

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
**Кафедра прикладного матеріалознавства  
і технології конструкційних матеріалів**

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Завідувач кафедри  
Гапонова О. П.

\_\_\_\_\_ дата, підпис

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

**за напрямом підготовки 132 «Матеріалознавство»**

Тема роботи : «Вибір матеріалу, маршрутної технології виготовлення заготовки і термічної обробки валу двоступеневого горизонтального редуктора»

Виконав(ла):  
студент Сергієнко Вячеслав Михайлович

Керівник:  
Доцент Говорун Тетяна Павлівна

Залікова книжка № \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ дата, підпис

\_\_\_\_\_ підпис

Захищена з оцінкою

Секретар ЕК:  
Сидоренко Ю.Ю.

\_\_\_\_\_ оцінка, дата

\_\_\_\_\_ дата, підпис

Суми 2021

Сумський державний університет  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра «Прикладне матеріалознавство і технології конструкційних матеріалів»  
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Гапонова О.П.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 року

**ЗАВДАННЯ  
ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА ЗДОБУТТЯ СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА**

Сергієнко Вячеслав Михайлович

1. Тема проекту (роботи)

«Вибір матеріалу, маршрутної технології виготовлення заготовки і термічної обробки валу двоступеневого горизонтального редуктора» \_\_\_\_\_ затверджена наказом по університету від “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.№ \_\_\_\_\_

2. Термін здачі студентом закінченого проекту(роботи) \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ пор	Назва етапу дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапу проекту (роботи)	Примітка
1	Розділ 1. Характеристика та умови експлуатації виробів, вимоги до матеріалу		Виконано
2	Розділ 2. Огляд літератури		Виконано
3	Розділ 3. Вибір матеріалу та методів дослідження		Виконано
4	Розділ 4. Маршрутна технологія отримання деталі «вал редуктора»		Виконано
5	Розділ 5. Розрахунково-експериментальна частина		Виконано

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник проекту \_\_\_\_\_  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 72 сторінки, зокрема 10 таблиць, 22 рисунки, список із 29 використаних джерел на 3 сторінках, 2 додатків на 2 сторінках.

Вал, є поширеною і відповідальною деталлю машин і механізмів, в тому числі і редукторів. Високі вимоги, пропоновані з виготовлення валів: по точності, по міцності і за експлуатаційними даними вимагають серйозного комплексного опрацювання на всіх стадіях процесу виробництва. Така деталь, як вал редуктора, піддається впливу знакозмінного навантаження. Основними причинами, що впливають на зниження надійності і довговічності валів редукторів, є різні види зношування та пошкодження їх робочих поверхонь, а також втомні руйнування.

Матеріал для виготовлення вала повинен відрізнитись довговічністю, надійністю і витримувати динамічні навантаження. Також треба не забувати, що деякі властивості матеріал може набувати тільки в ході його термічної обробки.

**Мета роботи** полягає в виконанні проектування термічної дільниці, маршрутної технології виготовлення і технологічного процесу зміцнення вала двоступеневого горизонтального редуктора РМ-400 із застосуванням прогресивних технологій термічної обробки для підвищення експлуатаційних характеристик виробу.

**Методи досліджень:** використання стандартних методів визначення фізико-механічних властивостей та структури сталі 40Х для виготовлення вала двоступеневого горизонтального редуктора РМ-400 та сучасних мікроскопічних і металографічних методів дослідження, що включають мікроскопічний і макроскопічний аналіз, теоретичні і практичні методи, огляд літературних джерел і патентний пошук.

Ключові слова: вал, редуктор, твердість, пластичність, прокат, термічна обробка, легована сталь, нормалізація, термополіпшення, гартування, високий відпуск, струми високої частоти.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ...</b>	6
<b>ВСТУП.....</b>	7
<b>РОЗДІЛ 1.....</b>	11
<b>ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕТАЛІ.</b>	
<b>ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛУ «ВАЛА РЕДУКТОРА».....</b>	11
1.1 Характеристика і аналіз умов експлуатації деталі «вал редуктора».....	11
1.2 Можливі причини виникнення дефектів або виходу з ладу виробу в процесі експлуатації.....	17
1.3 Вимоги до матеріалу для виготовлення валу редуктора.....	21
Висновки.....	24
<b>РОЗДІЛ 2.....</b>	25
<b>ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	25
2.1 Огляд технологій поверхневого зміцнення валів .....	25
2.2 Застосування поверхневого гартування для зміцнення виробів .....	27
Висновки.....	29
<b>РОЗДІЛ 3 .....</b>	30
<b>ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	30
3.1 Вибір оптимального матеріалу для деталі «вал двоступеневого горизонтального редуктора» .....	30
3.2 Вплив легуючих елементів на властивості вибраної сталі .....	34
3.3 Вибір методів і методик дослідження .....	37
Висновки.....	39
<b>РОЗДІЛ 4 .....</b>	40
<b>МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ДЕТАЛІ «ВАЛ РЕДУКТОРА .....</b>	40
4.1 Вибір методу отримання заготовки .....	40
4.2 Розробка технологічного процесу отримання деталі «вал редуктора» ....	41
Висновки.....	47
<b>РОЗДІЛ 5.....</b>	48
<b>РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТНА ЧАСТИНА.....</b>	48
5.1 Термічна обробка деталі «вал редуктора».....	48
5.2 Вибір необхідного обладнання для отримання валу редуктора, проведення термічної обробки та розрахунків його кількості .....	57
5.2.1 Вибір необхідного обладнання для отримання валу редуктора та проведення термічної обробки.....	57
5.2.2 Розрахунок необхідної кількості обладнання для проведення термічної обробки.....	63
5.3. Проектування плану термічної дільниці і вантажопотоків .....	66
Висновки.....	70
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	71
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	72
Додаток А Креслення деталі .....	75
Додаток Б Проектування термічного цеху.....	76

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

СВЧ – струми високої частоти

ВДЕ – висококонцентроване джерело енергії

МИМ-7 – металографічний вертикальний мікроскоп

ТО – термічна обробка

$\sigma_{0,2}$  – межа текучості умовна, МПа

$\sigma_B$  – межа міцності при розтягу, МПа

$\sigma_T$  – межа пропорційності (межа текучості для залишкової деформації), МПа

$\delta_5$  – відносне подовження при розриві, %

$\psi$  – відносне звуження, %

КСУ – ударна в'язкість, кДж/м<sup>2</sup>

НВ – твердість за Бринелем

НРС – твердість за Роквелом, шкала С

## ВСТУП

Підвищення економічно доцільної довговічності виробів можливо за рахунок підвищення зносостійкості матеріалів. Рішення цієї актуальної технічної задачі базується на результатах глибоких досліджень і наукових знань.

Для підвищення втомної витривалості, зносостійкості необхідно підвищувати твердість поверхні, що досягається поверхневим гартуванням, хіміко-термічної обробкою, пластичною деформацією для створення на поверхні деталей залишкових напруг стиснення.

Вал, є поширеною і відповідальною деталлю машин і механізмів, в тому числі і редукторів. Високі вимоги, пропоновані з виготовлення валів: по точності, по міцності і за експлуатаційними даними вимагають серйозного комплексного опрацювання на всіх стадіях процесу виробництва [1, 2].

Редуктор призначений для передачі виконавчому елементу обертання. Редуктор - це агрегат, що включає в себе одну або кілька передач зачепленням, змонтованих в корпусі. Редуктор призначений в основному для зниження частоти обертання і, відповідно, збільшення крутного моменту. Будь-який редуктор має швидкохідний (вхідний) і тихохідний (вихідний) вал. Вал працює в поєднанні з напресованим на нього зубчастим колесом. Обертання валу відбувається в закритому корпусі редуктора [3].

Така деталь, як вал редуктора, піддається впливу знакозмінного навантаження. Основними причинами, що впливають на зниження надійності і довговічності валів редукторів, є різні види зношування та пошкодження їх робочих поверхонь, а також втомні руйнування [1, 2].

Тому **тема кваліфікаційної роботи бакалавра** по вибору матеріалу, маршрутної технології виготовлення заготовки і зміцнюючої термічної обробки валу двоступеневого горизонтального редуктора типу РМ-400 для підвищення експлуатаційних характеристик деталі є **актуальною**.

Різноманіття видів зношування поверхонь валів і умов їх виникнення та розвитку обумовлює і різноманіття методів усунення або локалізації зносу.

Технологічні засоби підвищення зносостійкості так само, як і всі інші, повинні використовуватися з урахуванням видів зношування, умов їх виникнення і бути спрямовані на усунення діапазону нормального окислювального зносу і мінімізацію його інтенсивності. Підвищення зносостійкості в результаті застосування методів зміцнюючої технології досягається за рахунок збільшення твердості і зниження пластичності поверхневого шару, а в деяких випадках - за рахунок зміни хімічного і фазового складу цього шару [1, 3].

Термічна обробка металів і сплавів є одним з найпоширеніших методів зміни їх властивостей. Для зміни об'ємних властивостей матеріалу валів застосовують різні види об'ємної термічної обробки (відпал, гартування, відпуск), а для зміни властивостей поверхневих шарів - поверхнєве гартування і хіміко-термічну обробку. Поверхнєве гартування полягає в нагріві тонкого поверхневого шару до температури утворення в ньому аустеніту і наступному швидкому охолодженні для фіксації дрібногольчатого мартенситу. Нагрівання при поверхнєвому гартуванні здійснюється струмами високої частоти [4-6].

Технологічні методи зміцнення поверхневих шарів валів, що забезпечують зміну їх механічних та фізико-хімічних властивостей, грають важливу роль в підвищенні їх зносостійкості і довговічності. За допомогою цих методів можна вирішити дві принципові завдання проблеми підвищення зносостійкості [5, 6].

Перше завдання, основний зміст якого полягає в усуненні можливостей пошкоджуваності, полягає в розширенні діапазону швидкостей і нормальних тисків протікання нормального (окислювального) зносу. Вирішення його ґрунтується на першому положенні теорії зносу і його основних наслідках. Застосування різних методів поверхнєвої зміцнюючої технології в поєднанні з конструктивними засобами дозволяє створити при роботі пар тертя такі умови, при яких розвивається універсальне явище динамічної рівноваги і саморегулювання процесів активізації та пасивування поверхневих шарів. Оптимізація цих процесів, в результаті застосування різних методів зміцнюючої технології, дозволяє досягти оптимального співвідношення між інтенсивностями утворення і руйнування вторинних структур (різного роду окисних плівок) і в



широкому діапазоні умов роботи пар тертя усунути причини, що викликають неузгодженість цих процесів [5, 6].

Другим принциповим завданням в боротьбі зі зносом, що впливає з другого положення теорії зносу і розв'язання за допомогою технологічних методів зміцнення поверхні, є зниження інтенсивності окисного зношування [5, 6].

**Мета роботи** полягає в виконанні проектування термічної дільниці, маршрутної технології виготовлення і технологічного процесу зміцнення вала двоступеневого горизонтального редуктора РМ-400 із застосуванням прогресивних технологій термічної обробки для підвищення експлуатаційних характеристик виробу.

В роботі розглянуті наступні питання:

- актуальність теми;
- призначення, область застосування валу, а також вимоги, що пред'являються до валів редукторів, основні технологічні та експлуатаційні властивості, вплив на них зовнішніх параметрів;
- причини виходу з ладу деталей типу «вал редуктора»;
- був обраний матеріал і проведено проектування маршрутної технології отримання виробу;
- визначена необхідна для отримання певних властивостей термічна обробка;
- запропонований один з перспективних процесів зміцнення деталі типу «вал редуктора»;
- було проведено проектування плану дільниці і вантажопотоків.

