, завдяки чому передача забезпечує значне зниження частоти обертання вихідного валу; однак у ряді конструкцій можливий і зворотний напрямок передачі від колеса до черв'яка.

Контакт між витками черв'яка та зубцями черв'ячного колеса відбувається не точково, а по лінії, з помітним тертям і ковзанням. Через великі втрати на тертя такі передачі використовують переважно для малих і середніх потужностей (до 50 кВт), хоча відомі й виконання на 200 кВт. При цьому легко реалізуються передаточні відношення в діапазоні $u = 7 \dots 100$ і вище.

Матеріали, використані в конструкції ліфтової установки, відіграють важливу роль у забезпеченні його надійності та довговічності. Основні вузли — стріла, рама, корпуси — виготовлені з високоміцних сплавів чорного металу, таких

як конструкційна сталь і сірий чавун. Сталь забезпечує необхідну ударну в'язкість та витривалість до динамічних навантажень, у той час як чавун використовується для виготовлення масивних литих елементів, які потребують жорсткості та стабільності. Проте застосування чавуну супроводжується певними обмеженнями — високою густиною, що ускладнює транспортування, та обмеженою стійкістю до ударів.

Крім того, в механічних вузлах приводу ліфтової установки широко використовуються черв'ячні передачі, що є критично важливими для точного регулювання руху окремих елементів — зокрема механізмів стріли, конвеєра або приводів допоміжних систем. Черв'ячні пари дозволяють отримати високий передаточний момент у компактному корпусі, працюючи майже безшумно та забезпечуючи функцію самогальмування — важливу для фіксації положення під навантаженням.

Для виготовлення черв'яків застосовують термічно оброблену леговану сталь (наприклад, 38ХН3МФ або 20Х2Н4А), що забезпечує високу зносостійкість. Черв'ячні колеса традиційно виготовляються з бронзи марок БрОФ10-1 або БрАЖ9-4, які демонструють хороші антифрикційні властивості та сумісність із сталевими черв'яками. Таке поєднання матеріалів знижує коефіцієнт тертя, зменшує нагрів і підвищує довговічність передачі.

Одним із ключових конструкційних матеріалів, що застосовується при виготовленні несучих елементів ліфтової установки, зокрема стріли та рами, залишається чавун. Зокрема, сірий чавун завдяки своїм литтєвим властивостям широко використовується для формування складних геометричних форм у важких деталях. Його жорсткість і віброємність є перевагами у певних умовах експлуатації, однак існує й низка обмежень.

До основних недоліків сірого чавуну, які безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики техніки, належать низька ударна в'язкість та слабкий опір до динамічних навантажень порівняно зі сталлю. Це особливо критично для гірничих машин, що працюють у складних умовах постійних вібрацій і механічних навантажень. Висока питома маса чавунних деталей створює

труднощі під час транспортування й монтажу, збільшуючи загальну вагу машини та знижуючи її маневреність.

У зв'язку з цим, у сучасному машинобудуванні, зокрема в механічних приводах і редукторах, все ширше впроваджується використання комбінованих матеріалів. Так, у черв'ячних передачах, які застосовуються в гірничій техніці для приводу стріли, транспортера або допоміжних систем, матеріальний підбір є ключовим фактором довговічності та ефективності.

Зокрема, черв'яки виготовляються з легованої сталі з підвищеним вмістом хрому, нікелю або молібдену, що забезпечує високу твердість і зносостійкість після термообробки.

У поєднанні з черв'ячними колесами, виготовленими з бронзи досягається оптимальний баланс між зносостійкістю та зниженим тертям. Бронзові зубці забезпечують плавність ходу, ефективну роботу в агресивному середовищі та низький рівень шуму, що критично важливо для підземної техніки.

Таким чином, у тих конструктивних вузлах, де використання чавуну є недоцільним через високі динамічні навантаження, застосовуються більш технологічні рішення на основі легованих сталей та кольорових сплавів. Це дозволяє не лише підвищити надійність техніки, але й оптимізувати її роботу в складних гірничих умовах.

1.3. Аналіз режимів експлуатації редуктора приводу ліфтової установки

Основними функціональними елементами сучасної ліфтової установки є система приводу. Одним із критичних вузлів у такій системі є редукторний привід, в конструкції якого активно використовуються черв'ячні передачі. Черв'ячна передача забезпечує плавну передачу крутного моменту з високим передаточним числом, що важливо для точного керування швидкістю обертання. Основною перевагою цього типу передач є здатність до самотормозіння, компактність конструкції та відносна безшумність у роботі.



Рисунок 1.3 – Редуктор ліфту

Черв'ячні редуктори, що входять до складу багатоступінчастих трансмісій, забезпечують значне зменшення обертів двигуна та передачу крутного моменту на виконавчі органи з високим передаточним числом. Завдяки цьому забезпечується плавність ходу, точність керування і висока надійність при роботі. З конструктивної точки зору, черв'ячна пара є ефективним рішенням завдяки здатності до самогальмування, що критично для фіксації положення виконавчого органа на заданому рівні.

Для підвищення ресурсу і зниження зношування, черв'яки виготовляються із загартованої легованої сталі (наприклад, 40Х, 20ХН3А), яка демонструє високу твердість і стійкість до динамічних навантажень. У парі з ними працюють черв'ячні колеса з антифрикційної бронзи (БрОФ10-1 або БрАЖ9-4), що дозволяє зменшити тертя та запобігти задиру. Таке поєднання забезпечує довговічність та ефективність передачі навіть при тривалих циклічних навантаженнях.

Незважаючи на сучасні технічні рішення, на практиці часто спостерігається вихід з ладу корпусів редукторів та черв'ячних коліс. Основною причиною є використання сірого чавуну в якості матеріалу для корпусу. Хоча чавун має хороші ливарні властивості, його структура з включеннями пластів графіту утворює

концентратори напружень, що знижують опір динамічним і циклічним навантаженням. Це призводить до появи мікротріщин, які з часом розвиваються до критичних пошкоджень. Після руйнування корпус втрачає співвісність передачі, що викликає заклинювання механізмів і зупинку роботи всієї ліфтової установки.

Спроби відновити тріснуті чавунні корпуси зварюванням є неефективними, оскільки після охолодження зона шва стає крихкою, а ударна в'язкість зменшується. У зв'язку з цим, одним із напрямів підвищення надійності ліфтових установок є перехід до використання високоміцного чавуну з кулястим графітом або навіть литої сталі для виготовлення корпусів черв'ячних редукторів та коліс, що дозволить зменшити сили тертя у фрикційній парі. Це дає змогу суттєво підвищити опір динамічним навантаженням, зменшити ризик тріщиноутворення та забезпечити більш довгий строк служби обладнання.

Таким чином, грамотний вибір матеріалів і їх комбінація в черв'ячних передачах є ключовим фактором для підвищення ресурсу ліфтових установок та їх ефективної експлуатації.

1.4 Застосування надміцних чавунів для отримання виливок деталі редуктора

Проведений аналіз несправностей редукторів виявив проблему виламування зубців черв'ячних коліс. Одним із ефективних шляхів покращення конструкції та збільшення опору динамічним навантаженням є застосування чавуну із шароподібним графітом (надміцний чавун).

Структура звичайного чавуну наведена на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Структура чавуну

Аналіз технічного стану та причин відмов редукторів засвідчив наявність серйозної проблеми — розтріскування коліс редукторів (рис. 1.4), особливо в умовах тривалого навантаження та циклічної дії сил. Основним конструкційним матеріалом для таких корпусів довгий час залишався сірий чавун, який має обмежену опірність до динамічних та ударних навантажень через наявність пластинчастого графіту, що формує зони концентрації напружень. Одним із ефективних шляхів підвищення надійності конструкції є заміна сірого чавуну на високоміцний чавун із кулястим (сфероїдальним) графітом, який значно краще витримує динамічні навантаження.



Рисунок 1.4 – Пломка зубу черв'ячного колеса

Такий високоміцний чавун (ВЧ) має графітні включення сферичної форми, що мінімізують розповсюдження мікротріщин і зберігають цілісність металевої основи. Завдяки меншому відношенню площі поверхні графітових включень до їх об'єму, зменшується ймовірність локальних руйнувань. Це дозволяє збільшити опір матеріалу до вигину та розтягу, що критично для елементів, які зазнають коливальних або імпульсних навантажень, як-от корпуси черв'ячних редукторів.

Залежно від температурно-швидкісних умов лиття та хімічного складу, структуру ВЧ можна класифікувати як:

- феритну (ферит + кулястий графіт),
- ферито-перлітну (ферит + перліт + кулястий графіт),
- перлітну (перліт + кулястий графіт).

Структура чавуну із шароподібним графіком зображена на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 - Структура надміцного чавуну

Для черв'ячних передач, які активно використовуються у привідних системах ліфтових установок, це особливо важливо, оскільки вони працюють з великими крутними моментами, а корпуси редукторів зобов'язані забезпечити жорстку геометрію співвісності вала черв'яка і черв'ячного колеса. Будь-яке викривлення

або тріщина у корпусі веде до перекосу передачі, підвищеного зносу, теплового перевантаження і в кінцевому підсумку — до виходу з ладу.

Сфероїдизація графіту в чавуні досягається шляхом введення модифікуючих елементів, серед яких найбільш ефективними є: магній — популярний, але вимагає спеціального обладнання для безпечного введення через низьку температуру кипіння (1120 °C) і високу реакційну здатність; церій — стабілізує структуру чавуну при евтектичному складі, однак має економічні обмеження через високу вартість; ітрій — перспективний модифікатор з високою температурою плавлення (2780 °C), не викликає піровибухів при введенні, але не має широкого промислового застосування через екологічні ризики; кальцій, який використовується переважно в комплексі з магнієм для підсилення сфероїдизації графіту.

В умовах промислового виробництва найчастіше застосовують комплексні модифікатори на основі магнію, які вводяться у розплав у спеціальних контейнерах, колоколах або автоклавах. Ці технології дозволяють забезпечити стабільну сфероїдизацію графіту, що є критично важливою для виготовлення корпусів черв'ячних редукторів, які експлуатуються у умовах виробництва.

Застосування високоміцного чавуну в корпусах черв'ячних передач дозволяє не лише уникнути передчасних руйнувань, але й зменшити вагу конструкції завдяки підвищеній міцності матеріалу. Крім того, такий матеріал сумісний із сучасними антифрикційними вставками та вкладишами, які використовуються в зонах опор валів і підшипників.

У результаті модернізації редукторів із застосуванням чавуну з кулястим графітом суттєво підвищується:

- ресурс роботи передачі;
- точність роботи механізму в умовах вібрацій;
- термін міжремонтної експлуатації;
- загальна надійність ліфтової установки в цілому.

Таким чином, правильний підбір матеріалу для виготовлення і корпусів редукторів, і черв'ячних коліс, є ключовим фактором забезпечення довговічності, безпеки та ефективності машин.

1.5 Постановка задач дослідження

Метою цієї кваліфікаційної роботи є підвищення техніко-експлуатаційної надійності та довговічності черв'ячного редуктора ліфтової установки. Особливу увагу приділено вивченню роботи черв'ячної передачі, як одного з ключових елементів механізму передавання зусиль у компактних конструкціях з високими передаточними числами.

Передбачається, що поліпшення характеристик роботи черв'ячного редуктора можливе за рахунок:

- модернізації конструктивних елементів редуктора;
- впровадження високоміцного чавуну із кулястим графітом як основного матеріалу виготовлення черв'ячного колеса та корпусу;
- урахування специфіки контактної пари "черв'як – черв'ячне колесо", що працює в умовах високого тиску та ковзання.

Для досягнення мети необхідно виконати комплекс завдань:

1. Визначення силових і моментних навантажень, що діють на черв'ячний редуктор в різних експлуатаційних режимах.
2. Розробка 3D-моделі редуктора з урахуванням геометричних та матеріальних параметрів, включаючи параметри черв'ячної пари (модуль, кут підйому, передаточне число тощо).
3. Моделювання напружено-деформованого стану корпусу редуктора за допомогою методу скінченних елементів (Finite Element Method, FEM), з порівнянням результатів для корпусу з сірого та надміцного чавуну.
4. Порівняльний аналіз механічних і фізико-хімічних характеристик матеріалу та обґрунтування вибору для виготовлення деталей.

2. ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА РОЗРОБКИ

2.1 Функціонально вартісний аналіз

Одноступеневі черв'ячні редуктори залишаються ключовою ланкою у приводних системах машинобудування завдяки компактності, високому передатному відношенню за один ступінь і плавності ходу. Проте зростання вимог до енергоефективності, зниження питомих витрат на виробництво та експлуатацію, а також необхідність підвищення надійності у складних умовах експлуатації суттєво загострюють конкуренцію на ринку редукторної техніки. У цих умовах традиційне проектування, зосереджене переважно на міцність і ресурс, стає недостатнім: потрібен системний підхід, що дозволяє одночасно оптимізувати технічні й економічні показники виробу.