**Методи досліджень:** використання стандартних методів визначення фізико-механічних властивостей та структури сталі 40Х для виготовлення вала двоступеневого горизонтального редуктора РМ-400 та сучасних мікроскопічних і металографічних методів дослідження, що включають мікроскопічний і макроскопічний аналіз, теоретичні і практичні методи, огляд літературних джерел і патентний пошук.

**До завдань досліджень** відносяться наступні: аналіз літературних джерел та проведення патентного пошуку з метою вдосконалення маршрутної технології виготовлення і зміцнюючої термічної обробки вала двоступінчастого горизонтального редуктора для підвищення експлуатаційних характеристик виробу.

**Практичне значення одержаних результатів.** Було обрано матеріал, спроектовано термічну дільницю, запропоновано маршрутну технологію виготовлення і технологічний процес зміцнення вала двоступеневого горизонтального редуктора РМ-400 для підвищення експлуатаційних характеристик виробу.

**Апробація результатів роботи.** Тези конференції. «Вибір матеріалу та зміцнюючої термічної обробки вала двоступеневого горизонтального редуктора» [7].

## РОЗДІЛ 1

### ХАРАКТЕРИСТИКА ТА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДЕТАЛІ. ВИМОГИ ДО МАТЕРІАЛУ «ВАЛА РЕДУКТОРА»

#### 1.1 Характеристика і аналіз умов експлуатації деталі «вал редуктора»

Провідна роль машинобудування серед інших галузей народного господарства визначається тим, що основні виробничі процеси у всіх галузях промисловості, будівництва і сільського господарства виконують машини і механізми. Одним з найбільш широко застосовуваних механізмів є редуктор.

Свою назву редуктор отримав від латинського слова *reductor* - приводить назад. По суті, редуктор – це зубчаста або черв'ячна передача, яка використовується для зміни обертаючих моментів і кутових швидкостей. Він застосовується в приводах різноманітних машин і служить для зниження кутової швидкості вала з одночасним підвищенням значення крутного моменту. Редуктори знаходять застосування в самих різних промислових сферах, але особливо високо затребувані в машинобудуванні, в тому числі автомобілебудівній галузі [1, 3, 7].

Конструктивно, редуктор - це пристрій, що складається з корпусу, всередині якого розміщені елементи передачі - вали, шестерні та зубчасті колеса, підшипники і інше. За рахунок різниці передавальних чисел сполучених шестерень, редуктор знижує швидкість обертання вихідного вала, щодо швидкості вхідного. Завдяки цій властивості, редуктор активно використовується як приводна техніка для різних машин або механізмів. Універсальні можливості, якими володіє редуктор, визначили його широке поширення в техніці та приладобудуванні [1, 3, 7].

Для правильного підбору редуктора необхідно знати наступні параметри приводу: позначення типу; потужність [кВт]; передавальне відношення; число обертів двигуна; швидкість на виході; напруга/частота; монтажне положення; положення розподільчої коробки і варіанти двигуна (наприклад, крутний момент гальма). Для модифікованих варіантів необхідно більше число параметрів, а саме:

розміри вихідного вала і фланця; клас ізоляції; стандарт захисту; радіальні і осьові сили, що діють на вихідний вал редуктора; робочий цикл; число спрацьовувань в годину; ненормальні кліматичні умови, включаючи також і колір редуктора [1, 3].

Редуктори класифікуються за такими основними ознаками: типом передачі (зубчасті, черв'ячні або зубчато-черв'ячні); числу ступенів (одноступінчасті, двоступінчасті і ін.); типу зубчастих коліс (циліндричні, конічні, конічно-циліндричні і ін.); відносного розташуванню валів редуктора в просторі (горизонтальні, вертикальні); особливостям кінематичної схеми (розгорнута, з роздвоєною ступінню і ін.) [1, 3].

Основні види сучасних редукторів [3]:

- циліндричний (має загальнопромислове застосування, є одним з найбільш популярних різновидів механізму. Як і інші аналогічні пристрої, змінює швидкість обертання і збільшує крутний момент. Випускається в одно-, двох-, трьохступінчатому варіантах);
- черв'ячний (у конструкції наявна передача, різьба якої має черв'ячний профіль. Може бути як одно-, так і двоступінчастим);
- конічно-циліндричний (відрізняється конструкцією робочих елементів, має високий ККД і тривалий термін служби).

Основною перевагою редуктора є велика навантажувальна здатність, сталість передавального числа, високий ККД, хоча і є недоліки: високі вимоги до точності виготовлення і монтажу зубчастих передач (особливо конічної), шум при роботі [3].

Двоступеневі горизонтальні редуктори, виконані по розгорнутій схемі (рис. 1.1) і мають широке застосування. Ці редуктори відрізняються простотою.

У даній роботі проєктований редуктор – редуктор циліндричний двоступеневий горизонтальний загальномашинобудівного застосування типу РМ-400 (рис. 1.2).

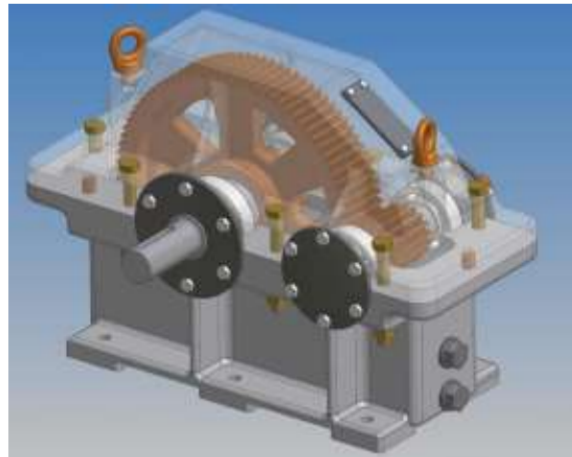


Рисунок 1.1 – Загальний вид горизонтального двоступеневого редуктора



Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд циліндричного двоступеневого горизонтального редуктора загальномашинобудівного застосування типу РМ-400

Редуктори циліндричні двоступеневі горизонтальні загальномашинобудівного застосування типів РМ-250; РМ-350; РМ-400; РМ-500; Р650; РМ-750; РМ-850; РМ-1000 призначені для збільшення крутного моменту та зменшення частоти обертання. Умови застосування редуктора типу РМ-400 [3]:

- тривалість роботи: тривала (без перерв, до 24 годин на добу), з періодичними короткочасними зупинками;
- напрямок обертання тихохідного і швидкохідного валів в обидві сторони;
- максимальна частота обертання вхідного швидкохідного вала 1500 об/хв;
- температурний діапазон зовнішнього середовища: - 40°C - + 50°C, допускається підвищена запиленість, неагресивне середовище;

– для категорій розміщення 1...4 підходять кліматичні виконання У і Т (для роботи в макрокліматичних районах з помірним (У), сухим і вологим (Т) кліматом) за ГОСТ 15150-69.

Технічні характеристики редуктора типу РМ-400 наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики редуктора типу РМ-400

Назва технічних характеристик	Тип редуктора
	РМ-400
Передаточні числа	8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5;40;50
Частота обертання вхідного валу, хв <sup>-1</sup>	от 1500 до 600
Номінальний крутний момент на тихохідному валу, Н·м	835 - 1353
ККД	0,96
Маса, кг, не більше	210

Однією з основних складових будь-якого редуктора є вал. Вали застосовуються для передачі руху обертання без зміни кутової швидкості і притому вздовж осі вала або під невеликим кутом до цієї осі (до 20 °). Коли ж потрібно змінити кутову швидкість або передати обертання під великим кутом, вдаються до колісних передач з гнучкими приводами або без них. Вали, що передають рух, називаються ведучими, а вали, що сприймають рух, - відомими. Розрізняють горизонтальні (лежачі), вертикальні (стоячі) і похилі вали [1, 3, 7].

У загальному машинобудуванні застосовують різні вали, починаючи від дрібних і закінчуючи великими, діаметром до 200 см і вагою до декількох тонн. Використовують цілісні і пустотілі, гладкі і ступінчасті вали. В машинах транспортного і сільськогосподарського машинобудування вали і осі за їх призначенням підрозділяють на кілька категорій: вали для двигунів; проміжні

вали, зокрема, карданні; трансмісійні вали; кулачкові; ексцентрикові та ін. За формою геометричної осі розрізняють вали прямі гладкі і ступінчасті, колінчаті і кривошипні, зустрічаються вали, що виготовляються з труб [1, 3].

Вали сприймають сили з боку передач і, отже, вони відчувають складну деформацію: вигин, крутіння, розтягання - стиск. В процесі роботи таких редукторів можливі поломки, внаслідок дії статичних і втомних (у тому числі обумовлених коливаннями) навантажень, а також деформації неприпустимих значень. У зв'язку з цим важливими критеріями працездатності є міцність, жорсткість і вібростійкість [1].

У валів, що працюють в парі з підшипниками ковзання, важливо забезпечити зносостійкість.

Практикою встановлено, що руйнування валів і осей швидкохідних машин у більшості випадків носить втомний характер, тому основний розрахунок – на опір втоми. Крім того, їх розраховують на жорсткість і вібростійкість. Межа витривалості вала сильно залежить від його конфігурації, від наявності концентрації напруг і від розподілу контактного тиску у разі, де для закріплення деталей на валу застосовані посадки з натягом [1, 3, 7].

Вихідні (тихохідні) вали мають кінцеву ділянку. У середній частині вала між підшипниковими опорами розміщують зубчасте колесо. У сполученні колеса з валом використовується посадка з великим натягом [7]. Розміщення вихідного вала в редукторі типу РМ-400 приведено на рисунку 1.3.

Вал (Додаток А) відчуває досить високі динамічні навантаження, особливо їх можна спостерігати при старті-гальмуванні. Під час зупинки або пуску в валі виникають осьові крутячі сили, які намагатимуться повернути вал з напресованим зубчастим колесом. В результаті чого в серцевині вала і місцях концентрації напруження (місце посадки зубчастого колеса, місцях установки валу) можлива поява мікротріщин, які в подальшому будуть тільки збільшуватися в розмірах, і рано чи пізно це може призвести до руйнування всього валу [1, 3].

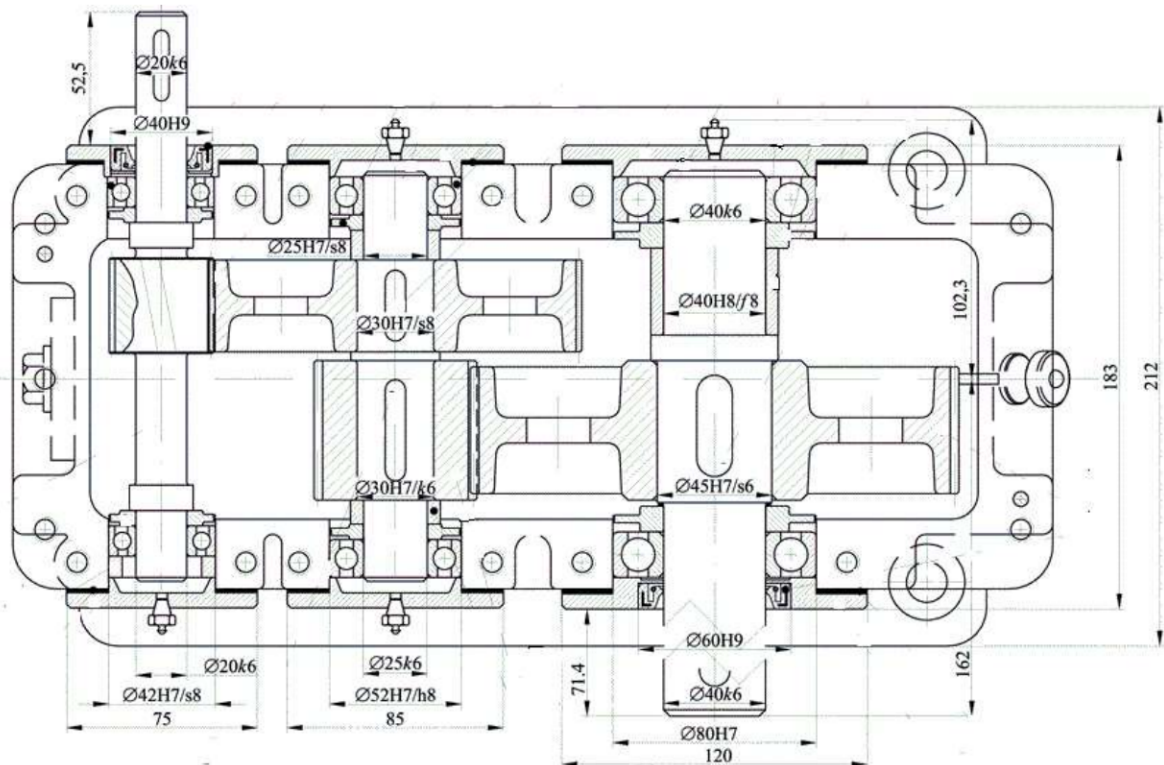


Рисунок 1.3 - Розміщення вихідного вала в редукторі типу РМ-400

Найбільш часто руйнівним місцем таких валів є паз для шпонки, недостатньо укріплений термічно, або кромки пази, що були не заокруглені під дією навантажень, в кутах паза можлива поява і зростання тріщин [1, 3, 7].

Вал, що працює на високих обертах повинен бути точно збалансований, інакше внаслідок неправильного балансування у валі будуть виникати коливальні рухи, що може привести до руйнування шийок вала в яких під дією змінних навантажень можуть з'явитися втомні тріщини, які є причинами розлому матеріалу [1, 3].

Вихід з ладу зубчастого колеса також може привести до несвоєчасного пошкодження поверхні вала, і його неможливості подальшої експлуатації.

Для попередження поломок вала необхідно забезпечувати плавний пуск або зупинку, щоб уникнути динамічних навантажень, що забезпечується дотриманням інструкцій, своєчасного огляду деталей редуктора в цілому.

Матеріали для виготовлення деталей валів повинні відповідати відповідним ГОСТам на застосовувані матеріали при виробництві даних деталей, в іншому випадку матеріал не може бути використаний при виробництві деталі. Матеріал



для виготовлення вала повинен відрізнятись довговічністю, надійністю і витримувати динамічні навантаження. Також треба не забувати, що деякі властивості матеріал може набувати тільки в ході його термічної обробки. Валам подібного типу часто необхідно забезпечити високу твердість поверхні HRC 48 - 50, в деяких випадках до HRC 56, але при цьому все ж треба зберегти пластичну серцевину (HB 250 - 300) для запобігання внутрішніх тріщин, що буде досягнуто точно підібраним способом термічної обробки, коли поверхня вала набуває потрібної твердості, але серцевина залишається не зміцненою за своїми показниками в'язкості і пластичності. Наявність легуючих елементів забезпечить хорошу міцність даної деталі [1, 3, 7].

## **1.2 Можливі причини виникнення дефектів або виходу з ладу виробу в процесі експлуатації**

Основні причинами виходу з ладу валів можуть бути наступні [1]:

- поява пластичних деформацій, як об'ємних, так і поверхневих, що призводять до зміни форми і розмірів деталей. Це спостерігається при перевантаженнях і в'язкому стані матеріалу;
- крихкі руйнування у вигляді поломок по перетину або пошкоджень робочої поверхні. Спостерігаються при перевантаженнях і крихкому стані матеріалу;
- пошкодження втомного характеру у вигляді поломок або руйнування робочої поверхні. Вони спостерігаються при дії основного навантаження, що викликає змінні напруги і обумовлені недостатньою циклічною міцністю (недостатнім опором втоми);
- вали можуть виявитися непрацездатними внаслідок появи недопустимих пружних деформацій при розтягуванні, крученні та при згині, що істотно впливають на працездатний стан передач, підшипників і т.п. в таких випадках говорять про недостатню жорсткість деталі;
- багато деталей машин виходять з ладу внаслідок зносу поверхонь, які труться. Це обумовлено їх недостатньою зносостійкістю;

– експлуатація деяких деталей машин (наприклад, черв'ячного редуктора) стає неможливою через їх неприпустиме нагрівання. У цих випадках говорять про недостатню теплостійкості деталей машин;

– поломки деталей машин можуть бути обумовлені їх коливаннями, що свідчить про недостатню їх вібростійкість.

Під дією навантаження деталі машин або їх елементи можуть відчувати просту об'ємну деформацію наступних видів: розтягнення-стиснення, зрушення і зминання, крутіння, вигин і складну деформацію - розтягнення (стиснення) з крученням і вигином (наприклад, вал) [1].

Місцева деформація деталей машин має місце в тих випадках, коли навантаження деформує обмежений обсяг матеріалу деталі. Розрізняють два види місцевої деформації: перший – зумовлений дією концентраторів, другий – пов'язаний з контактним взаємодією. Місцева деформація, обумовлена дією концентраторів, впливає на об'ємну міцність, при цьому в якості концентраторів можуть бути такі типові конструктивні елементи деталей машин: галтелі – переходи від однієї поверхні до іншої радіусом різної величини; канавки для виходу інструмента; шпонкові пази, отвори, різьблення і т.п. [1].

В процесі експлуатації деталей машин можливі наступні види зношування: механічне (абразивне і втомне), внаслідок пластичної деформації; молекулярно-механічне, викликане поверхнево-активними присадками. В результаті зношування змінюються розміри деталей, збільшуються зазори, знижується точність руху, зменшується ККД, виникають додаткові динамічні навантаження. Великий знос може привести до руйнування деталі. Знос деталі знижується з підвищенням твердості і зниженням шорсткості тертьових поверхонь і, особливо, за умови забезпечення рідинного тертя [1].

Шпонки служать для жорсткого з'єднання обертових або хитних деталей з валами або осями. На рисунку 1.4, а представлено шпонкові з'єднання зубчатого колеса з валом за допомогою, так званої клинної шпонки - сталевий брусочок клиноподібної форми. Існує кілька різновидів шпонок, що розрізняються між собою за конструкцією і принципом дії [1].

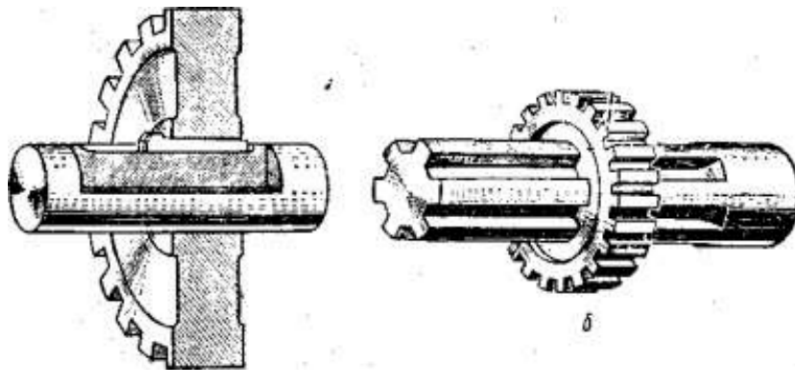


Рисунок 1.4 - Шпонкове (а) і шліцьове (б) з'єднання [1]

Шліцьове з'єднання (рис. 1.4, б) являють собою багатошпоночне з'єднання. Такі з'єднання забезпечують точну центральну посадку деталей на вал, що не завжди буває при з'єднанні шпоночному, і менше послаблюють вал, ніж різні шпонки. Шліцьове з'єднання може бути рухомим, якщо деталі, насаджені на вал, вільно переміщуються вздовж осі вала, і нерухомим, якщо деталі жорстко закріплені на валу [1].

Основними навантаженнями на вали є сили від передач. Сили на вали передають через насаджені на них деталі: зубчасті або черв'ячні колеса, шківни, напівмуфти. При розрахунках приймають, що насаджені на вал деталі передають сили і моменти вала на середині своєї ширини. Під дією постійних за значенням і напрямком сил в обертових валах виникають напруги, що змінюються по симетричному циклу. Тому виконують розрахунки валів на статичну міцність і на опір втоми. Через помилки при розрахунку, порушення технології виготовлення або умов експлуатації можуть виникнути биття вала, коливання і вібрації [1].

Вали можуть виявитися непрацездатними в результаті появи неприпустимих пружних деформацій при розтягуванні, крученні або при згині, що мають істотний вплив на працездатний стан передач, підшипників і т.п. У таких випадках говорять про недостатню жорсткість деталі [1].

Надмірне згинання і крутильні деформації призводять до порушення умов сполучення в з'єднаннях з деталями і відносного положення їх контактуючих елементів. На несучих ділянках в залежності від типу з'єднання можуть виникнути змінання робочих поверхонь шпонкових пазів, зубів, знос зубів,

фрикційна корозія, концентрація тисків, чим створюються передумови для виникнення вогнища втомного руйнування [1].

Поломки валів в більшості випадків носять втомний характер і відбуваються в зоні концентрації напруг. Причинами, що викликають їх, можуть бути: невдалий вибір конструктивної форми деталі і неправильна оцінка впливу концентратора напружень, порушення норм технологічної експлуатації (неправильне регулювання затягування підшипників, зменшення необхідних зазорів) [1].

Зношування - процес руйнування та відділення матеріалу з поверхні твердого тіла і накопичення його залишкової деформації при терті, що виявляється у поступовій зміні розмірів і форми тіла. Знос - результат зношування, визначений у встановлених одиницях [1].

До неприпустимих процесів пошкоджуваності поверхонь тертя, можливість виникнення яких, як показує практика, досить велика, відносяться наступні [1].

Схоплювання I роду (холодний задир) – процес неприпустимої пошкоджуваності поверхонь тертя в результаті виникнення локальних металевих зв'язків, їх деформації і руйнування з відділенням частинок металу або налипанням на поверхні контакту. Схоплювання II роду (гарячий задир) – процес неприпустимої пошкоджуваності поверхонь тертя в результаті виникнення місцевих металевих зв'язків, їх деформації і руйнування, що виражається в утворенні тріщин, намазуванні, перенесенні металу та відділенні частинок з поверхонь тертя. Фретинг-процес – руйнування поверхонь тертя деталей машин, що виникає при терті ковзанні з дуже малими зворотно-поступальними переміщеннями і при динамічному додаванні навантаження [1].

Абразивне зношування і пошкоджуваність – процеси руйнування поверхні деталей машин, обумовлене наявністю абразивного середовища в зоні тертя. Абразивне зношування може виникати в самому широкому діапазоні зовнішніх механічних впливів [1].