Функціонально-вартісний аналіз (ФВА) є універсальним інструментом, який дає змогу кількісно зіставити значущість окремих функцій редуктора зі їхньою часткою у собівартості, визначити «дорогі» та «дешеві» функції, а відтак – обґрунтовано перерозподілити ресурси проектування. Застосування ФВА до одноступеневого черв'ячного редуктора дозволяє:

- виявити компоненти, які істотно впливають на загальну ефективність (ККД, рівень шуму, тепловий режим) і водночас формують найбільшу частину витрат;
- встановити резерви зниження собівартості без погіршення експлуатаційних характеристик шляхом оптимізації технології виготовлення, матеріалів та конструктивних рішень;
- інтегрувати економічні критерії на ранніх етапах проектного циклу, що скорочує час виходу на ринок і підвищує конкурентоспроможність продукції.

Таким чином, проведення функціонально-вартісного аналізу є необхідним етапом розробки сучасного черв'ячного редуктора, адже саме він забезпечує об'єктивну основу для прийняття технічно й економічно доцільних рішень у швидкозмінних умовах ринку.

У таблиці 1.1 приведено аналіз компонентів та їх функціонального призначення.

Таблиця 1.1 – Компоненти та їх функція

№	Компонент	Функція
D1	Черв'як (вісь)	Передає обертальний рух, забезпечує передаточне відношення $i \approx 20 \dots 100$; самогальмування
D2	Черв'ячне колесо	Приймає момент від черв'яка, забезпечує зниження швидкості та передачу обертання на вихід
D3	Корпус (коробка)	Фіксує геометрію поєднання, підтримує осі, захищає вузли від забруднень і навантажень
D4	Підшипники (2...4 шт.)	Підтримують вал черв'яка та черв'ячного колеса, зменшують тертя (кочення замість ковзання)
D5	Сальники/ущільнення	Перешкоджають витокам мастила та проникненню пилу/вологи в корпус
D6	Мастило (шестерневе)	Забезпечує змащування тертьових поверхонь, відведення тепла, захист від корозії
D7	Кришки корпусу (2 шт.)	Закривають бокові отвори корпусу, утримують мастило, задають натяг ущільнень
D8	Монтажні фланці/кронштейни	Фіксують редуктор на рамі чи фундаменті, забезпечують правильну осьову та радіальну установку

Таблиця 1.2 – Вплив функціонального призначення компонентів

№	Функція (F)	Опис значущості	Компоненти, що реалізують	Вага важливості w_i (0–10)	Частка собівартості c_i , %	Коеф. цінності
1	F1 – Передача обертів із пониженням	базова, без неї виріб не потрібний	Черв'як, колесо, шпонки	10	35	0,29
2	F2 – Передача крутного моменту T з ККД $\geq 0,8$ ηном	критична для ресурсу	Пара черв'як-колесо, підшипники	9	18	0,50
3	F3 – Точне центрування та підтримка валів	впливає на вібрації	Корпус, підшипники, кришки	8	13	0,62
4	F4 – Зниження шуму ≤ 70 dB(A)	ергономіка	Корпус-поглинач, фаски, шліфування	5	4	1,25
5	F5 – Утримання мастила та герметичність	довговічність	Корпус, сальники, ущільнення	7	6	1,17
6	F6 – Відведення тепла ($\Delta T \leq 45$ °C)	запобігання перегріву	Корпус-радіатор, мастило	6	9	0,67

№	Функція (F)	Опис значущості	Компоненти, що реалізують	Вага важливості w _i (0–10)	Частка собівартості, %	Коеф. цінності
7	F7 – Простота монтажу / обслуговування	↓ час простою	Фланці, оглядові люки, пробки	5	5	1,00
8	F8 – Захист користувача (IP 55)	безпека	Корпус, екрани, заземлення	6	3	2,00
9	F9 – Естетика та маркування	сприйняття бренду	Фарбування, шильди	2	2	1,00
10	F10 – Транспортабельність (≤ 30 кг)	логістика	Лапи, кільця	3	5	0,60

У табл. 1.3 приведено функціонально-вартісну оцінку компонентів редуктора черв'ячного

Таблиця 1.3 – Функціонально-вартісна оцінка

Компонент	Функція	Вартість (CAPEX+OPEX)	Надійність / довговічність	Технічна значущість / цінність
D1 Черв'як	Передача руху, самогальмування	Висока (~\$120)	Середня (ковзання в зачепленні)	Критична – визначає передаточне відношення та КПД
D2 Черв'ячне колесо	Прийом моменту, зниження швидкості	Висока (~\$150)	Середня (зношування зубців)	Ключова – несе основне навантаження та визначає ресурс
D3 Корпус	Жорсткість, захист вузлів	Середня (~\$80)	Висока	Висока – забезпечує правильне взаємне розташування вузлів
D4 Підшипники	Підтримка валів, зменшення тертя	Низька (\$20–40 за шт.)	Середня–висока	Висока – критичні для ресурсу та плавності роботи
D5 Ущільнення	Збереження мастила, захист	Дуже низька (~\$15)	Середня	Середня – запобігають витoku мастила та проникненню забруднень
D6 Мастило	Змащування, охолодження	Дуже низька (~\$10/літр)	Висока (при заміні за графіком)	Висока – без мастила ресурс редуктора

Компонент	Функція	Вартість(CAPEX+OPEX)	Надійність / довговічність	Технічна значущість / цінність
				знижується в 5–10 разів
D7 Кришки корпусу	Утримання мастила, жорсткість	Низька (~\$30 за шт.)	Висока	Середня – забезпечують герметичність і жорсткість
D8 Монтажні кронштейни	Фіксація та вирівнювання	Низька (~\$25)	Висока	Середня – забезпечують коректне встановлення та експлуатацію

Найбільшу частку вартості ($\approx 45\%$) становлять зубчасті деталі: черв'як ($\approx \$120$) і черв'ячне колесо ($\approx \150). Саме вони визначають передаточне відношення ($i=20\dots 100$), самогальмування та основний ресурс (до 15 000 год). Корпус забезпечує близько 15 % витрат і відіграє вирішальну роль у підтримці геометрії зачеплення, тому інвестиції в оптимальний дизайн (литий алюміній vs. чавун) доцільні для підвищення жорсткості та зниження шуму. Підшипники та мастило разом складають $\approx 20\%$ загальних витрат, але без регулярної заміни мастила (через кожні 2 000 год) ресурс редуктора може скоротитися в 5–10 разів. Ущільнення та монтажні елементи коштують менше 15 % бюджету, проте підвищують надійність системи, запобігаючи витокам і збої в експлуатації.

2.2 Моделювання об'єкта розробки

З метою проведення подібного аналізу було створено детальну 3D-модель редуктора, конструктивно адаптовану для моделювання в CAE-системах. Геометричне моделювання здійснено в середовищі AutoCad, що дозволило виконати високоточну реконструкцію складальних вузлів та деталей згідно з доступною технічною документацією. Це дозволило сформуванню повноцінної основи для проведення розрахунків у середовищі Ansys Student.

На наведених нижче ілюстраціях зображено геометрію ключових елементів редуктора, включаючи корпус, черв'як, колесо, підшипникові щити та елементи кріплення.

На рисунках нижчу приведено зображення деталей редуктора.

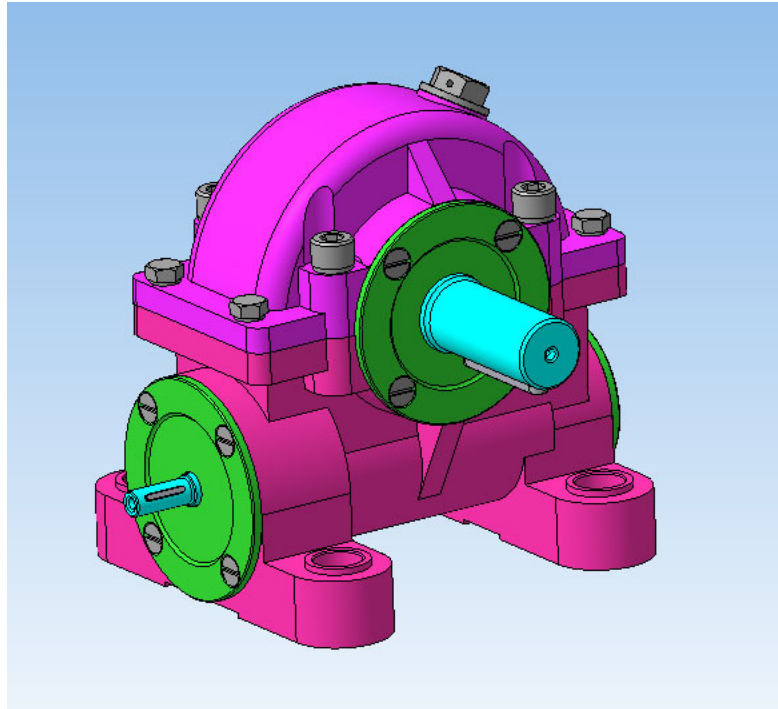


Рисунок 2.1– Редуктор черв'ячний у зборі

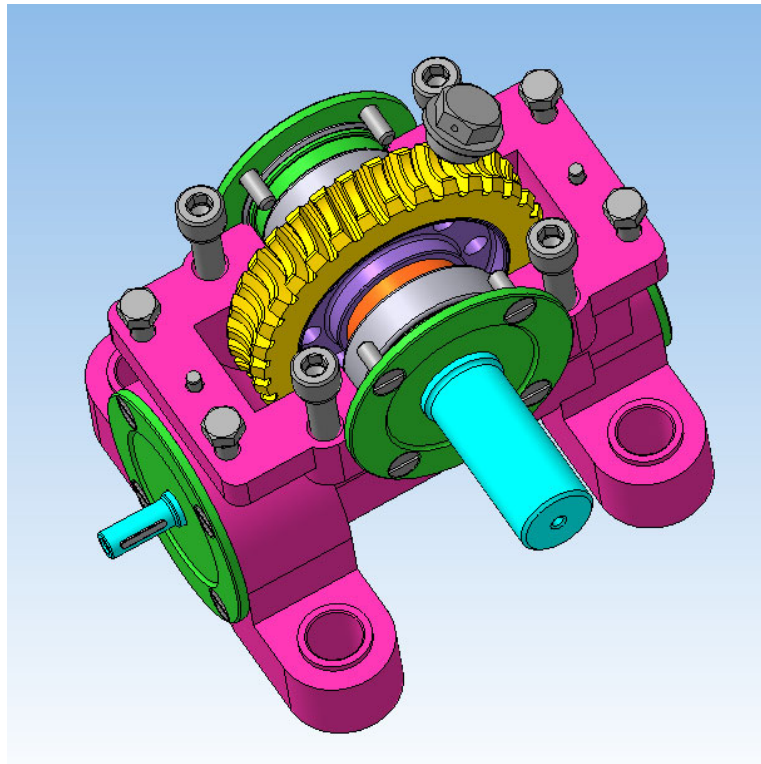


Рисунок 2.2– Редуктор черв'ячний (знята верхня кришка)

З метою якісного моделювання механічних процесів, що відбуваються у редукторі з черв'ячною передачею, необхідно забезпечити точність 3D-моделі при оптимізації обчислювальних ресурсів. Під час підготовки цифрової моделі для чисельного аналізу доцільним є виключення з розрахунку другорядних або стандартних елементів конструкції, зокрема болтів, ущільнювальних кілець та прокладок. Це дозволяє зменшити кількість елементів сітки при обмежених обчислювальних можливостях системи, зберігаючи при цьому вірогідність результатів.

Після створення деталізованої моделі редуктора у середовищі AutoCad, її було експортовано у програму Ansys для подальшого аналізу. Для перенесення геометрії застосовано файл обміну у форматі *.b_t, який зберігає оригінальні розміри, масштаб та топологію моделі. Важливо зазначити, що альтернативні формати обміну, такі як *.sat або *.iges, можуть призводити до масштабних спотворень, унаслідок чого масо-габаритні характеристики моделі змінюються в кілька разів. Це, у свою чергу, викривляє результати навантажувального аналізу, оскільки значно зменшує питомі напруження в конструкції.

Програмне середовище ANSYS/Mechanical є універсальним інструментом для розв'язання задач механіки деформівного твердого тіла, а також задач теплообміну, вібрацій та акустики.

Вихідні дані до моделювання напружено-деформованого стану та обґрунтування вибору матеріалу виготовлення виконані у третьому розділі кваліфікаційної роботи.

2.3 Висновок за розділом

3 ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Інженерний розрахунок редуктора

Для даного типу редуктора складено розрахункову схему навантажень, а саме згинних моментів черв'яка (рисунок 2.1) та згинних моментів валу черв'ячного колеса (рис.2.2).