Контактна втома (пітінг). Втомні пошкодження виникають в деталях машин при терті кочення (підшипники кочення та зубчасті зачеплення) і є

результатом інтенсивного руйнування по  $\tau$  поверхневих шарів металу, що знаходяться в особливих умовах напруженого стану. Руйнування поверхонь при втомних пошкодженнях характеризується виникненням мікротріщин одиничних і групових западин [1].

Конструктивні засоби підвищення витривалості показані на рисунку 1.5. Найбільш ефективно потовщення вала на довжині ступиці. Досить ефективно також поверхнєве зміцнення [1].

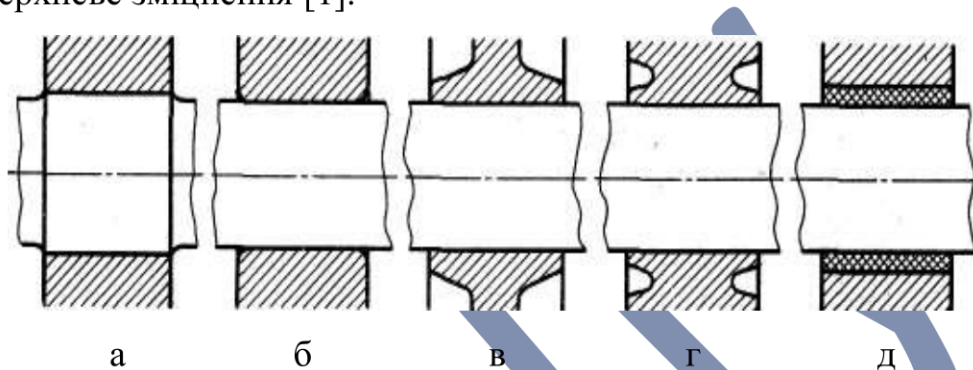


Рисунок 1.5 - Конструктивні засоби підвищення опору валів втоми в місцях посадок (а - потовщення підступічної частини; б - закруглення кромки ступиці; в - зтоншення ступиці; г - розвантажувальні канавки; д - втулки або заливки в ступиці з матеріалу з низьким модулем пружності) [1]

Вали необхідно конструювати з мінімальним числом уступів, буртиків. У місцях зниженої усталеної протітності канавок для виходу інструментів заміняють гальматорами. Шпоночний паз, отриманий дисковий фрезой, створює меншу концентрацію напруги, чим паз, оброблений концевий фрезой. Шліци знижують протидію втоми валів у менших ступенях, ніж шпоночні пази.

### 1.3 Вимоги до матеріалу для виготовлення валу редуктора

Для забезпечення високих показників надійності, довговічності і працездатності вали виготовляють з матеріалів, які володіють підвищеною міцністю і пластичністю. Тому треба приділити особливу увагу вибору марки сталі для виготовлення деталі, так як неправильно обрана марка сталі може

привести до ряду проблем: не здатності витримувати великі динамічні навантаження; до інтенсивного зносу; невідповідності температурного режиму роботи; здорожчання виробу в цілому. Як відомо високої міцності і зносостійкості сталь набуває в процесі гартування [7, 8].

Основними матеріалами для валів служать вуглецеві і леговані сталі (табл. 1.2) завдяки високим механічним характеристикам, здатністю до зміцнення і легкості одержання циліндричних заготовок прокаткою. Переважно використовують середньовуглецеві поліпшувані сталі. Досягнення оптимального поєднання властивостей здійснюється гартуванням з високим відпустом при відповідному легуванні. Для більшості валів застосовують термічно оброблювані середньовуглецеві і леговані сталі 40, 45, 40X, 40XH і інші [7, 8].

Таблиця 1.2 – Механічні характеристики основних матеріалів валів

Марка сталі	Діаметр Заготовки, мм	Твердість, (не менше)	Механічні характеристики, МПа		
			$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\sigma_{-1}$
Ст5	Будь який	190	520	280	220
45	$\leq 120$	240	780	540	360
	$\leq 80$	270	900	650	410
40X	$\leq 200$	240	790	640	370
	$\leq 120$	270	900	750	410
40XH	$\leq 200$	270	920	750	420
20X	$\leq 120$	197	650	400	310
12XH3A	$\leq 120$	260	950	700	430
18XГТ	$\leq 60$	330	1150	950	500

Вибір матеріалу для виготовлення валів редуктора необхідно проводити виходячи з умов експлуатації та технічних вимог.

Для високонапружених валів відповідальних машин застосовують леговані сталі: 40XH, 40XH2MA, 30XГТ, 30XГСА та ін. Вали з цих сталей зазвичай

піддають поліпшенню, гартування з високим відпуском або поверхневого гартування з нагрівом СВЧ і низьким відпусткою (шліцьові вали) або обробці висококонцентрованим джерелом енергії (ВДЕ) [7, 8]. Для поліпшення прокалюваності сталі застосовують легування хромом, марганцем і бором (сталі 40X; 40XГР; 40XГ); нікель сприяє отриманню низьких значень температури холодноламкості (сталь 40ХН; 40XГНР); молібден і вольфрам зменшують схильність до поверненої відпускнуї крихкості (сталь 40ХНМА; 34ХНЗМ; 38ХНЗВА). За умови експлуатації матеріалу конструкції в агресивному середовищі використовують нержавіючі сталі (20X13; 40X13М; Х18Н10Т) або застосовують дифузійну металізацію (хромування, нікелювання, титанування). Швидкісні вали, що обертаються в підшипниках ковзання, вимагають дуже високої твердості цапф; їх виготовляють з цементованих сталей 20X, 12ХНЗА, 18XГТ або азотуємих сталей типу 38X2МЮА. Високу зносостійкість мають хромовані вали. З досвіду автомобілебудування хромування шийок колінчастих валів збільшує ресурс до перешліфовки в 3-5 разів. Також для виготовлення валів застосовують жароміцні і нержавіючі сталі і сплави, титанові сплави, пластмаси та інші матеріали. Застосування зварних валів потужних гідротурбін призводить до економії до 40% металу [7].

До матеріалів, що використовуються при виробництві вала, необхідно пред'явити наступні вимоги: висока міцність і в'язкість сталі; вміст вуглецю не більше 0,5 %.

Найкраще у такій ситуації проявить себе поліпшувана сталь. Це група сталей із вмістом деяких легуючих елементів (Cr, Ni, Mo, V), і вуглецю близько 0,3-0,5 %. Так як ця група призначена для деталей даного типу, вона буде відповідати всім вимогам. Тому в таких умовах одне з найважливіших значень при виборі сталі набуває прокалюваність. Однак зближення міцністних властивостей шару і серцевини призводить до зниження межі витривалості деталей [7].

## Висновки

Конструктивно, редуктор – це пристрій, що складається з корпусу, всередині якого розміщені елементи передачі - вали, шестерні та зубчасті колеса, підшипники і т.д.

Однією з основних складових будь-якого редуктора є вал. Вали застосовуються для передачі руху обертання без зміни кутової швидкості і притому вздовж осі вала або під невеликим кутом до цієї осі (до 20 °). Вали сприймають сили з боку передачі і, отже, вони відчувають складну деформацію: вигин, крутіння, розтягання - стиск. У зв'язку з цим важливими критеріями працездатності є міцність, жорсткість і вібростійкість.

У валів, що працюють в парі з підшипниками ковзання, важливо забезпечити зносостійкість.

Для виготовлення валів та забезпечення високих показників надійності, довговічності і працездатності виготовляють з матеріалів, які володіють підвищеною міцністю і пластичністю. Як відомо високу міцність і зносостійкість сталь набуває в процесі загартування.

Основними матеріалами для валів служать вуглецеві і леговані сталі завдяки високим механічним характеристикам, здатністю до зміцнення і легкості одержання циліндричних заготовок прокаткою. Переважно використовують середньовуглецеві поліпшувані сталі. Це група сталей із вмістом деяких легуючих елементів (Cr, Ni, Mo, V), і вуглецю близько 0,3-0,5 %. Досягнення оптимального поєднання властивостей здійснюється гартуванням з високим відпустом при відповідному легуванні.

До матеріалів, що використовуються при виробництві вала, необхідно пред'явити наступні вимоги: висока міцність і в'язкість сталі; вміст вуглецю не більше 0,5 %.



## РОЗДІЛ 2

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 2.1 Огляд технологій поверхневого зміцнення валів

В процесі виконання випускної кваліфікаційної роботи бакалавра, був ретельно проведений огляд літератури, статей і патентів.

Винахід [9] відноситься до машинобудування, зокрема, до зубчастих редукторів з примусовою системою змащення. Мета винаходу – підвищення довговічності та надійності за рахунок поліпшення мастила підшипників і шліців валів, на яких встановлені зубчасті колеса [9].

В роботі [10] при дослідженні похилої ділянки кривої втоми для оцінки довговічності валу зі сталі 40X з поверхневим зміцненням - гартування СВЧ, було відмічено підвищення межі витривалості з  $\sigma_F \text{ lim} = 420 \text{ МПа}$  до  $\sigma_F \text{ lim} = 600 \text{ МПа}$ .

Винахід [11] відноситься до області індукційного нагріву і може бути використане для термообробки циліндричних деталей. Мета винаходу: підвищення поверхневої твердості і зносостійкості виробу.

Формула винаходу: Автомат для гартування валів, що містить механізм завантаження, механізми установки і базування з базуючим елементом, переміщення, поштучної подачі заготовок в зону обробки з візком, індуктор-спрейер, механізми охолодження заготовок, поштучної подачі заготовок в зону вивантаження і вивантаження заготовок, що відрізняється тим, що механізм установки і базування виконаний у вигляді силового приводу, на штоку якого жорстко закріплений призматичний базуючий елемент, а на його штоку закріплений двоплечий важіль. Спосіб дозволяє інтенсифікувати процес і збільшити експлуатаційну стійкість валів [11].

Винахід [12] відноситься до обробки металу і може бути використаний при відновленні і ремонті техніки в сільськогосподарському виробництві, що проводиться централізовано. Актуальність проблеми полягає в тому, що в процесі роботи дотичні і взаємно переміщувані елементи деталей машин піддаються зносу.

Мета винаходу підвищення якості обробки за рахунок виключення проникнення в наплавляється шар газів, а також зниження витрат, що йдуть на відновлення зношених деталей [12].

При аналізі [13] відомих методів поверхневого зміцнення можна бачити, що вони мають спільні ознаки, які полягають у зміні хімічного складу, структури і властивостей поверхневого шару. Щоб відповісти на питання - чи задовольняють такі поверхневі шари основним вимогам, до них пред'являються, необхідно класифікувати всі ці методи і дати їм характеристику.

Винахід [14] відноситься до галузі отримання нанокристалічних матеріалів, зокрема до отримання нанокристалічних поверхневих шарів на виробах з металевих матеріалів, і може бути використане для обробки валів, лопаток газових і парових турбін для поліпшення їх фізико-механічних, корозійних та інших практично важливих експлуатаційних властивостей.

Суть винаходу за пропонованим способом полягає в тому, що в поверхневому шарі матеріалу виробу одним з відомих способів формують рівномірний аморфний поверхневий шар. Формування аморфного шару дозволяє, з одного боку зменшити вплив вихідної структури матеріалу виробу на знову сформовану нанокристалічну структуру поверхневого шару, а з іншого боку - створює передумови до утворення нанокристалів в процесі подальшої кристалізації [14].