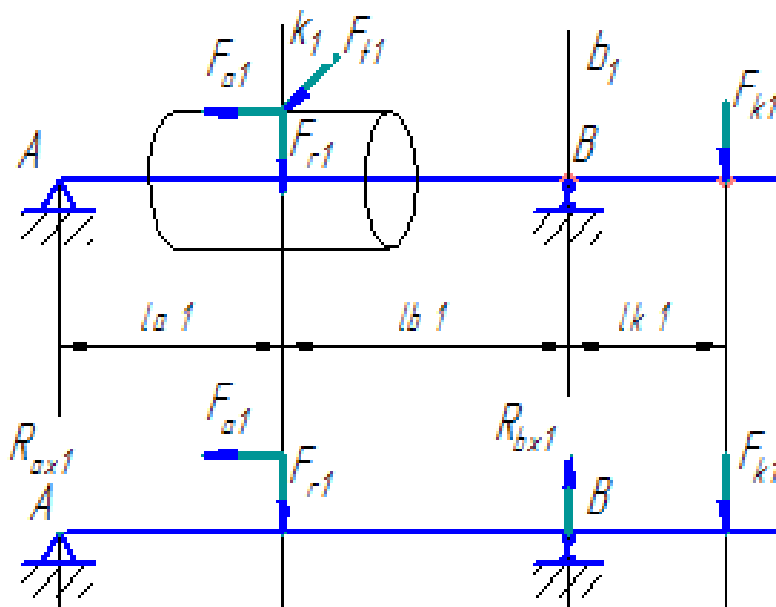


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема черв'яка

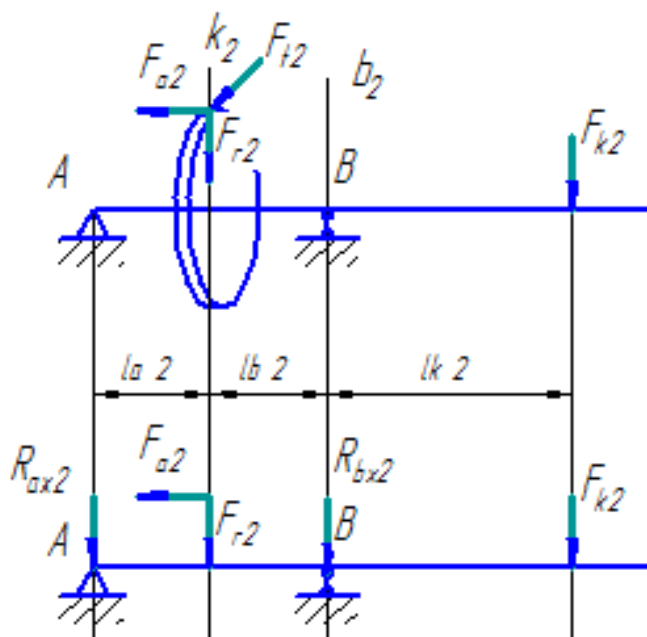


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема черв'ячного колеса

Де, R_a – реакція в опорах черв'яка,

l_a – відстань від опори підшипника до середини черв'яка, l_b – відстань від опори підшипника з боку прохідного кінця до середини черв'яка, l_k – відстань від опори підшипника з боку прохідного кінця до середини вихідного кінця вала черв'яка, F_t – Окружна сила на черв'яка, F_a – Осьова сила на черв'яка, F_y – Радіальна сила на черв'яка, F_k – консольна сила черв'яка, T_1 – момент, що крутить на вхідному валу, R_{ax} – реакція в опорах черв'яка, M_x – згинальний момент черв'яка, M_y – згинальний момент валу черв'ячного колеса.

Окружна сила черв'яка, Н

$$F_{t1} = \frac{2T_2}{d_{w1}u\eta}$$

$$F_{t1} = \frac{2 \times 30000}{20 \times 32 \times 0.824} = 113.774 \text{ Н}$$

Осьова сила черв'яка, Н

$$F_{a1} = \frac{2T_2}{d_2}$$

$$F_{a1} = \frac{2 \times 30000}{80} = 750 \text{ Н}$$

Радіальна сила черв'яка, Н

$$F_{r1} = -F_{t2} \operatorname{tg} \alpha$$

F_{t2} – окружна сила на черв'ячному колесі, Н.

$$F_{t2} = -F_{a1}$$

$$F_{t2} = -750 \text{ Н}$$

$$F_{r1} = -(-750) \times 0.364 = 273 \text{ Н}$$

Осьова сила на черв'ячному колесі, Н

$$F_{a2} = -F_{t1}$$

$$F_{a2} = -113.774 \text{ Н}$$

Радіальна сила на черв'ячному колесі, Н

$$F_{r2} = -F_{r1}$$

$$F_{r2} = -273 \text{ Н}$$

Визначення консольної сили черв'яка, Н

$$F_{k1} = 125\sqrt{T_1}$$

$$T_1 = \frac{T_2}{u\eta}$$

T_1 – Крутний момент на вхідному валу, Н · мм.

$$T_1 = \frac{30000}{32 \times 0.824} = 1137.743 \text{ Нм}$$

$$F_{k1} = 125\sqrt{1137.743} = 133.331 \text{ Н}$$

Визначення консольної сили валу черв'ячного колеса, Н

$$F_{k2} = 125\sqrt{T_2}$$

$$F_{k2} = 125\sqrt{30000} = 684.653 \text{ Н}$$

Розрахунок вихідних кінців валів.

Визначаємо діаметр вихідного кінця черв'яка, мм

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{16T_1 10^3}{\pi[\tau]_k}}$$

$[\tau]_k = 15$ Мпа знижений допускається дотичне напруження, без врахування впливу вигину,

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{16 \times 1137.743}{3.14 \times 15}} = 7.28 \text{ мм}$$

Приймаємо діаметр вихідного кінця черв'яка рівним 8 мм.

Визначаємо діаметр вихідного кінця вала черв'ячного колеса, мм

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{16T_1 10^3}{\pi[\tau]_k}}$$

$[\tau]_k = 15$ Мпа знижене допустиме дотичне напруження, без врахування впливу вигину,

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{16 \times 30000}{3.14 \times 15}} = 21.68 \text{ мм}$$

Приймаємо діаметр вихідного кінця вала черв'ячного колеса рівним 22 мм

Визначення реакцій в опорах, згинальних моментів і діаметрів валів.

Визначення реакцій в опорах черв'яка, Н

$$R_{ax1} = \frac{F_{r1}l_{b1} + F_{a1} \times \frac{d_{w1}}{2} - F_{k1}l_{k1}}{l_{a1} + l_{b1}}$$

де $l_{a1} = 41,65$ мм - відстань від опори підшипника глухого кінця до середини черв'яка;

$l_{b1} = 53,15$ мм - відстань від опори підшипника з боку прохідного кінця до середини черв'яка;

$l_{k1} = 29$ мм - відстань від опори підшипника з боку прохідного кінця до середини вихідного кінця валу черв'яка.

$$R_{ax1} = \frac{273 \cdot 53,15 + 750 \times \frac{20}{2} - 133,331 \times 29}{41,65 + 53,15} = 191,384 \text{ Н}$$

$$R_{bx1} = \frac{F_{r1} l_{a1} + F_{a1} \frac{d_{w1}}{2} + F_{k1} (l_{a1} + l_{b1} + l_{k1})}{l_{a1} + l_{b1}}$$

$$R_{bx1} = \frac{273 \times 41,65 + 750 \times \frac{20}{2} - 133,331 (41,65 + 53,15 + 29)}{41,65 + 53,15} = 4044,568 \text{ Н}$$

$$M_{xmax1} = R_{ax1} l_{a1}$$

$$M_{xmax1} = 191,384 \times 41,65 = 7971,209 \text{ Нмм}$$

$$M_{1x1} = R_{ax1} l_{a1} - F_{a1} \frac{d_{w1}}{2}$$

$$M_{1x1} = 191,384 \times 41,65 - 750 \times 10$$

$$M_{2x1} = -F_{k1} l_{k1}$$

$$M_{2x1} = -133,331 \times 29 = -3866,599 \text{ Нмм}$$

$$R_{ay1} = \frac{F_{t1} l_{b1}}{l_{a1} + l_{b1}}$$

$$R_{ay1} = \frac{113,774 \times 53,15}{41,65 + 53,15} = 63,788 \text{ Н}$$

$$R_{by1} = \frac{F_{t1} l_{a1}}{l_{a1} + l_{b1}}$$

$$R_{by1} = \frac{113,774 \times 41,65}{41,65 + 53,15} = 49,986 \text{ Н}$$

$$M_{ymax1} = R_{ay1} l_{a1}$$

$$M_{ymax1} = 63,788 \times 41,65 = 2656,764 \text{ Нмм}$$

$$M_{yt1} = F_{t1} \frac{d_{w1}}{2}$$

$$M_{yt1} = 113,774 \times 10 = 1137,740 \text{ Нмм}$$

Визначаємо реакції в опорах валу черв'ячного колеса глухого кінця до опори черв'ячного колеса;

$$R_{ax2} = \frac{F_{r2} l_{b2} + F_{a2} \times \frac{d_{w2}}{2} - F_{k2} l_{k2}}{l_{a2} + l_{b2}}$$

$l_{b2} = 23,38$ мм - відстань від опори підшипника з боку прохідного кінця до опори черв'ячного колеса;

$l_{k2} = 51$ мм - відстань від опори підшипника з боку прохідного кінця до середини вихідного кінця валу черв'ячного колеса.

$$R_{bx2} = \frac{-273 \times 23.38 + 113.3774 \times \frac{80}{2} 684.653 \times (23.38 + 23.38 + 51)}{23.38 + 23.38}$$

$$M_{xmax2} = R_{ax2} l_{a2}$$

$$M_{xmax2} = -980.560 \times 23.38 = -22925.502$$

$$M_{1x2} = R_{ax2} l_{a2} - F_{a2} \frac{d_{w2}}{2}$$

$$M_{1x1} = -980.560 \times 23.38 + 113.774 \times 40 = -1874.542$$

$$M_{2x2} = -F_{k2} l_{k2}$$

$$M_{2x2} = -1684.653 \times 51 = -34917.303 \text{ Нмм}$$

$$R_{ay2} = \frac{F_{t2} l_{b2}}{l_{a2} + l_{b2}}$$

$$R_{ay2} = \frac{-750 \times 23.38}{23.38 + 23.38} = -375.000 \text{ Н}$$

$$R_{by2} = \frac{F_{t2} l_{a2}}{l_{a2} + l_{b2}}$$

$$M_{t2} = F_{t1} \frac{d_{w2}}{2}$$

$$M_{t2} = -750 \times 40 = -30000 \text{ Нмм}$$

Визначаємо найбільшу величину сумарного згинального моменту в b-му небезпечному перерізі черв'яка, Н · мм

$$M_{ub1} = \sqrt{M_{2x1}^2 + M_{2y1}^2}$$

$$M_{ub1} = \sqrt{(-3866.599)^2 + 0^2} = 3866.599 \text{ Нмм}$$

$$M_{\text{эКВ1}} = \sqrt{M_{uk1}^2 + T_1^2}$$

$$M_{\text{эКВ1}} = \sqrt{8402.295^2 + 1137.74^2} = 8478.975 \text{ Нмм}$$

Визначаємо мінімальний діаметр черв'яка в небезпечному перерізі, мм

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{M_{\text{ЭКВ1}}}{0.1[\sigma]}}$$

де $[\sigma] = 60$ - допустиме напруження згину [1].

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{8478.975}{0.1 \times 60}} = 11.222 \text{ мм}$$

Приймаємо діаметр небезпечного перетину черв'яка рівним 14 мм.

Визначаємо найбільшу величину сумарного згинального моменту в k-м небезпечному перерізі валу черв'ячного колеса, Н · мм

$$M_{uk2} = \sqrt{M_{x\text{max}2}^2 + M_{y\text{max}2}^2}$$

$$M_{uk2} = \sqrt{(-22925.502)^2 + (-8767.5)^2} = 24544.810 \text{ Нмм}$$

Визначаємо найбільшу величину сумарного згинального моменту в b-м небезпечному перерізі валу черв'ячного колеса, Н · мм

$$M_{ub2} = \sqrt{M_{2x2}^2 + M_{2y2}^2}$$

$$M_{ub2} = \sqrt{(-34917.303)^2 + 0^2} = 34917.303 \text{ Нмм}$$

$$M_{\text{ЭКВ2}} = \sqrt{M_{ub2}^2 + T_2^2}$$

$$M_{\text{ЭКВ2}} = \sqrt{34917.303^2 + 30000^2} = 46034.966 \text{ Нмм}$$

За результатами проведених розрахунків виконано побудову епюр розподілу навантажень та крутних моментів черв'ячного колеса.