У роботах [13, 15, 16] для обробки поверхні автори виділили три наступні класи обробки:

- обробка без зміни хімічного складу поверхні і без структурних перетворень в поверхневому шарі;
- обробка зі зміною хімічного складу поверхневого шару, без фазових перетворень в ньому;
- обробка, що викликає одночасно зміна хімічного складу поверхневого шару, його фазового складу і мікроструктури.

В останні роки з метою розширення функціональних можливостей методів поверхневого зміцнення, що належать до першого класу, використовують

комплексну обробку, що складається з поєднання різних видів зміцнюючої обробки. Так, дробоструминна обробка в деяких випадках застосовується в поєднанні з хіміко-термічною обробкою або поверхневим гартуванням з нагрівом СВЧ [13, 15, 16].

## **2.2 Застосування поверхневого гартування для зміцнення виробів**

Сутність поверхневого гартування [17] полягає в тому, що верхні шари деталі швидко нагріваються вище температури критичних точок і створюється різкий перепад температури по перетину від поверхні до серцевини. Якщо нагрів перервати і деталь швидко охолодити, то гартування отримає тільки її поверхня, а серцевина залишиться незагартованою. Гартування з індукційним нагріванням струмом високої частоти це операція, при якій деталь для нагріву розміщують в індуктор (соленоїд), що представляє собою один або кілька витків мідної трубки, охолоджуваної проточною водою. Змінний струм високої частоти, протікаючи по індуктору, створює змінне магнітне поле. Пристрій для гартування з нагріванням за допомогою СВЧ складається з генератора струму високої частоти, конденсаторної батареї, індуктора, пристосування для охолодження (спрейера). Контроль за температурою нагріву здійснюється автоматично. Основні параметри процесу: температура, швидкість, глибина нагріву. Гартування з індукційним нагріванням широко застосовується у всіх галузях промисловості для зміцнення колінчастих і шліцьових валів, розподільних валів, зубів великих шестерень, гальмівних шківів, шпинделів, борштанг та інших деталей. Цей спосіб поверхневого зміцнення застосовується, головним чином, для деталей з вуглецевих і легованих сталей з середнім вмістом 0,4-0,5 % вуглецю (сталь 40, 45, 50, 40X, 40XH, 35X та інших) і рідше високовуглецевих (інструмент) [17].

Охолодження при гартуванні з індукційного нагріву проводиться у воді струменевим способом або зануренням. Режим поєднання поверхневого гартування СВЧ з низьким відпуском за рахунок збереженого тепла називають загартуванням СВЧ з самовідпуском. Зміцнити поверхню - значить підвищити властивості поверхні: твердість, зносостійкість, корозійну стійкість. Якщо треба

змінити властивості, то це означає, що повинна змінитися структура поверхневого шару [17, 18].

Поверхнєве гартування має низку істотних переваг в порівнянні з об'ємним гартуванням. Так відсутність необхідності прогріву всього обсягу матеріалу деталі до високих температур дозволяє економити енергію і час, при цьому серцевина деталі залишається в'язкою і добре сприймає ударні та інші навантаження. Індукційний нагрів СВЧ заснований на наступному явищі. При проходженні змінного електричного струму високої частоти по індуктора, який представляє собою, як правило, мідний соленоїд або одиночний виток, навколо індуктора утворюється змінне електромагнітне поле, яке пронизує деталь, вміщену в індуктор (рис. 2.1). Таким чином, головною відмінністю індукційного нагріву від нагрівання зовнішніми джерелами тепла (в печах і інших нагрівальних пристроях) є виділення теплоти безпосередньо в самому металі [19].

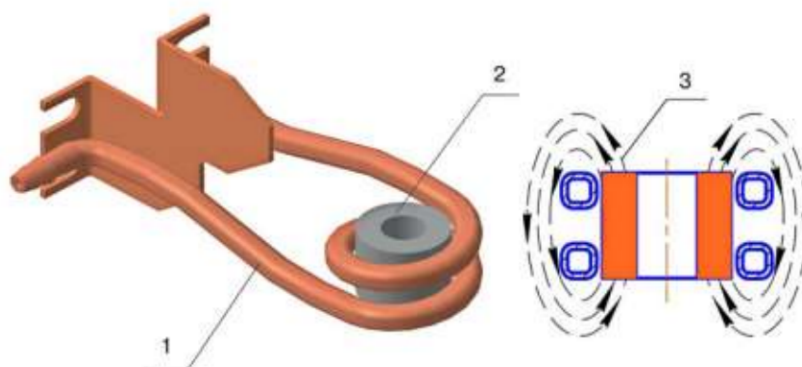


Рисунок 2.1 - Схема індукційної системи нагріву деталі: 1 - індуктор; 2 - нагрівається заготовка; 3 - струми Фуко [19]

Авторами роботи [20] було описано індукційні установки для гартування великомодульних зубчастих коліс, розглянуто тиристорні перетворювачі частоти типу «Петра-0120», їх будову, конструктивні особливості виконання, основні технічні характеристики, а також технічні характеристики теплообмінних станції «Петра-0395» для охолодження перетворювачів і також наведені приклади для поверхневого гартування великомодульних зубчастих коліс.

## Висновки

У процесі виконання кваліфікаційної роботи бакалавра, було проведено ретельний літературний огляд статей, навчальних матеріалів та патентів.

Поверхнєве гартування має низку істотних переваг в порівнянні з об'ємним гартуванням. Так відсутність необхідності прогріву всього обсягу матеріалу деталі до високих температур дозволяє економити енергію і час, при цьому серцевина деталі залишається в'язкою і добре сприймає ударні та інші навантаження.

Високі швидкості нагріву можуть забезпечити деякі прогресивні способи, найбільш широко поширеним з яких є індукційний нагрів струмами високої частоти (СВЧ).

Сутність поверхневого гартування полягає в тому, що верхні шари деталі швидко нагріваються вище температури критичних точок і створюється різкий перепад температури по перетину від поверхні до серцевини. Якщо нагрів перервати і деталь швидко охолодити, то гартування отримає тільки її поверхня, а серцевина залишиться незагартованою. Гартування з індукційним нагріванням струмом високої частоти це операція, при якій деталь для нагріву розміщують в індуктор (соленоїд), що представляє собою один або кілька витків мідної трубки, охолоджуваної проточною водою. Змінний струм високої частоти, протікаючи по індуктору, створює змінне магнітне поле.

Проведений огляд патентів і статей дає можливість розробити процес підвищення експлуатаційних властивостей вала редуктора.

## РОЗДІЛ 3

### ВИБІР МАТЕРІАЛУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1 Вибір оптимального матеріалу для деталі «вал двоступеневого горизонтального редуктора»

Для виготовлення деталей редукторів економічно доцільно використовувати найбільш якісні конструкційні матеріали та передові технологічні методи їх зміцнюючої термічної обробки.

Матеріали для виготовлення деталей валів повинні відповідати відповідним стандартам на такі матеріали при виробництві даних деталей, в іншому випадку матеріал не може бути використаний при виробництві валу. Матеріал для виготовлення валу повинен відрізнятися довговічністю, надійністю і витримувати динамічні навантаження. Необхідно також не забувати, що деякі властивості матеріал може набувати тільки в ході його термічної обробки.

Валам часто необхідно забезпечити високу твердість поверхні HRC 48 - 50, в деяких випадках до HRC 56, але при цьому також треба зберегти пластичність серцевини (HB 250 - 300) для запобігання внутрішніх тріщин. Такого можна досягти точно підібраним способом термічної обробки, коли вал набуває потрібної твердості на поверхні виробу, але серцевина залишається не високої твердості із необхідними показниками в'язкості і пластичності.

Вибір матеріалу і термічної обробки валів визначається критеріями їх працездатності.

За базовим варіантом вал виготовляється зі сталі 40ХН. Сталь 40ХН – це конструкційна, середньовуглецева низьколегована якісна сталь. Містить до 0,40% вуглецю, 1,0% хрому і 1,0% нікелю, а також кремній, мідь, фосфор і сірку, які впливають на властивості сталі (табл. 3.1). Основними легуючими елементами сталі є хром і нікель. Обидва елементи розчиняються в фериті і зміцнюють його [21, 22.]. Хром підвищує точку  $A_3$  і знижують точку  $A_4$  (замикає область  $\gamma$ -заліза) (табл. 3.2).

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі 40ХН, % [21, 22.]

Марка сталі	С	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	P	S	Cu
							Не більше		
40ХН	0,36- 0,44	0,17- 0,37	0,50- 0,80	0,45- 0,75	1,0-1,4	-	0,035	0,035	0,30

Температура евтектоїдних перетворення сталі (точка  $A_1$ ) в присутності хрому підвищується, а вміст вуглецю в евтектоїд (перліті) знижується. З вуглецем хром утворює карбіди ( $Cr_7C_3$ ,  $Cr_4C$ ) більш міцні і стійкі, ніж цементит. Розчиняючись в фериті, хром підвищує його твердість і міцність, незначно знижуючи в'язкість. Хром значно збільшує стійкість переохолодженого аустеніту [21, 22.].

Таблиця 3.2 - Температури критичних точок сталі 40ХН, °С [21, 22.]

Марка сталі	$A_{c1}$	$A_{c3}$	$A_{r3}$	$A_{r1}$
40ХН	735	768	700	660

Розчинність нікелю в  $\alpha$ -залізі збільшується з пониженням температури; при 700 °С - 5% нікелю, при 400 °С - 10% нікелю. Обмежена область  $\alpha$  твердого розчину. Нікель підвищує твердість і міцність фериту (табл. 3.3). Висока в'язкість, мала міцність і твердість нікелевого аустеніту. Підвищує критичну точку  $A_4$ , знижує  $A_1$  та  $A_3$  [21, 22.].

Таблиця 3.3 – Механічні властивості сталі 40ХН [21, 22.]

Марка сталі	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НВ (HRC)
40ХН	590	735	13	40	49	Осердя 235-277, поверхні (59-63 при обробці СВЧ)

Сталь 40ХН підвищено флокеночутлива. Флокеночутливість - це здатність сталі утворювати флокени (дефект виливки, що представляють собою в зламі - плями (пластівці), а в поперечному мікрошліфі - тріщини). Природно, що наявність тріщин призводить до зниження механічних властивостей. Чим більш високу міцність має сталь, тим більш небезпечні тріщини-флокени. Причина утворення флокенів - розчинений у сталі водень, який не встигає виділитися при температурах нижче 200 °С, що і відбувається в сталі 40ХН. Також сталь 40ХН схильна до відпускнуї крихкості II-го роду. Окрихчування сталі за деяких умов відпуску називається відпускнуї крихкістю. Зниження в'язкості при цьому викликано підвищенням температури переходу в холодноламкий стан [8].

Відпускна крихкість II-го роду виявляється після відпуску 500 °С. Характерна особливість крихкості цього виду полягає в тому, що вона проявляється в результаті повільного охолодження після відпуску: при швидкому охолодженні в'язкість не зменшується, а поступово зростає з підвищенням температури відпуску. Проте відпускна крихкість II-го роду може бути викликана знову новим високим відпуском з наступним уповільненим охолодженням. Тому відпускну крихкість II-го роду іноді називають поверненою відпускнуї крихкістю [8].

Найбільш дефіцитними є сталі, що містять Ni (наприклад, 40ХН). Виходячи з вище наведених даних і характеристик було визначено наступне. Для виготовлення валу редуктора обрана сталь 40Х (замість використовуваної на підприємстві сталі 40ХН), яка не має в своєму складі нікелю, і є більш дешевої за собівартістю та повністю відповідає вимогам і технологічним параметрам.

Сталь 40Х – сталь, конструкційна, низьколегована, якісна, термopolіпшувана, легована хромом (містить близько 1% хрому). Наявність легуючих елементів в конструкційних сталях і сталі 40Х (табл. 3.4) дозволяє більшою мірою регулювати структуру і властивості термічної обробки. Це пояснюється тим, що легуючі елементи затримують дифузійні процеси і мають вплив на фазові перетворення, що протікають як при нагріванні, так і при охолодженні з різною швидкістю [8].



Таблиця 3.4 - Хімічний склад сталі 40X, % [21, 22.]

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	P	S	Cu
							Не більше		
40X	0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,8-1,1	≤0,3	-	0,035	0,035	0,30

При нагріванні сталей наявність легуючих елементів зміщує температурні межі протікання процесів. Так, присутність нікелю зрушує критичні температури фазових перетворень в бік їх зменшення по відношенню їх положення на діаграмі залізо-цементит, а елементи хром, молібден і кремній підвищують температури  $A_1$  та  $A_3$  (табл. 3.5 – 3.6). Крім того легуючі елементи знижують концентрацію вуглецю в евтектоїд, зміщуючи цим точку S (0,8% вуглецю) вліво [8].

Таблиця 3.5 – Температури критичних точок сталі 40X, °C [21, 22.]

Марка сталі	$A_{c1}$	$A_{c3}$	$A_{r3}$	$A_{r1}$
40X	743	815	730	693

Таблиця 3.6 - Механічні властивості сталі 40X [21, 22.]

Марка сталі	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НВ (HRC)
40X	780	980	10	45	59	Осердя 235-265, поверхні (49-59 при обробці СВЧ)

Застосовується сталь 40X для виготовлення середньо навантажених машинобудівних деталей невеликих перетинів (осі, вали, вал-шестерні, плунжери, штоки, колінчаті і кулачкові вали, кільця, шпинделі, оправки, рейки, зубчасті вінці, болти, півосі, втулки та інші покращувані деталі підвищеної міцності і т.п.). Замінник сталі 40X - сталі 45X, 38XA, 40XH, 40XS, 40XF, 40XP. Сталь 40X (як і сталь 40XH) підвищено флокеночутлива і схильна до відпускнуї крихкості [8].

### 3.2 Вплив легуючих елементів на властивості вибраної сталі

Вуглець основний елемент, який обов'язково повинен бути присутнім в кожній сталі. У нашій обраній марці сталі 40Х, вміст вуглецю до 0,4 % .

Вплив вуглецю. Структура сталі після повільного охолодження складається з двох фаз – фериту і цементиту. Тверді і крихкі частки цементиту підвищують опір руху дислокацій, тобто підвищують опір деформації, і, крім того, вони зменшують пластичність і в'язкість. Внаслідок цього зі збільшенням в сталі вуглецю зростають твердість, межі міцності і текучості і зменшуються відносно подовження, відносно звуження і ударна в'язкість. Вуглець підвищує поріг холодноламкості сталей і зменшує ударну в'язкість при температурах вище критичної температури (рис. 3.1) [8].

Зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі збільшуються її твердість, міцність, зменшуються в'язкість і пластичність (рис. 3.2) [8].

Збільшення міцності відбувається лише до тих пір, поки вміст вуглецю не досягне 0,8 - 1%. Добре обробляються різанням середньовуглецевої сталі (вміст вуглецю 0,3 - 0,4%) [8].

Властивості всіх легованих сталей, залежать від кількості введених легуючих елементів в сталь, а також термічної обробки і структури сталі. Основними легуючими елементами в сталях є: хром і нікель, а також марганець (присутній в кількості менше 0,5 %) [8].

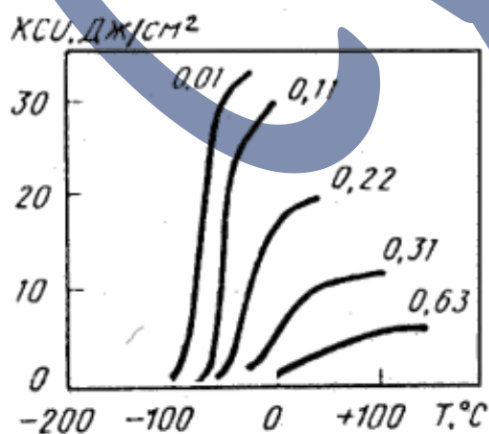


Рисунок 3.1 - Вплив вмісту вуглецю, % (цифри на кривих) на холодноламкість сталі [8]

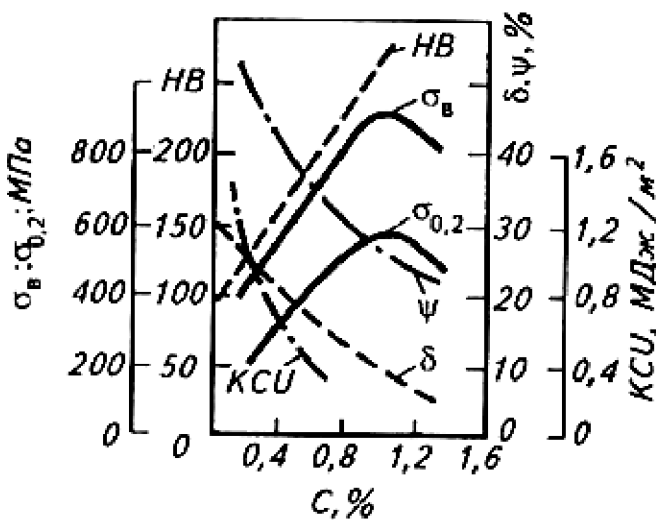


Рисунок 3.2 - Залежність механічних властивостей сталі від вмісту вуглецю [8]

Хром підвищує жаростійкість і корозійну стійкість сталі, збільшує її електричний опір і зменшує коефіцієнт лінійного розширення. Легування сталі хромом призводить до зменшення схильності аустенітного зерна до зростання при нагріванні, істотного збільшення її прокалюваності, а також до уповільнення процесу розпаду мартенситу.

Найбільш сильно зміцнює ферит: кремній, марганець і нікель, інші елементи порівняно мало змінюють міцність фериту в сталях. Зміцнюючи ферит і мало впливають на пластичність, більшість легуючих елементів знижують його ударну в'язкість. Виняток становить нікель, який не знижує ударної в'язкості. Марганець і хром при кількості до 1% підвищують ударну в'язкість, при більшій концентрації вона знижується. Помітно знижує поріг холодноламкості нікель, інші елементи, що застосовуються для легування сталі, підвищують поріг холодноламкості. У сталі 40X присутні нікель і хром. Хром - порівняно дешевий елемент і широко використовується для легування сталі. Він розчиняється в фериті і цементиті, впливає на механічні властивості. Хром підвищує прокалюваність, твердість, межу міцності, корозійну стійкість; незначно зменшує характеристики пластичності сталі [8].

Нікель – дорогий метал, його вводять спільно з хромом і іншими елементами, при цьому в гранично мінімальній кількості, як в обраній нами сталі 40X. Нікель забезпечує високу межу міцності, підвищує опір удару і впливає на зміну коефіцієнта теплового розширення.

Карбідоутворюючими елементами є хром і марганець. При розчиненні карбідоутворюючих елементів в цементиті утворюються карбіди, що називаються легованим цементитом. При підвищенні вмісту карбідоутворюючого елемента утворюються самостійні карбіди даного елемента з вуглецем, так звані прості карбіди, наприклад,  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_4C$ . Всі карбіди дуже тверді (HRC 70 - 75) і плавляться при високій температурі [8].

Корисні домішки – кремній і марганець – кількість їх у сталі 40X до 0,37 і 0,80 % відповідно, і вони завжди присутні в сталі, розчиняються в фериті, зміцнюючи його. Марганець збільшує прокалюваність сталі, зменшує вплив сірки. Кремній і марганець застосовують для розкислення сталі. Кремній і марганець переходять в сталь в процесі її розкислення при виплавці. Вони розкисляють сталь, тобто з'єднуючись з киснем до закису заліза  $FeO$ , у вигляді оксидів переходять в шлак. Ці процеси розкислення покращують властивості сталі. Кремній, дегазуючи метал, підвищує щільність злитка. Кремній, що залишається після розкислення в твердому розчині (в фериті), сильно підвищує межу плинності. Це знижує здатність сталі до витяжки, і особливо холодної висадки. Марганець помітно підвищує міцність, практично не знижуючи пластичності і різко зменшуючи червоноламкість сталі, тобто крихкість при високих температурах, викликану впливом сірки [8].

Постійні домішки, від яких залежить якість сталі, - сірка і фосфор. Джерелом цих хімічних елементів в сталі є, перш за все, чавун, з якого виробляють сталь у металургійних печах. Сірка і фосфор - шкідливі домішки [8].

Сірка є шкідливою домішкою в сталі. З залізом вона утворює хімічну сполуку  $FeS$ , яке практично нерозчинна у ньому в твердому стані, але розчинно в рідкому металі. Присутність в сталі марганцю, що володіє більшою спорідненістю до сірки, ніж залізо, і утворює із сіркою тугоплавке з'єднання  $MnS$ , практично виключає явище червоноламкості. Вміст сірки в сталі суворо обмежується, він не повинен перевищувати 0,035-0,06 %. Сірка знижує пластичність, в'язкість, надає сталі червоноламкості при прокатці і куванні. Сірка погіршує зварюваність і корозійну стійкість [8].

Фосфор є шкідливою домішкою, і вміст його в залежності від якості сталі допускається не більше 0,025-0,035 %. Розчиняючись в фериті, фосфор сильно спотворює кристалічну решітку і збільшує межі міцності і текучості, але зменшує пластичність і в'язкість. Здатність фосфору до сегрегації по межах зерен також сприяє окрихчуванню сталі. Кожна 0,01 % P підвищує поріг холодноламкості сталі на 20 - 25 °С (для вуглецю такий ж вплив робить кожна 0,1%). Фосфор має велику схильність до ліквідації (неоднорідність розподілу). Фосфор накопичується в серединних шарах злитка, по межах зерен, сильно знижуючи ударну в'язкість [8].

Вибираючи матеріал для вала, особливо при масовому виробництві, необхідно вибирати не тільки сталь, яка б забезпечила високі вимоги, що пред'являються до механічних властивостей на поверхні і в осерді, але необхідно оцінювати вартість і самого матеріалу, виготовлення деталі, термічну обробку, а також дефіцитність цього матеріалу [7, 8].

### 3.3 Вибір методів і методик дослідження

При проведенні мікроскопічного аналізу використовувався металографічний мікроскоп МИМ – 7 (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 - Зовнішній вигляд мікроскопа МИМ – 7 [23]

Металографічний мікроскоп МИМ - 7 призначений для спостереження і фотографування мікроструктури металів в звичайному світлі в світлому і темному полі та в поляризованому світлі в світлому полі. Набір об'єктивів і окулярів

металографічного мікроскопа МІМ - 7 забезпечує збільшення від 60х до 1440х при візуальному спостереженні і від 70х до 1350х при фотографуванні. Як джерело світла використана кінопроекційна лампа К-30 17 В, 170 Вт [23].

У роботі для вимірювання твердості застосовувався твердомір ТР – 5006 (рис. 3.4).