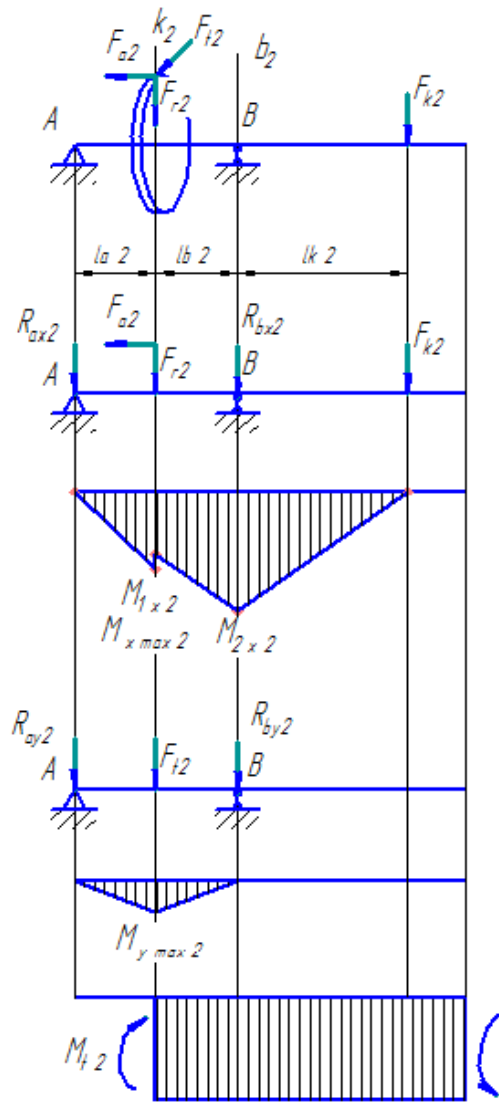


Рисунок 3.3 – Епюри розподілу навантажень черв'ячного колеса

У процесі аналізу силової взаємодії в редукторі черв'ячного типу, зокрема на основі побудованих епюр внутрішніх зусиль та моментів, вдалося визначити ключові ділянки, які зазнають максимального механічного навантаження. Однак отримані дані не дозволяють повною мірою оцінити, як саме ці навантаження розподіляються по об'єму та поверхні корпусу редуктора та колеса, що критично важливо для забезпечення його міцності, точності та довговічності.

З метою отримання більш глибокого уявлення про поведінку конструкції під навантаженням, доцільним є застосування методу кінцевих елементів (МКЕ). У даній роботі для цього використовується середовище інженерного аналізу Ansys, яке дозволяє моделювати розподіл напружень і деформацій в об'ємних тілах

складної форми з урахуванням реальних умов закріплення, навантаження та фізико-механічних властивостей матеріалу.

3.2 Дослідження напружено-деформованого стану редуктора

Застосування методу кінцевих елементів (МКЕ) дозволило виявити зони з найвищими навантаженнями та локальними деформаціями, зокрема в місцях кріплення валів, розміщення підшипників і монтажу фланців. Наступним етапом було імпортування моделі в середовище МКЕ-аналізу, де були встановлені граничні умови, прикладені сили та обрані відповідні властивості матеріалів (як для варіанта з сірим чавуном, так і для надміцного чавуну з кулястим графітом).

На основі отриманих результатів планується внести конструктивні зміни, спрямовані на підвищення міцності корпусу та колеса для зниження ризику його передчасного виходу з ладу при експлуатації в умовах підвищених вібрацій і циклічних навантажень. Розрахунок на жорсткість і точність – перевірка на збереження співвісності отворів для вкладання вала при навантаженні, що є критично важливим для роботи черв'ячної передачі.

Одним із найбільш ефективних методів аналізу в сучасному машинобудуванні є метод кінцевих елементів (МКЕ), який дозволяє не лише кількісно оцінити розподіл напружень у деталях, а й виявити конструктивно слабкі місця, схильні до руйнування або деформацій.

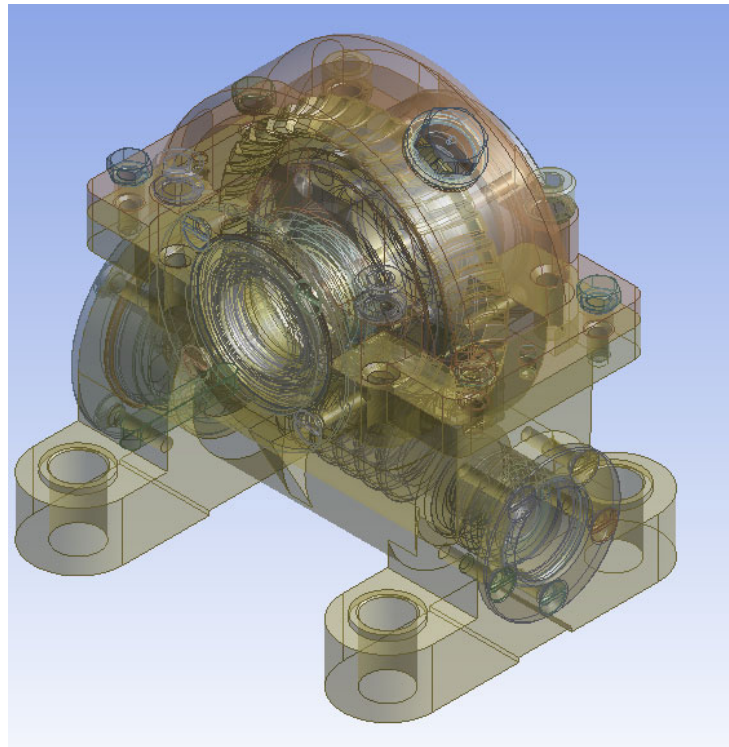


Рисунок 3.4 – Імпортована геометрія редуктора

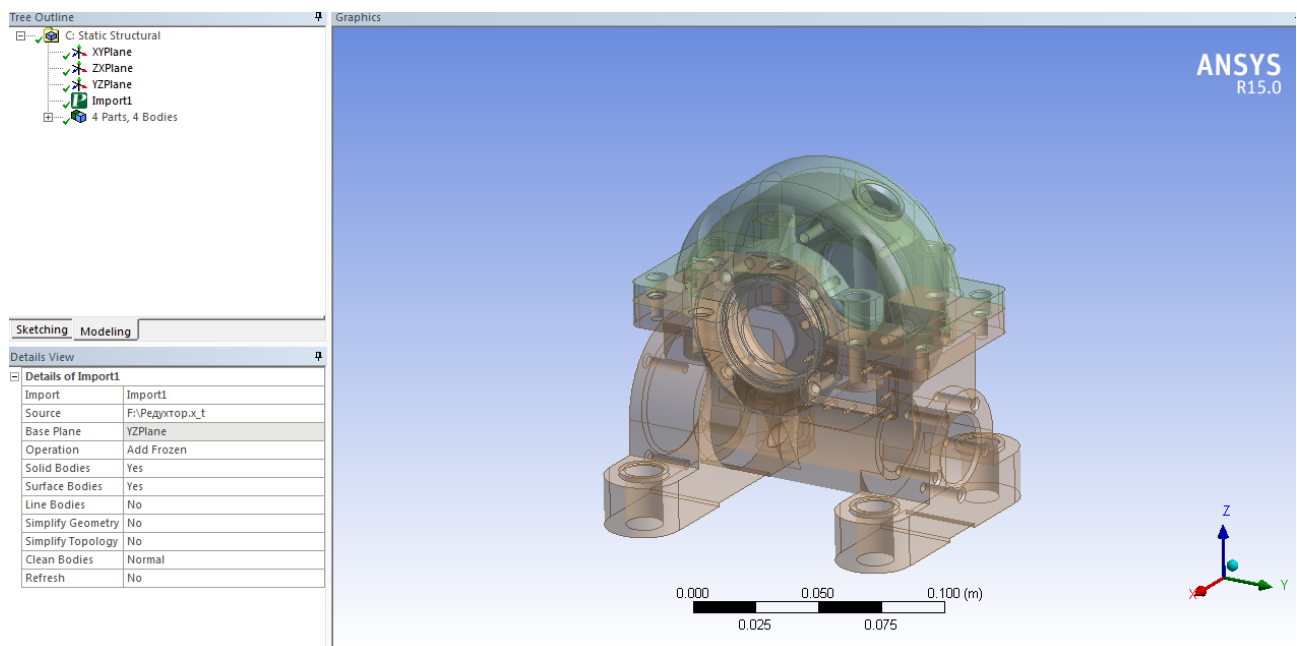


Рисунок 3.5 – Імпортована геометрія корпусу редуктора

При проведенні чисельного аналізу напружено-деформованого стану корпусу редуктора з черв'ячною передачею особливо важливу роль відіграє точне визначення граничних умов та параметрів прикладених навантажень. Саме вони задають фізичну суть розрахункової моделі, визначаючи поведінку елементів конструкції у процесі експлуатації.

До основних типів навантажень, що можуть бути враховані при розрахунку, належать: фіксація ступенів свободи (обмеження переміщень та поворотів у вузлах); зосереджені сили (векторні навантаження, прикладені до окремих точок); розподілені навантаження (тиск, що діє на площини або лінії); інерційні сили (врахування масових характеристик при змінних режимах роботи); об'ємні сили (наприклад, власна вага матеріалу чи вплив відцентрових навантажень). Конфігурація всіх навантажень і обмежень організовується у вигляді кроків навантаження (load steps), кожен з яких може відображати конкретну фазу навантаження або зміну умов експлуатації. Кількість таких кроків залежить від мети дослідження.

Таким чином, грамотна постановка навантажувальних умов є ключем до отримання достовірної картини напружено-деформованого стану, що дозволяє обґрунтовано вдосконалювати конструкцію редуктора та підвищувати її експлуатаційну надійність.

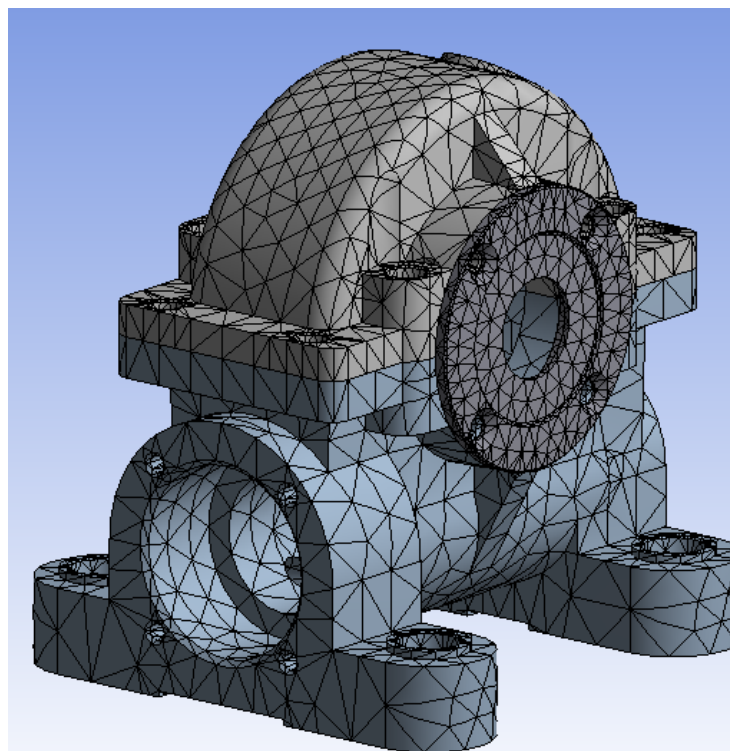


Рисунок 3.6– Згенерована кінцево-елементна сітка

Описання початкових умов, а саме накладених зусиль виконано відповідно до розрахункової схеми та значень зусиль, визначених у розділі.

Фіксація корпусу редуктора виконана відповідно до фізичної моделі – за провусини картера.

При накладенні навантажень на корпус редуктора, виникаючі крутні моменти будуть перерозподілені по об'єму картера та дадуть якісну картину напружень, що виникають.