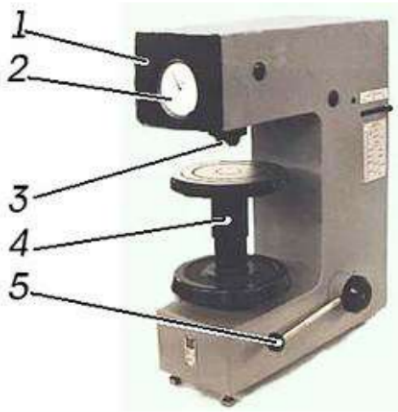


Рисунок 3.4 - Зовнішній вигляд твердоміра ТР – 5006: 1 - станина; 2 - індикатор; 3 - алмазний наконечник-конус (індентор); 4 - стіл; 5 - ручка важеля навантаження [24, 25]

Твердомір ТР- 5006 призначений для вимірювання твердості металів і сплавів за методом Роквелла у відповідності з ГОСТ 9013-59, пластмас по ГОСТ 24622-81, графітів і металографітів, фанери, пресованої деревини та інших матеріалів, виготовлених для потреб народного господарства [24, 25].

Вимірювання проводять таким чином. На стіл 4 укладають деталь так, щоб вона не мала можливості гойдатися і за допомогою підйомного гвинта обережно підводять алмазний наконечник (індентор) 3 до поверхні деталі. Обертаючи ходовий гвинт столу, обережно здійснюють попереднє навантаження силою  $P_0$ , контрольованої по стрілочному індикатору. Мала стрілка індикатора встановлюється на нуль. Обертаючи ободок шкали індикатора, встановлюють на позначку 0 зовнішню шкалу індикатора (червоного кольору). Потім обережно відпускають ручку 5, пов'язану з вантажем  $P_1$ , розташовану з правого боку приладу. Звільнивши ручку відпускають її і протягом 10-15 сек. чекають зупинки стрілки індикатора. Після цього ручку повертають у вихідне положення, а за шкалою RC визначають отримане значення твердості. Опускають стіл приладу, зрушують деталь на 8-10 мм і повторюють вимірювання. Так роблять 5-6 разів [24, 25].

## Висновки

Для виготовлення деталей редукторів економічно доцільно використовувати найбільш якісні конструкційні матеріали та передові технологічні методи їх зміцнюючої термічної обробки.

Матеріал для виготовлення валу повинен відрізнятися довговічністю, надійністю і витримувати динамічні навантаження. Вибираючи матеріал для вала, особливо при масовому виробництві, необхідно вибирати не тільки сталь, яка б забезпечила високі вимоги, що пред'являються до механічних властивостей на поверхні і в осерді, але необхідно оцінювати вартість і самого матеріалу, виготовлення деталі, термічну обробку, а також дефіцитність цього матеріалу.

Найбільш дефіцитними є сталі, що містять Ni. Значить дешевим матеріалом і економічно легованих є сталь 40X. Тому для виготовлення валу редуктора обрана сталь 40X (замість використовуваної на підприємстві сталі 40XН), яка має в своєму складі мінімальну кількість нікелю, і є більш дешевою за собівартістю та повністю відповідає вимогам і технологічним параметрам.

Сталь 40X - сталь, конструкційна, низьколегована, якісна, поліпшувана, легована хромом (містить близько 1% хрому). Наявність легуючих елементів в конструкційних сталях і сталі 40X дозволяє більшою мірою регулювати структуру і властивості термічної обробки. Це пояснюється тим, що легуючі елементи затримують дифузійні процеси і мають вплив на фазові перетворення, що протікають як при нагріванні, так і при охолодженні з різною швидкістю.

Для дослідження властивостей і характеристик матеріалу для виготовлення валу редуктора сталі 40X застосовуємо наступні методи і методики: для дослідження мікроструктури (мікроаналізу) – мікроскоп МИМ-7; для контролю твердості після термічної обробки передбачено твердомір ТК-2, вимірювання після нормалізації здійснюється із застосуванням шкали HRB, а після проведення термополіпшення і зміцнення поверхні струмами високої частоти – за шкалою HRC.

## РОЗДІЛ 4

### МАРШРУТНА ТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ДЕТАЛІ «ВАЛ РЕДУКТОРА»

#### 4.1 Вибір методу отримання заготовки

Продуктивність механічної обробки валів багато в чому залежить від виду матеріалу, розмірів та конфігурації заготовки, а також від характеру виробництва. Заготовки отримують відрізанням від гарячекатаних або холоднотягнутих нормальних прутків і відразу піддають механічній обробці. Заготовки такого виду застосовують в основному в дрібносерійному та одиничному виробництві, а також при виготовленні валів з невеликим числом ступенів і незначною різницею їх діаметрів. У виробництві з чималим масштабом випуску (серійному або великомасштабному), а також при виготовленні валів більш складної конфігурації з рівнями, які значно розрізняються за діаметром, заготовки доцільно отримувати методами пластичної деформації. Ці методи – поковка, штамповка, періодичний прокат, обжимання на ротаційно-кувальних машинах, електровисадка, дозволяють отримувати заготовки формою і розмірами найбільш близькими до готової деталі, що значно підвищує продуктивність механічної обробки. В якості заготовок для сталевих валів діаметром до 100 мм зазвичай використовують круглий прокат, для валів більшого діаметру та фасонних валів – поковки [26, 27].

Вали піддають токарній обробці і подальшому шліфуванню посадкових поверхонь. В даний час для підвищення несучої здатності валів застосовують поверхневе пластичне деформування (ППД) або поверхневу термомеханічну обробку.

Мета механічної обробки – забезпечити, відповідно до технічних вимог, точність розмірів, форми і мікрогеометрію поверхні. Для отримання необхідної деталі вибрали заготовку "прокат" (сортамент гарячекатаний), сталь 40Х. Заготовка отримана шляхом прокату на прокатному стані і має в перерізі форму кола. Необхідна нам деталь так само має форму кола в перерізі, а відповідно більш зручна для обробки з економічної і технологічної точки зору.



#### 4.2 Розробка технологічного процесу отримання деталі «вал редуктора»

Розробка маршруту виготовлення деталі складається з наступних операцій в такій послідовності як наведено на рисунку 4.1, а маршрутна технологія механічної обробки вала редуктора на малюнку 4.2.

Обґрунтування послідовності обробки поверхонь заготовки ведуть з урахуванням конструктивних особливостей деталі і вимог до її якості, складу переходів по обробці поверхонь заготовки та її базування в технологічному процесі. На послідовність і кількість етапів обробки поверхонь заготовки впливає термічна обробка, яка неминуче призводить до деформації заготовки, тому операцію «полірування» виконуємо після термічної обробки [26, 27]. Так незагартовані поверхні не шліфують.

В кінці технологічного процесу виконуємо промивку і контроль. Намічена послідовність обробки поверхонь заготовки дозволяє скласти маршрут технологічного процесу виготовлення деталі у вигляді списку переходів з дотриманням послідовності їх виконання. На вибір устаткування впливають такі параметри [26, 27]: склад технологічного процесу виготовлення виробу; властивості матеріалу оброблюваної заготовки; собівартість виготовлення виробу; вимоги до якості деталі.

Продуктивність механічної обробки валів багато в чому залежить від виду матеріалу, розмірів та конфігурації заготовки, а також від характеру виробництва. [26, 27].

Розроблювальний технологічний процес повинен бути прогресивним, забезпечувати підвищення продуктивності праці і якості деталей, скорочення трудових і матеріальних витрат на його реалізацію, зменшення шкідливих впливів на навколишнє середовище. Базовою вихідною інформацією для проектування технологічного процесу є: робочі креслення деталей, технічні вимоги, які регламентують точність, параметр шорсткості поверхні та інші вимоги якості; обсяг річного випуску виробів, що визначає можливість організації потокового виробництва.