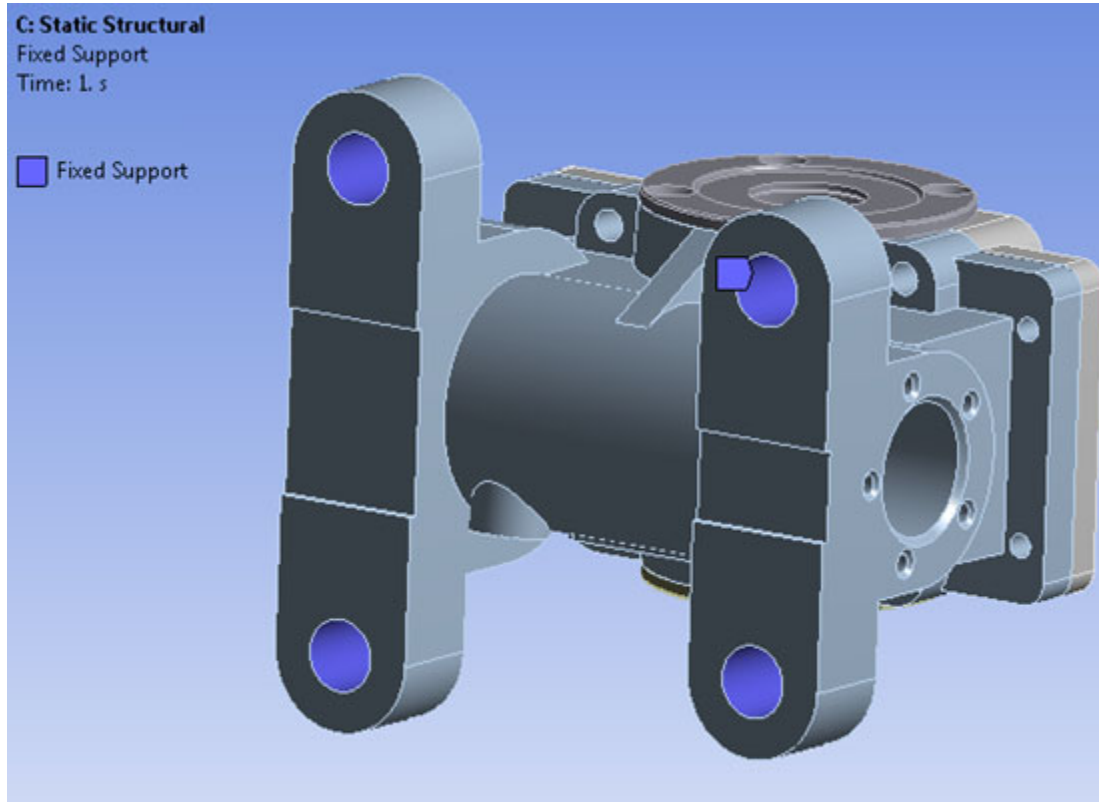


Рисунок 3.7 – Фіксація корпусу редуктора відповідно ко кінематичної схеми

Результати моделювання приведено на рисунках нижче.

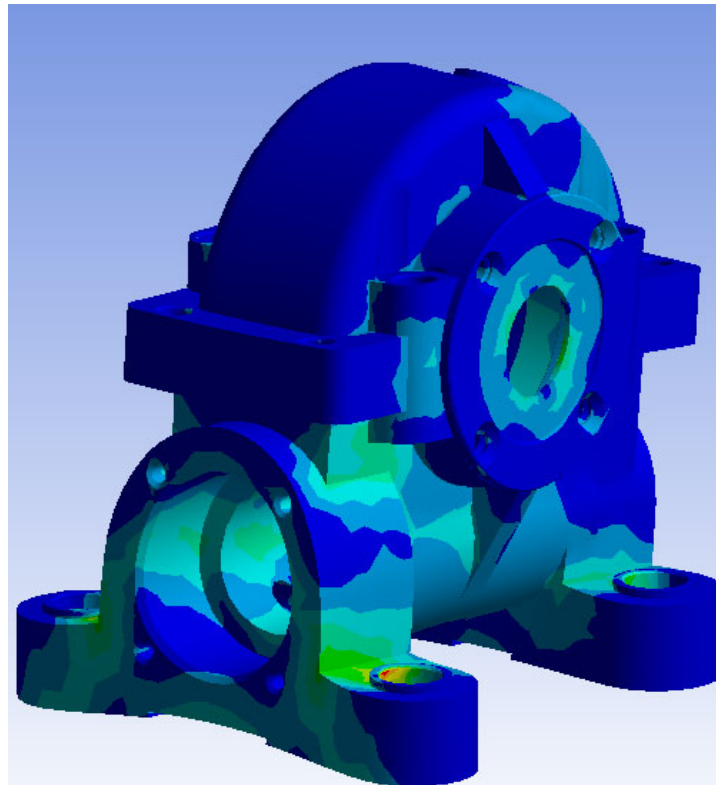


Рисунок 3.8– Характер розподілу напружень по корпусу редуктора.

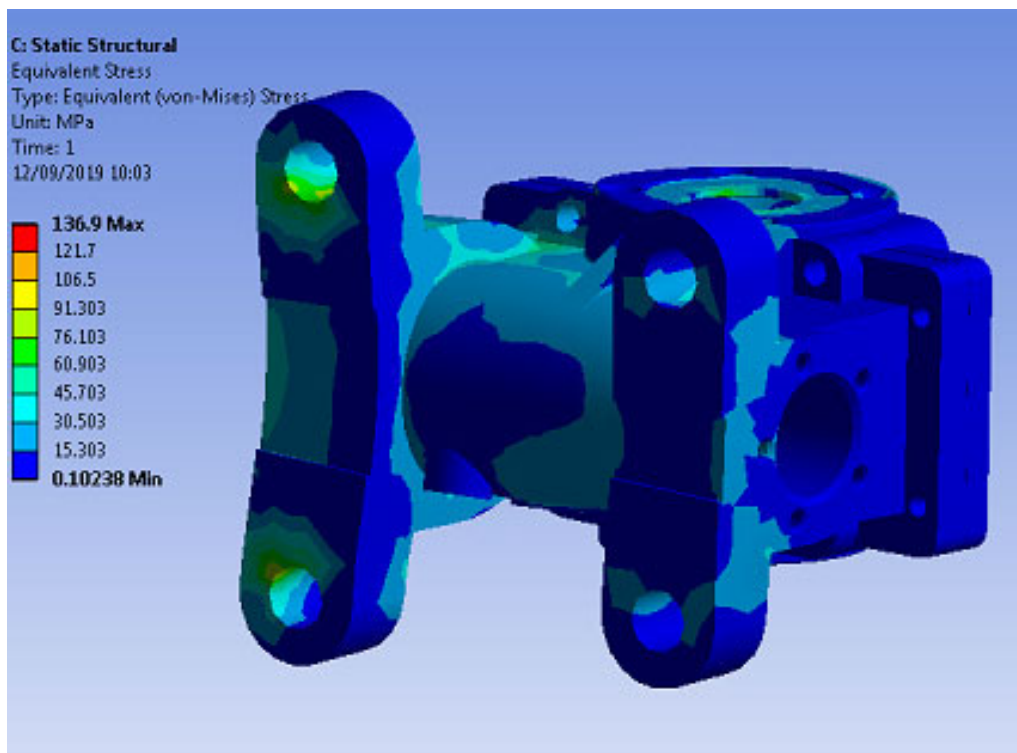


Рисунок 3.9 – Еквівалентні напруження картера редуктора

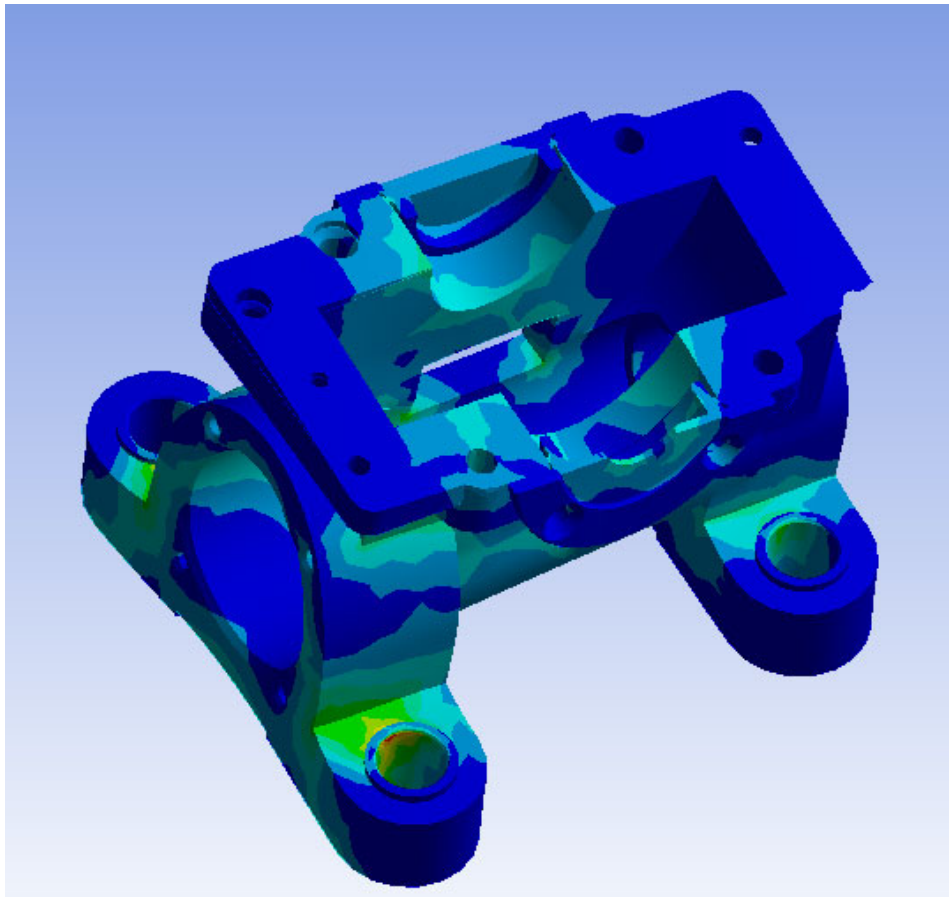


Рисунок 3.10– Еквівалентні напруження картера редуктора (вид 2)

У рамках даного дослідження було проведено всебічний аналіз напружено-деформованого стану корпусу редуктора приводу навантажувального механізму, виконаного на основі черв'ячної передачі. Результати чисельного моделювання свідчать, що максимальні значення еквівалентних напружень у червячному колесі редуктора досягають 136,9 МПа, що є критично важливою характеристикою для оцінки надійності конструкції. При цьому коефіцієнт запасу міцності становить 1,9, що підтверджує допустимість умов експлуатації, але вимагає уважного ставлення до зон концентрації напружень.

Аналогічно було здійснено оцінку деформованого стану корпусу редуктора. Таким чином, проведені дослідження дали змогу отримати повну картину розподілу напружень і деформацій у конструкції редуктора, що є важливою основою для подальшої оптимізації його міцнісних характеристик та підвищення експлуатаційної надійності

Таким чином, проведений аналіз показав важливість ретельного підходу до побудови сіткової моделі в зонах складної геометрії. Врахування сіткових похибок є критичним етапом для досягнення достовірності та інженерної цінності отриманих результатів у моделюванні.

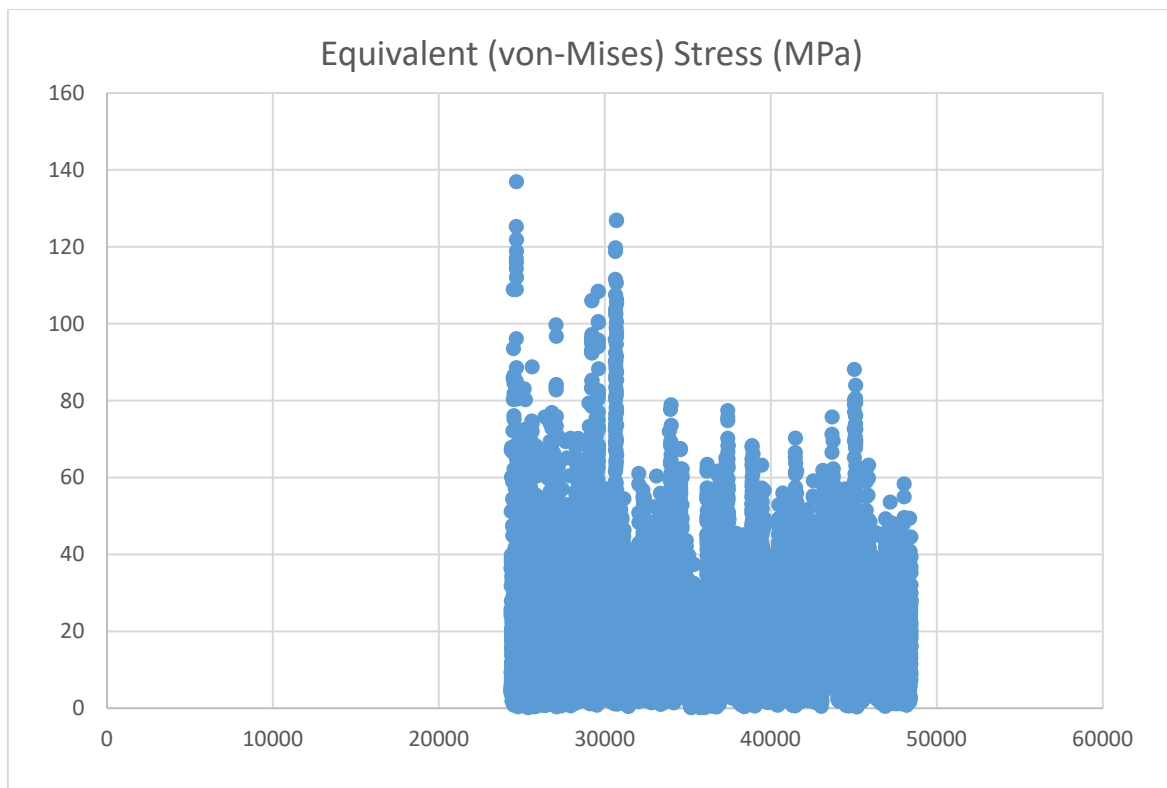


Рисунок 2.18 – Еквівалентні напруження черв'ячного колеса

Результати проведених моделювань свідчать про те, що навантаження на корпус редуктора є допустимими. Виготовлення корпусу редуктора із надміцного чавуну допустиме. Це дозволить запобігти руйнуванню корпусу при випадкових високих динамічних навантаженнях та підвищити надійність експлуатації машини в цілому.

3.3 Обґрунтування вибору матеріалу та технології отримання деталі черв'ячного колеса

Результати чисельного та експериментального аналізу черв'ячних передач можуть бути ефективно використані в реальних виробничих умовах, зокрема — для оптимізації геометрії корпусів редукторів з метою зниження металоємності литих деталей. Це досягається завдяки тому, що забезпечення заданих меж міцності

конструкції дозволяє зменшити масу відливки без втрати її експлуатаційних характеристик. Як наслідок, забезпечується раціональний баланс між матеріалом, механічною надійністю та економічною ефективністю.

Виготовлення корпусних елементів редукторів методом лиття з чавуну передбачає особливі вимоги до хімічного складу та режиму кристалізації. Одним з критичних етапів є контроль графітизації — необхідно забезпечити формування бажаної структури графіту та мінімізувати утворення цементитної фази, яка негативно впливає на пластичність і в'язкість матеріалу. Проблеми в цій ділянці можуть призвести до утворення внутрішніх дефектів, що, в свою чергу, ускладнює механічну обробку та знижує ресурс деталі.

Однак, у практичній реалізації результатів можуть виникати суперечності між виробниками та споживачами литих виробів. Споживачі все частіше орієнтуються на вилівки з сучасних марок чавуну — зокрема, з сірого чавуну з вермікулярною формою графіту або з високоміцного чавуну з кулястим графітом. Ці матеріали демонструють кращі механічні характеристики: підвищену ударну в'язкість, опір зносу та термічну стабільність. З точки зору замовника — це виправдана інвестиція в довговічність і надійність.

Натомість, виробники чавуну прагнуть до мінімізації витрат на виробництво. Вони обґрунтовано вважають, що для стандартних умов експлуатації немає необхідності використовувати дорожчі модифіковані чавуни, якщо базові матеріали вже забезпечують прийнятний рівень надійності. Виникає конфлікт інтересів, який слід врегульовувати, виходячи з реального режиму роботи деталей та техніко-економічного обґрунтування доцільності підвищення якості.

Перспективним напрямом розвитку лиття корпусних елементів є використання аустенітно-бейнітного чавуну з кулястим графітом (АБЧКГ). Цей матеріал формується в результаті ізотермічного загартування та характеризується унікальним поєднанням високої міцності, ударної в'язкості та зносостійкості. Його властивості роблять його ідеальним кандидатом для відповідальних вузлів, що працюють в умовах динамічних навантажень або температурних коливань.

Для стабілізації структури АБЧКГ застосовуються спеціальні легуючі елементи, зокрема нікель, мідь, марганець та молібден. Їхній підбір відбувається з

урахуванням того, щоб не утворювати карбідів, які можуть негативно вплинути на ізотермічну трансформацію. Типові діапазони вмісту цих компонентів наведено у таблиці 1, що слугує основою для розробки оптимальних хімічних складів.

Загалом, сучасні підходи до лиття та термічної обробки корпусів черв'ячних редукторів відкривають значні можливості для підвищення продуктивності виробництва, скорочення витрат і продовження терміну служби готових механізмів. Комплексне впровадження новітніх матеріалів і технологій — ключ до підвищення конкурентоспроможності в умовах сучасного машинобудування.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад аустенітно-бейнітного чавуну

C,%	Si,%	Mn,%	Ni,%	Cu,%	Mo,%
3.2-3.8	20.0-2.4	0.2-0.5	0.8-2.5	0.5-1.5	0.2-0.8

Серед сучасних конструкційних матеріалів для відповідальних вузлів черв'ячних передач особливе місце займає аустенітно-бейнітний чавун з кулястим графітом (АБЧКГ). Його мікроструктура формується в результаті контрольованого ізотермічного загартування і складається з бейнітного фериту в комбінації з великою часткою стабілізованого аустеніту — до 45% об'єму. Саме ця двофазна структура забезпечує унікальне поєднання високої міцності, зносостійкості та ударної в'язкості, що особливо важливо для деталей, що працюють в умовах циклічного навантаження.

Дрібнозерниста структура бейнітного фериту підвищує межу міцності, а наявність пластичних фаз (фериту й аустеніту) сприяє поглинанню енергії при ударах і зменшенню ймовірності крихкого руйнування. Залежно від температурного режиму термічної обробки виділяють два основні структурні варіанти бейніту:

Нижній бейніт формується при температурах ізотермічної витримки 280–350 °С. Така структура забезпечує максимальні показники твердості, зносостійкості та міцності при достатньо високій ударній в'язкості і помірному відносному подовженні.

Верхній бейніт утворюється в інтервалі температур 350–450 °С. Характеризується збалансованим поєднанням високої ударної в'язкості, хорошого подовження та збереження значної міцності.

Правильний вибір режиму термообробки дає змогу адаптувати властивості матеріалу до конкретних умов експлуатації — наприклад, для корпусів редукторів, які зазнають великих контактних або вигинальних навантажень.

У таблиці 3.2 представлено типові значення механічних властивостей АБЧКГ залежно від переважного типу бейнітної матриці. Ці дані можуть бути використані для порівняння з іншими матеріалами та обґрунтування вибору оптимальної технології виготовлення деталей черв'ячного редуктора.

Інтеграція АБЧКГ у виробництво дозволяє не лише забезпечити відповідність жорстким вимогам до надійності, але й розширити технологічну гнучкість при проєктуванні та литті складних геометричних форм. Такий підхід відкриває перспективи для підвищення ресурсу та зниження ваги редукторів без втрати їх експлуатаційних характеристик.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад аустенітно-бейнітного чавуну

Бейніт	σ_b , МПа	δ_1 , %	HR, МПа	КС, МДж
Нижній	1100-1500	1-4	42-48	0,2-0,5
Верхній	800-1200	3-10	36-45	0,2-0,4

Окрім високих механічних та експлуатаційних характеристик, які в окремих випадках не поступаються властивостям легованих сталей, аустенітно-бейнітний чавун з кулястим графітом (АБЧКГ) вирізняється традиційними перевагами чавунів — чудовими ливарними властивостями, низькою густиною, ефективним демпфуванням коливань та хорошими антифрикційними якостями. Це робить його оптимальним вибором для лиття корпусів черв'ячних редукторів, особливо при складній геометрії та підвищених вимогах до зносостійкості.

Існує два принципово різних підходи до отримання заданої структури.

Формування АБЧКГ безпосередньо в литому стані — за рахунок ретельно підбраного легуючого складу, контрольованої геометрії відливки та спеціальних

умов заливання й кристалізації. Цей підхід є доцільним для серійного виробництва деталей, що не підлягають додатковій механічній обробці, адже дозволяє уникнути витрат на термічну обробку. Проте обмеження щодо асортименту виробів залишаються досить жорсткими.

Універсальний метод ізотермічного загартування — більш розповсюджений і гнучкий варіант, при якому литі заготовки (попередньо механічно оброблені або без обробки) проходять термічну обробку. Він дозволяє стандартизувати процес та адаптувати параметри для широкого спектра продукції. При цьому ключовим є баланс між твердістю, необхідною для обробки, та забезпеченням оптимальної структури для наступного термоциклу.

Особливу увагу необхідно приділяти однорідності початкової литої структури, яка виступає основою для подальшої термічної обробки. Зокрема, вміст фериту має бути мінімальним, розподіл та морфологія графітових включень — стабільними та рівномірними, а їх кількість — контрольованою. Всі ці фактори безпосередньо впливають на ефективність перетворень у фазах аустеніту та бейніту під час гарту.

До стабільності хімічного складу сплаву пред'являються суворі вимоги. Навіть незначні варіації партій лігатур або зміна постачальника можуть спричинити суттєві відхилення у структурі виливків, незважаючи на дотримання стандартних параметрів. Важливу роль відіграє вибір модифікаторів сфероїдизації, зокрема Ni_2Mg , який забезпечує стабільне та рівномірне насичення розплаву магнієм, досягаючи коефіцієнта засвоєння до 95%. Це особливо актуально з урахуванням того, що нікель і так використовується у складі легуючого комплексу, отже, витрати на модифікатор не створюють додаткового фінансового навантаження.

У випадку виявлення ливарних дефектів можливе проведення зварювальних робіт з використанням електродів типу МНЧ-2, які гарантують подальшу механічну обробку швів. Для зняття залишкових внутрішніх напружень зварені зони піддають відпуску — нагрів до температури близько $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, витримка і охолодження на повітрі.

Перед остаточною обробкою проводиться перевірка геометричних параметрів корпусу. У разі потреби можливе застосування електродного наплавлення з метою компенсації похибок. Проте варто враховувати, що наплавлення на масивну площу (10–35 мм і більше) може вплинути на загальні механічні характеристики деталі.

Проведення термообробки корпусів є обов'язковим у зв'язку з такими причинами: Недостатність властивостей литої структури. Вихідна мікроструктура після кристалізації часто не відповідає вимогам за міцністю, ударною в'язкістю чи твердістю. Внутрішні напруження. Різна товщина стінок виливки призводить до неоднорідного охолодження, що викликає термічні напруження. Оптимізація умов для механообробки. Вирівнювання твердості забезпечує зниження зносу інструменту та підвищення якості обробки поверхонь.

Таким чином, інтеграція технології виготовлення корпусів черв'ячних редукторів із застосуванням АБЧКГ дозволяє досягти високої надійності, довговічності та економічної ефективності, що особливо актуально для сучасного машинобудування.

3.4 Висновки за розділом

У розділі виконано розрахунок навантажень, які діють на корпус та черв'ячне колесо редуктора. Визначено характер їх розподілу та абсолютні проектні значення.

Застосовуючи метод кінцевих елементів проведено імітаційне моделювання навантаження корпусу редуктора у сборі. Визначено, що найбільші еквівалентні напруження, які виникають у корпусі редуктора, розміщені по поверхні контакту підшипників черв'яка. Локальні перевищення допустимих напружень викликані похибками у накладені елементної сітки по поверхнях змінної форми. Обґрунтовано використання чавуну з кулястим графітом, як потенційно можливого матеріалу для виготовлення елементів механічної передачі. Визначено оптимальні легуючі елементи та послідовність термічної обробки для підвищення техніко-експлуатаційних показників лиття.

4 ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Забезпечення якості виробу

Для забезпечення ефективної, довговічної та безпечної експлуатації черв'ячних передач необхідно приділяти особливу увагу технології їх виготовлення, зокрема литтю корпусних деталей, таким як корпус редуктора. Ливарне виробництво для черв'ячних передач вимагає не лише точного дотримання геометрії та параметрів поверхні, але й забезпечення високих механічних властивостей, стабільної структури матеріалу та мінімізації внутрішніх дефектів.

Аустенітно-бейнітний чавун з кулястим графітом поєднує чудові експлуатаційні якості з високими ливарними властивостями, що робить його придатним для виготовлення навантажених вузлів черв'ячних передач. Він характеризується хорошими демпфуючими і антифрикційними властивостями, а також високою міцністю і зносостійкістю.

Для отримання аустенітно-бейнітної структури матриці використовуються два основних технологічні підходи:

- Легування у литому стані: індивідуально підібрані легуючі елементи (переважно Ni і Mo), а також оптимізація геометрії вилівка і параметрів процесу лиття.
- Термічна обробка: універсальні методи термообробки литих заготовок, які дозволяють досягти бажаної структури при одночасному забезпеченні стабільності параметрів у партіях виливків.

Перший метод застосовується для масового виробництва деталей без додаткової обробки, тоді як другий є більш гнучким і частіше використовується у виробництві корпусів редукторів, з урахуванням подальшої механічної обробки та термічного впливу.

Проблемним аспектом залишається забезпечення стабільності структури вилівка, мінімального вмісту фериту і рівномірного розподілу графітових включень. Це вимагає жорсткого контролю над усіма етапами технологічного

процесу — від підбору шихтових матеріалів і модифікаторів до режимів кристалізації. Для сфероїдизації графіту перспективними є модифікатори на основі Ni_2Mg , які забезпечують високу ефективність при введенні магнію в чавун.

Після лиття можливі окремі дефекти, які усуваються зварюванням з використанням електродів типу МНЧ-2, придатних для обробки після зварювання. Щоб уникнути залишкових напружень, перед чистовою обробкою проводиться відпуск при температурі до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ з подальшим повільним охолодженням.

Перед остаточним складанням черв'ячної передачі корпус проходить чорнову механічну обробку, перевірку геометрії та, за необхідності, локальну електродну наплавку для корекції допусків. Варто враховувати, що наплавка на великій площі може вплинути на структуру і властивості чавуну, тому застосовується обережно.

Висока якість деталей черв'ячної передачі напряму впливає на безпеку і надійність її експлуатації. Тому важливою частиною виробництва є сертифікація та контроль якості.

Сертифікація – це процедура підтвердження відповідності продукції стандартам і вимогам, встановленим на національному або міжнародному рівні. Вона ґрунтується на принципах, викладених у стандартах ISO, зокрема щодо управління якістю і маркування продукції.

Контроль якості литих корпусів редуктора може проводитися:

- Руйнівними методами (випробування на зразках, металографічний аналіз структури).
- Неруйнівними методами (НК), серед яких найбільш перспективними є ультразвукові методи контролю (УЗК).

4.2 Контрольовані параметри виливок

Виливки, що використовуються для виготовлення черв'ячних передач, повинні відповідати високим вимогам до фізико-механічних властивостей, а також забезпечувати надійність та довговічність вузла в умовах змінних навантажень. Основу матеріалу таких виливок часто становлять різні види ливарного чавуну —

сірий чавун (СЧ), чавун із вермікулярним графітом (ЧВГ), високоміцний чавун (ВЧ), які істотно різняться між собою за хімічним складом, структурою та властивостями.

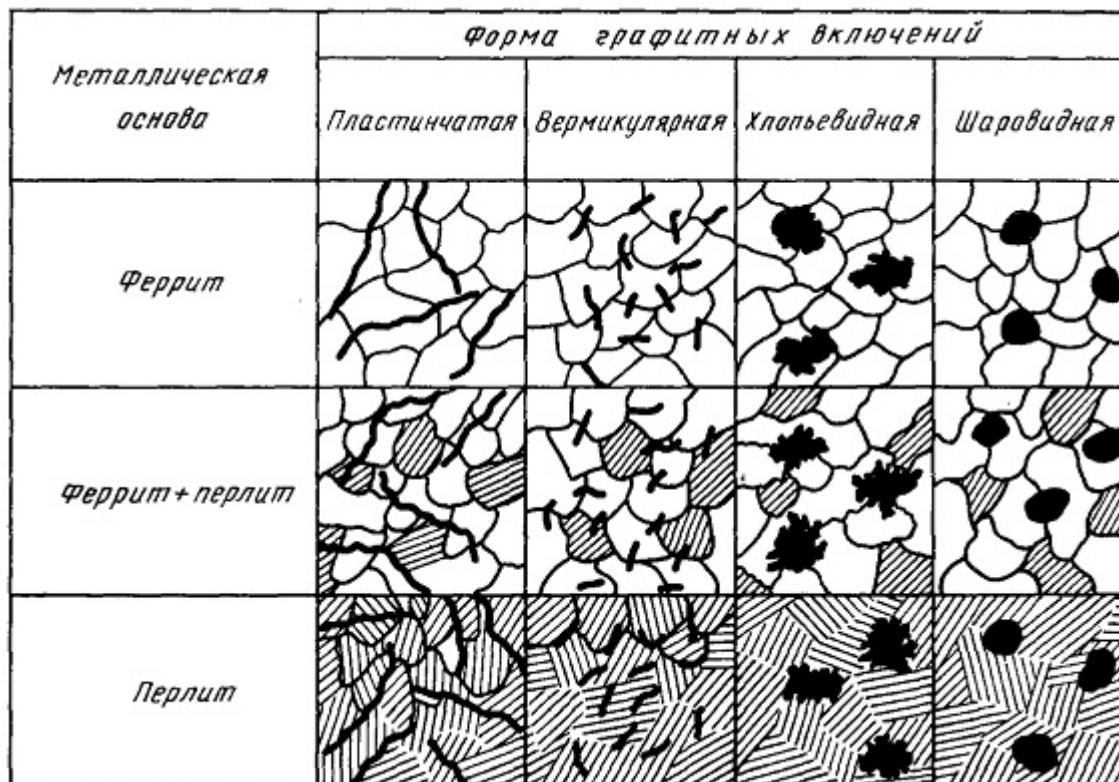


Рисунок 4.1 - Форма графітних включень в виливках чавуну

Особливий інтерес становить вибілений чавун, у якому вуглець входить до складу цементиту — хімічної сполуки з залізом. Саме хімічний склад і структура визначають експлуатаційні характеристики виливки: твердість, міцність, модуль пружності. За межами міцності: найнижчі показники має СЧ, тоді як ВЧ — найміцніший, а ЧВГ займає проміжну позицію. У СЧ, ЧВГ, ВЧ вуглець міститься у вигляді графітових включень різної форми: пластинчастої, вермікулярної та кулястої відповідно (див. рис. 1). Форма та розмір графітових включень безпосередньо впливають на характеристики виливок, зокрема на зносостійкість, ударну в'язкість та тріщиностійкість.

Для виливок корпусів черв'ячних передач важливими є такі контрольовані параметри:

У виливках із СЧ, ЧВГ і ВЧ виявлено стійкий зв'язок між швидкістю поздовжніх УЗК і фізико-механічними властивостями. Наприклад:

- при зменшенні розмірів і зміні форми графіту з пластинчастої на кулясту швидкість УЗК зростає;
- збільшення частки цементиту чи перліту в матриці також веде до підвищення швидкості;
- зміна швидкості УЗК в різних ділянках вилівка вказує на неоднорідність структури, яка може бути критичною для елементів черв'ячних передач.

Ці характеристики дозволяють реалізувати непошкоджувальний контроль якості виливок корпусів редукторів, що є важливою складовою сучасного виробництва. Особливо цінним є можливість дистанційного або локального контролю товщини стінок і внутрішніх дефектів корпусу без розрізання чи механічного втручання.

Загалом, оцінка параметрів виливок черв'ячних передач повинна базуватись на результатах УЗК з аналізом швидкості поширення хвиль; візуалізації структури (металографія); хімічному аналізу сплаву; кореляції між структурою та механічними властивостями.

Завдяки цьому можна не лише підвищити якість лиття, але й забезпечити високу експлуатаційну надійність редукторних вузлів.

4.3 Метрологічне забезпечення проведення дослідження

У рамках експериментального дослідження з контролю якості виливок для корпусів черв'ячних передач було обрано чавун марки СЧ15 згідно з ГОСТ 1412-85. Такий вибір обумовлений тим, що цей матеріал має граничні акустичні властивості серед чавунів — зокрема, низьку прозорість для ультразвукових хвиль, що ускладнює використання ехоімпульсного методу неруйнівного контролю. Успішна реалізація УЗ-контролю на матеріалах із такими характеристиками дозволяє поширити результати на інші типи чавуну, зокрема ті, що мають властивості, близькі до конструкційних сталей (наприклад, Ст2). Фізико-механічні характеристики вилівки з чавуну СЧ15 ГОСТ 1412-85 представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Фізико-механічні характеристики виливки з чавуну СЧ15 ГОСТ 1412-85

Марка чавуна	Межа міцності σ_6 , МПа	Твердість НВ	Щільність ρ , кг/м ³	Модуль пружності, МПа	К-т лінійного розширення α , 1/°C
СЧ15	150	200	7000	700-1100	9,0 x 10 ⁻⁶

Хімічний склад виливки з чавуну СЧ15 ГОСТ 1412-85 представлений в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Хімічний склад виливки з чавуну СЧ15 ГОСТ 1412-85

Марка чавуна	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %
СЧ15	3,15	1,8	0,8	0,3	0,026

Ступінь евтектичності чавунної виливки (насичення чавуну вуглецем) визначається за формулою 3, використовуючи дані з таблиці 4.2:

$$SC = \frac{[C]}{4,23 + 0,312 \cdot [Si] + 0,275 \cdot [P]} = \frac{3,15}{4,23 + 0,312 \cdot 1,8 + 0,275 \cdot 0,3} = 0,65$$

Для забезпечення достовірності результатів дослідження було проведено комплексну метрологічну підготовку:

- відібрано виливки з СЧ15 товщиною 5 мм;
- виконано руйнівний контроль для вивчення мікроструктури, розміру зерна та характеру розташування графіту;
- проведено металографічний аналіз зразків для візуалізації структури на зламі (рис. 4.2)

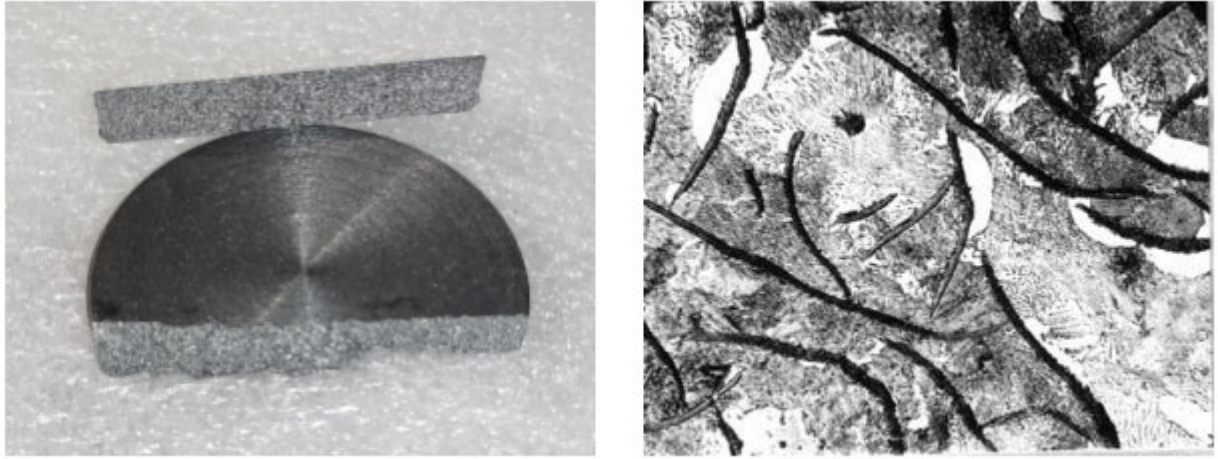


Рисунок 4.2 - Фото зразка на зламі та мікроструктура виливки

Мікроструктура чавуну СЧ15 представлена переважно включеннями пластинчастого графіту, рівномірно розподіленими в металевій основі. Це дозволяє оцінити акустичну анізотропію матеріалу, що критично важливо для моделювання поширення УЗ-хвиль у виливках складної геометрії, таких як корпуси черв'ячних редукторів.

Для дослідження було виготовлено набір стандартних ультразвукових зразків, які виступають як еталони у процесі калібрування та налагодження УЗ-контролю. Комплект складався із семи циліндричних зразків діаметром 36 мм і висотою від 10 до 150 мм. Поверхні оброблялись до шорсткості не більше $Rz = 6,3$ мкм, що забезпечує стабільний акустичний контакт при вимірюваннях. Зовнішній вигляд еталонів представлено на рисунку 4.4

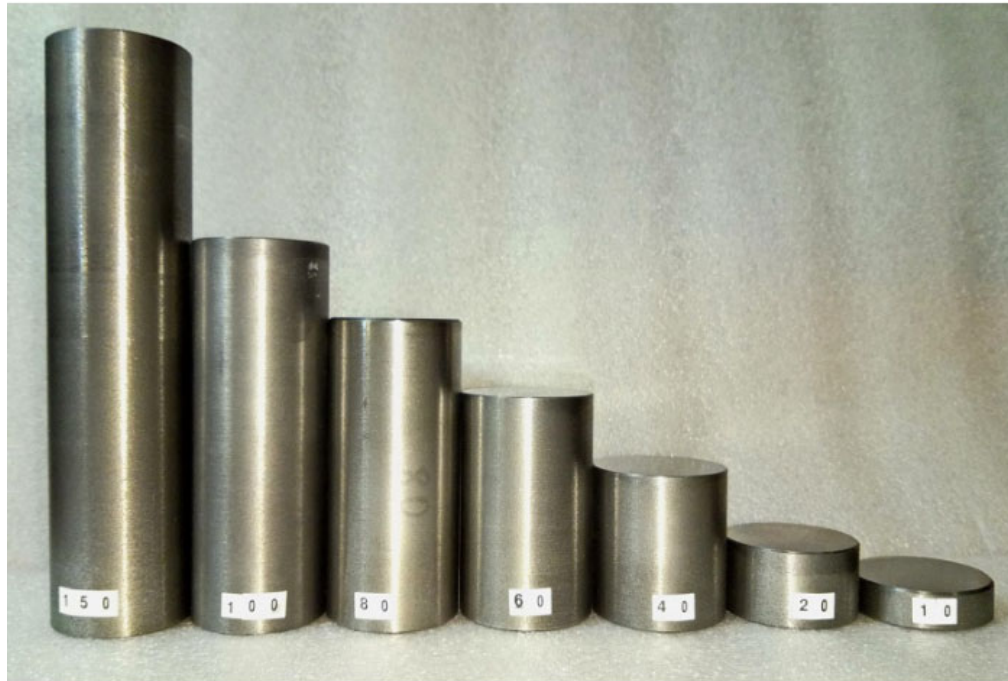


Рисунок 4.4 - Типові зразки для проведення ультразвукового дослідження структури чавуну

Ультразвуковий контроль проводився з використанням сучасних метрологічно атестованих приладів:

- УЗ-товщиномір UT-4DL виробництва ТОВ «УЛЬТРАТЕХ»;
- П'єзоелектричні перетворювачі П112-2,5-12/2-Б-01 і П112-2,5-12/2-Б-02 моделі 2,5Б12/2 — виготовлені компанією ТОВ «ШУКАЧ»;
- Контактні середовища: гель для УЗК, вазелінове масло, що забезпечують мінімальні втрати акустичної енергії при передаванні коливань від датчика до зразка.

Таке метрологічне забезпечення дозволяє гарантувати стабільність, відтворюваність та точність вимірювань, що критично важливо при розробці методик контролю виливок для черв'ячних передач. Крім того, застосування сертифікованих приладів дозволяє адаптувати методику до умов серійного виробництва та експлуатації виробів, що підлягають регламентованому технічному контролю згідно з вимогами ДСТУ та ISO.

Таким чином, проведення дослідження з дотриманням вимог метрологічного забезпечення не лише підвищує достовірність отриманих результатів, але й дозволяє верифікувати ефективність УЗ-контролю як методу для оцінювання

внутрішнього стану виливок, виготовлених із складних чавунів для черв'ячних механізмів.

4.4 Порядок проведення ультразвукового контролю

Процес проведення ультразвукового контролю (УЗК) корпусів та елементів черв'ячних передач передбачає чітко регламентовану послідовність підготовчих, налаштувальних та вимірювальних операцій, які забезпечують високу точність і достовірність результатів. На рис. 4.5 і 4.6 показані засоби УЗ контролю і комплект зразків в процесі проведення вимірювань швидкості УЗК і товщини стандартного зразка.



Рисунок 4.5 – Ультразвуковий контроль на стандартних зразках

Перед початком діагностичних робіт здійснюється технічна та метрологічна підготовка обладнання: візуальна перевірка УЗ-перетворювачів та товщиномірів; перевірка відповідності умов експлуатації приладів (температура, вологість, стабільність живлення); виконання калібрування на стандартних еталонних зразках, виготовлених із чавуну СЧ15 згідно з ГОСТ 1412-85.

Калібрувальні зразки мають товщину від 10,0 мм до 150,0 мм і дозволяють адаптувати роботу УЗ-перетворювача до змін геометрії, структури та акустичних характеристик матеріалу, які притаманні реальним виливкам корпусів черв'ячних передач.

Основним вимірювальним пристроєм є ультразвуковий товщиномір UT-4DL, який забезпечує: точне визначення швидкості розповсюдження поздовжніх ультразвукових хвиль в матеріалі; вимірювання часу проходження імпульсу в прямому та відбитому напрямку; визначення товщини об'єкта контролю луно-імпульсним методом навіть при односторонньому доступі до зразка.

Після завершення налаштування виконується серія контрольних вимірювань, які охоплюють: визначення товщини стінок корпусу в різних зонах; виявлення внутрішніх дефектів (тріщини, газові включення, пори); оцінка однорідності структури по висоті й діаметру елементів.

Контактне середовище (спеціальний УЗ-гель або вазелінове масло) забезпечує стабільне з'єднання між перетворювачем і поверхнею, що суттєво підвищує якість сигналу та зменшує похибки приладу.

4.5 Аналіз результатів контролю

Результати випробувань дозволяють: визначити найбільш ефективні комбінації датчиків і режимів роботи приладу для конкретного типу чавуну; уточнити налаштування товщиноміра для роботи з нестандартними поверхнями; розробити комплексну методику ультразвукового контролю фізико-механічних властивостей конструкційних виливок з СЧ, адаптовану до умов серійного виробництва.

Для забезпечення надійності та довговічності роботи черв'ячних редукторів особливу увагу приділяють контролю якості виготовлення їх елементів. Одним із найефективніших методів неруйнівного виявлення поверхневих дефектів дрібних і складнопрофільних деталей є капілярна дефектоскопія



Рисунок 4.6 - Комплект для капілярного контролю

Капілярний контроль базується на здатності індикаторних рідин (пенетрантів) проникати в мікротріщини та інші відкриті на поверхню несплошності за рахунок капілярного ефекту. Після видалення надлишків пенетранта з поверхні та нанесення проявника, дефекти проявляються як яскраві сліди, що дозволяє точно оцінити їх місце розташування, розмір та орієнтацію.

Цей метод особливо корисний у тих випадках, коли візуальний контроль недостатньо чутливий, або коли геометрія деталі не дозволяє використання інших методів.

Капілярна дефектоскопія застосовується для контролю:

- поверхонь корпусів редукторів;
- контактних зон черв'яка і черв'ячного колеса;
- місць зварювання, наплавлення або термічного впливу;
- різьбових з'єднань або посадкових отворів.

Це особливо важливо для виявлення зародків втомних тріщин, розшарувань та капілярних пор, які можуть ініціювати руйнування в умовах експлуатаційного навантаження.

Контроль проводиться згідно з ДСТУ ГОСТ 18442, з дотриманням наступних етапів:

1. Підготовка об'єкта контролю: усунення всіх забруднень, мастила, оксидів, фарби; механічне, хімічне або парове очищення; висушування контрольованої поверхні.

2. Нанесення пенетранта: розпилення або нанесення пенетранта пензлем; витримка для проникнення (залежить від температури поверхні та в'язкості пенетранта); застосовуються високочутливі кольорові або флуоресцентні склади.
3. Видалення залишків пенетранта: обережне протирання поверхні серветкою; застосування спеціального очищувача (наноситься на серветку, а не безпосередньо на деталь); повторне сушіння.
4. Нанесення проявника: тонким рівномірним шаром у вигляді аерозолю, пензлем або зануренням; проявник витягує залишки пенетранта з дефектів, створюючи контрастне зображення.
5. Оцінка результатів контролю: візуальна інтерпретація або фіксація за допомогою фото- чи відеоапаратури; для флуоресцентних складів — огляд в УФ-променях у затемненому приміщенні.

4. Види капілярних методів

Залежно від способу реєстрації сигналу, розрізняють: кольоровий (для денного світла); ахроматичний (на основі контрасту яскравості); люмінесцентний (для УФ освітлення); комбінований люмінесцентно-кольоровий.

5. Технічні особливості

Максимально допустима шорсткість контрольованої поверхні — Ra 3,2. Ширина розкриття дефектів, що виявляються, класифікується за п'ятьма рівнями чутливості: від <math><1\text{ мкм}</math> до $>500\text{ мкм}$. Найбільш поширеними матеріалами для капілярної дефектоскопії є алюмінієві сплави, чавун, сталі, кольорові метали, пластики, кераміка. Метод придатний навіть для феромагнітних матеріалів, коли неможливе застосування магнітопорошкового контролю.

6. Засоби контролю

До основних засобів, що використовуються під час капілярної дефектоскопії, належать: аерозольні комплекти (пенетранти, проявники, очищувачі); ручні розпилювачі, пневмопістолети; УФ-джерела світла (для флуоресцентного методу); еталонні зразки з контрольними тріщинами для перевірки чутливості.

Контрольні зразки є сертифікованими виробами, що дозволяють оцінити якість проникнення пенетрантів та забезпечити повторюваність результатів згідно з вимогами стандартів.

Капілярна дефектоскопія є надійним та простим у впровадженні методом виявлення поверхневих дефектів деталей черв'ячних передач. Її ефективність особливо проявляється в умовах контролю відповідальних елементів, які працюють під змінними навантаженнями та вимагають високого ступеня надійності. Включення цього методу до складу комплексної системи неруйнівного контролю редукторів дозволяє істотно підвищити якість продукції та зменшити ризик прихованих дефектів на етапі експлуатації.

4.6 Висновки за розділом

У цьому розділі представлено результати аналізу ефективності сучасних методів контролю якості корпусних деталей редуктора черв'ячної передачі, виготовлених із металевих сплавів. Основна увага приділяється виявленню як зовнішніх, так і прихованих дефектів, які можуть виникнути під час лиття, механічної обробки або експлуатації елементів редуктора. Розглянуто контрольовані параметри литих корпусів, методика підготовки зразків та засоби діагностики, зокрема ультразвукове та капілярне неруйнівне тестування.

Поєднання капілярного та ультразвукового контролю забезпечує повну оцінку стану корпусів черв'ячних редукторів, дозволяючи своєчасно виявляти критичні дефекти, уникати експлуатаційних відмов та підвищити надійність редукторного обладнання. Методи мають високу чутливість, простоту застосування та універсальність щодо матеріалів, форм та розмірів деталей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У розділі виконано розрахунок навантажень, які діють на корпус та колесо редуктора. Визначено характер їх розподілу та абсолютні проектні значення.

Застосовуючи метод кінцевих елементів проведено імітаційне моделювання навантаження корпусу редуктора у сборі.

Визначено, що найбільші еквівалентні напруження, які виникають у колесі редуктора, розміщені по поверхні ніжки зубців. Локальні перевищення допустимих напружень викликані похибками у накладені елементної сітки по поверхням змінної форми.

Представлено технологію виготовлення лиття із чавуну з кулястим графітом, як потенційно можливого матеріалу для виготовлення черв'ячного колеса.

Визначено оптимальні легуючі елементи та послідовність термічної обробки для підвищення техніко-експлуатаційних показників лиття.

У розділі представлено результати аналізу існуючих методів контролю якості деталей із металевих сплавів. Представлено контрольовані параметри виливок та діагностичні засоби для їх контролю.

Наведено методику із підготовки зразків та проведення ультра-звукового дослідження металевих виливок для визначення твердості, однорідності структури та наявності скритих дефектів.

Метрологічне забезпечення проведення експерименту полягає у застосуванні ультразвукового діагностичного прилади та хімічних пенетратів для проведення капілярного контролю із визначення мікротріщин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Melosh, R. J. Basis for Derivation of Matrices for the Direct Stiffness method / R. J. Melosh // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 1965. – № 1. – P. 1631-1637.
2. Функціонально-вартісний аналіз – інтернет сторінка: https://uk.wikipedia.org/wiki/Функціонально-вартісний_аналіз ;
3. Course Documents for Advanced Computer Aided Design, <https://web.cimne.upc.edu/users/xmartinez/MAE656/index.html>
4. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 14 by Huei-Huang Lee, http://myweb.ncku.edu.tw/~hhlee/Myweb_at_NCKU/ANSYS14.html
5. Зіборов К.А. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи для бакалаврів спеціальності 132 Матеріалознавство ОПП «Промислова естетика і сертифікація матеріалів та виробів» / К.А. Зіборов, Н.О. Ротт, Т.О. Письменкова, С.О. Федоряченко; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ«ДП». 2022. 40 с.
6. Загальні відомості та класифікація черв'ячних передач. [Електронний ресурс].URL: http://elib.lutskntu.com.ua/book/mbf/olk_i_tmm/2011/11-45/page27.html.
7. ДСТУ 3362-96 Модифікатори для виливків із чавуну. Загальні технічні умови.- Чинний від 1997-07-01; Введено вперше.-К.: Держстанд. України, 1997.-19 с.
8. ДСТУ 2551-94 Отримання високоміцного чавуну із кулястим графітом. Загальні вимоги та норми.- Чинний від 1995-07-01; Введено вперше.-К.: Держстанд. України, 1994.-33 с.
9. ДСТУ 3925-99 Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки.- Чинний від 2000-07-01; Введено вперше.-К.: Держстанд. України, 2000.-7 с.
10. ДСТУ 3926-99 Чавун з вермикулярним графітом для виливків. Марки.- Чинний від 2000-07-01; Введено вперше.-К.: Держстандарт України, 2000.- 6 с.
11. Адамов І.В., Хітько Л.О. Розрахунки та оптимізація щихти для ви-робництва виливків із сталі і чавуну: Навч. посіб. –К.: НМК ВО, 1991.-176 с.