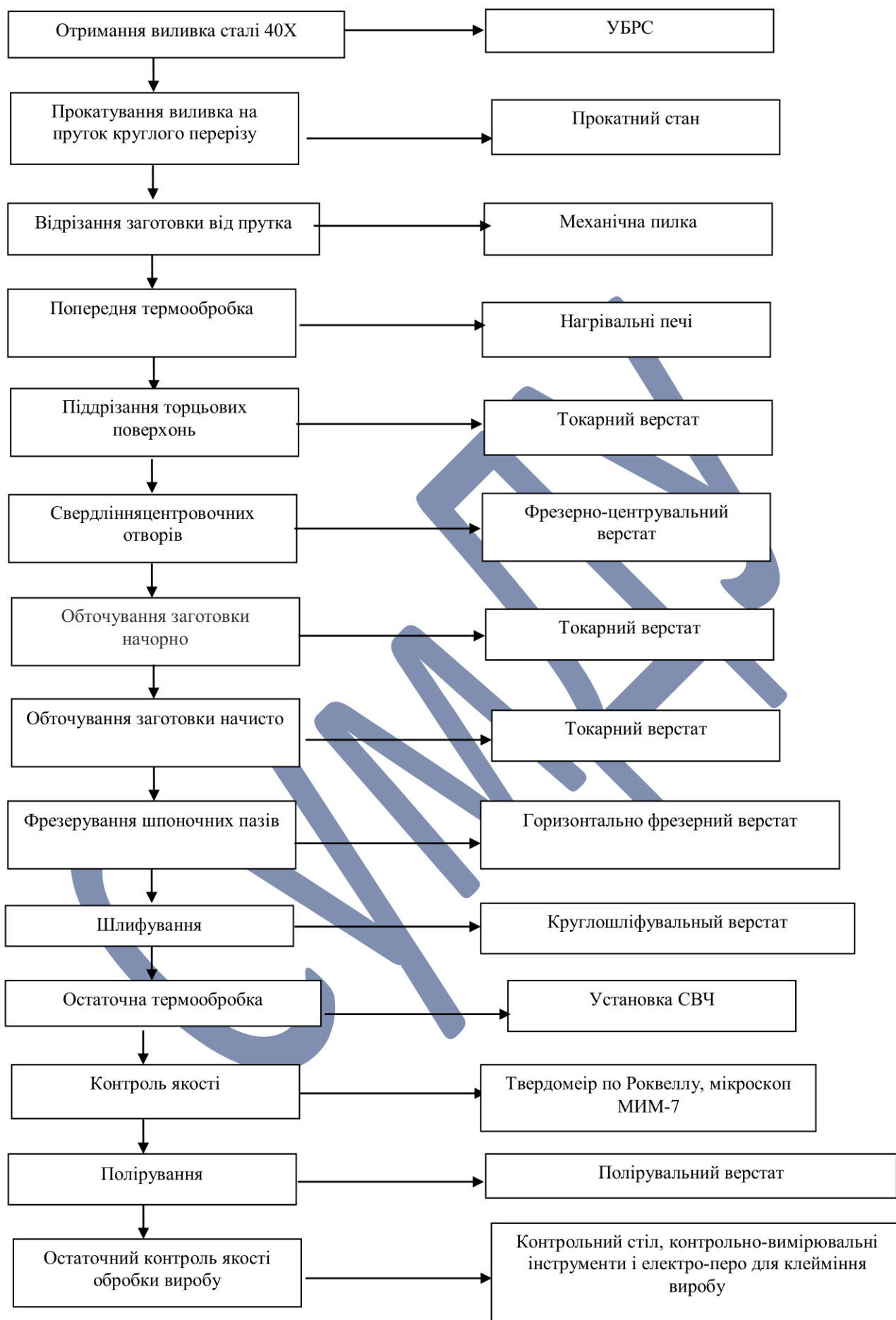


Рисунок 4.1 - Маршрутна технологія отримання валу редуктора

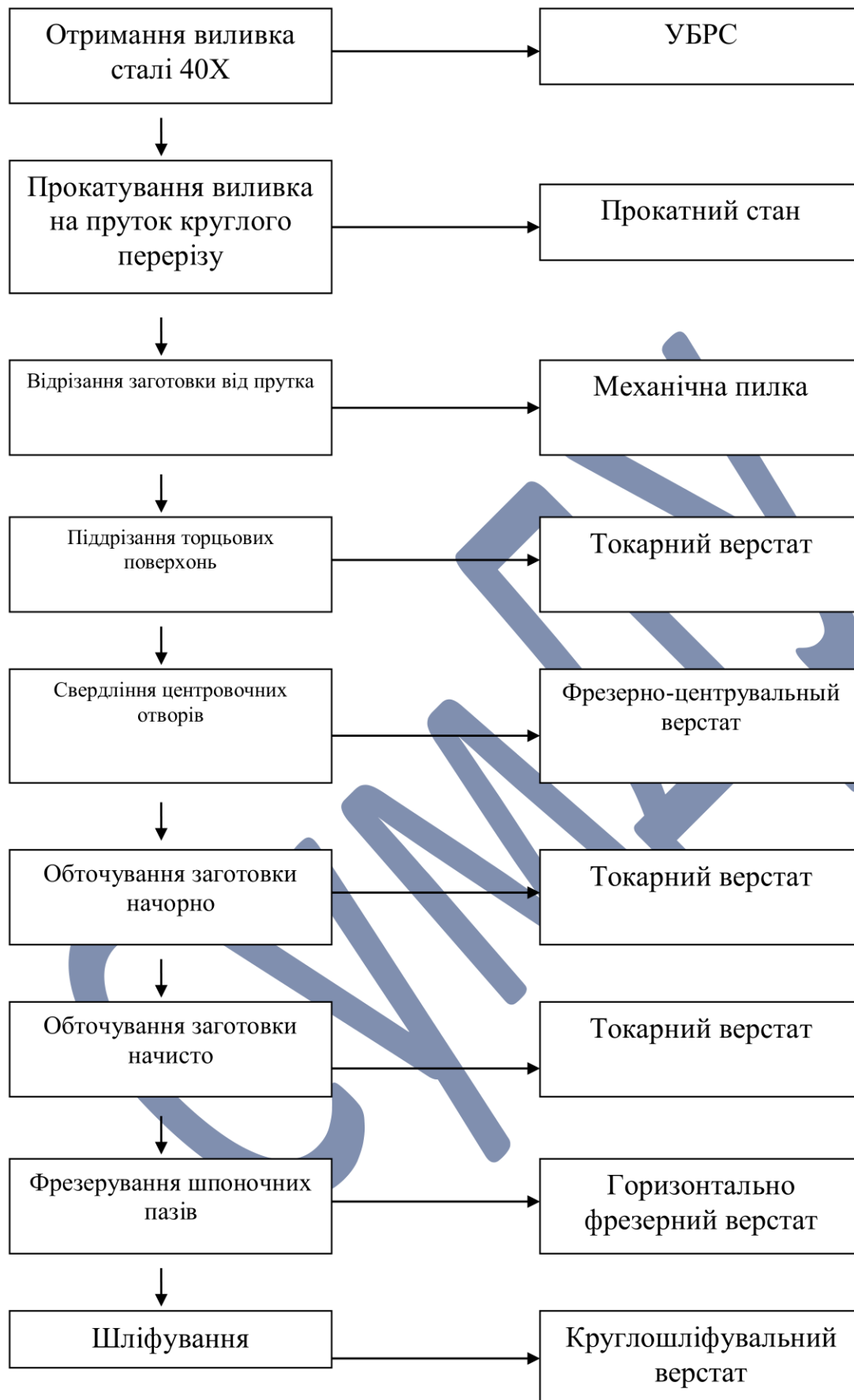


Рисунок 4.2 - Маршрутна технологія механічної обробки валу редуктора

Тип застосовуваного устаткування вибирається залежно від розробленого технологічного маршруту виготовлення деталі при формуванні окремих операцій. Модель обладнання уточнюється з урахуванням вимог, які повинні бути забезпечені при виконанні даної операції. При виборі технологічної оснастки враховуються: тип виробництва, вигляд виробу і програма його випуску, характер наміченої технології, можливість максимального застосування наявної оснащення [26, 27].

Заготівельна операція – заготівля отримана шляхом прокату на прокатному стані і має в перерізі форму круга. Необхідна нам деталь так само має форму кола в перетині, а відповідно більш зручна для обробки з економічної і технологічної точки зору.

Попередня термічна обробка складається з нормалізації для зниження міцності після гарячої пластичної деформації (плющення) і для підготовки структури до подальшої термічної обробки та термополіпшення з метою поліпшення оброблюваності різанням при механічній обробці [5].

Підрізування торцевих поверхонь і свердління отворів центрувальних – дана операція виконується на токарно-гвинторізному верстаті 16К20, де за два переходи обробляється торець і свердлиться центрове отвір, при цьому деталь закріплюється в трикулачній патроні. Для першого переходу використовується токарний прохідний відігнутий правий різець. Марка матеріалу ріжучої кромки - твердий сплав Т15К6, так як дана марка матеріалу найбільш підходить для підрізання торців. Для другого переходу (свердління отвору) використовується комбіноване центрувальне свердло. Марка ріжучої кромки - твердий сплав Т5К10. Комбіновані свердла є дуже продуктивним інструментом, тому що вони одночасно свердлять отвір з обробкою фаски. Центрові отвори дозволяють забезпечити принцип сталості баз для наступних операцій [26, 27].

Токарні операції (обточування заготовки начорно і начисто) - виконуються на токарно-копіювальному багаторізцові напівавтоматі [26, 27].

Фрезерувальна операція (фрезерування паза) - операція виконується на верстаті шпоночно-фрезерному моделі 6Д91. Отримання шпонкових пазів. Так як

пази глухі, то вони обробляються торцевою (пальцевою) фрезою. При виготовленні закритих шпонкових пазів в серійному виробництві застосовують шпоночно-фрезерні напівавтомати [26, 27].

Шліфування проводиться на круглошліфувальному верстаті типу 3М151.

Остаточна термічна обробка - це обробка місць під посадку підшипників за допомогою обробки СВЧ. Після проведення механічної та остаточної термічної обробки проводять контроль якості виробу [26, 27].

Операція полірувальна – після термообробки та обробки поверхні струмами високої частоти застосовується операція – шліфування (полірування). Воно проводиться в дві операції: попереднє і чистове шліфування. Обробка проводиться методом врізного шліфування, що застосовується при обробці шийок незначної довжини. У серійному виробництві шліфування цим методом виконується з автоматичного циклу, що забезпечує кращу якість обробки і підвищує продуктивність [26, 27].

Операція контрольна. Дана операція необхідна для контролю отриманих розмірів. Після вимірювання всіх розмірів, слід порівняти їх з допусками на розмір. Вибір обладнання здійснюється в залежності від типу виробництва [26, 27]. Технологічне обладнання для обробки деталі «вал» наведено в таблиці 4.1.

Дане обладнання було вибрано на основі вихідних даних про заготовку і тип виробництва. Вибрані верстати задовольняють розрахованим режимам різання при обробці даної деталі. Технологічне оснащення включає в себе пристосування установочно-затискні, ріжучі інструменти, допоміжні та обмірні інструменти [26, 27].

Як устаткування для охолодження встановлюємо бак масляний немеханізований, деталі до якого переносимо кран-балкою або краном з печі разом з пристосуваннями. Об'єм бака визначається з розрахунку 10 - 20 л води на 1 кг деталей, що гартуються, при температурі гартування 800 - 1000 °С. У конструкції бака передбачений бортовий відсмоктувач парів і отвори для переливання при переповненні бака [26, 27].

Таблиця 4.1 - Дані для обґрунтування пропонованого технологічного процесу

№ п/п	Найменування операції і переходів	Марка обладнання
1	УБРС (установка безперервного розливання сталі)	
2	Прокатний стан	
3	Механічна пилка	КМ922
4	ТО	Нагрівальні печі для: нормалізації і гартування - СШЗ-8.8/9 і відпуску - СШО-6.12/7
5	Токарно-гвинторізний верстат	16К20
6	Токарно-копіювальний багаторізцевий напівавтомат	1Н713
7	Верстат шпоночно-фрезерний	6Д91
8	Круглошліфувальний верстат	3М151
9	Обробка за допомогою СВЧ	Установка індукційна ИЗВ-1-650
10	Контроль якості виробу	Твердомір Роквелла, МИМ-7
11	Операція полірувальна	3М151
12	Контроль якості поверхні виробу	Обмірні інструменти

Для очищення деталей після гартування встановлюємо мийний бак з гарячим содовим розчином. Мийний бак оснащений змішувачем для підігріву розчину. Для перемішування розчину в бак подається стиснене повітря. В якості підйомно-транспортного устаткування на ділянці встановлено електротельфер (електрична таль), підвішений на монорельсовому пристрої і переміщується вручну або електродвигуном [26, 27].

Для контролю твердості після нормалізації, термополіпшення, СВЧ з низьким відпуском передбачені прилади контролю твердості по Роквеллу - ТК-2 і в кількості 1 одиниця, перевірка твердості - 5% деталей від партії деталей. Контроль якості поверхневого шару після СВЧ проводимо на зразках-свідках в ЦЗЛ підприємства по 2-3 зразка від кожної партії деталі.

## Висновки

Продуктивність механічної обробки валів багато в чому залежить від виду матеріалу, розмірів та конфігурації заготовки, а також від характеру виробництва. В якості заготовок для сталевих валів діаметром до 100 мм зазвичай використовують круглий прокат, для валів більшого діаметру та фасонних валів – поковки

Мета механічної обробки - забезпечити, відповідно до технічних вимог, точність розмірів, форми і мікрогеометрію поверхні. Для отримання необхідної деталі зі сталі 40Х вибрано заготовку "прокат" (сортамент гарячекатаний). Обґрунтування послідовності обробки поверхонь заготовки ведуть з урахуванням конструктивних особливостей деталі і вимог до її якості, складу переходів по обробці поверхонь заготовки та її базування в технологічному процесі, необхідності термічної обробки, умов організації виробничого процесу та інших.. На послідовність і кількість етапів обробки поверхонь заготовки впливає термічна обробка, яка неминуче призводить до деформації заготовки, тому операцію «полірування» виконуємо після термічної обробки

Розроблювальний технологічний процес повинен бути прогресивним, забезпечувати підвищення продуктивності праці і якості деталей, скорочення трудових і матеріальних витрат на його реалізацію, зменшення шкідливих впливів на навколишнє середовище. Базовою вихідною інформацією для проектування технологічного процесу є: робочі креслення деталей, технічні вимоги, які регламентують точність, параметр шорсткості поверхні та інші вимоги якості; обсяг річного випуску виробів, що визначає можливість організації потокового виробництва. Тип вживаного устаткування вибирається залежно від розробленого технологічного маршруту виготовлення деталі при формуванні окремих операцій. При виборі технологічної оснастки враховуються: тип виробництва, вигляд виробу і програма його випуску, характер наміченої технології, можливість максимального застосування наявної оснащення.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 5.1 Термічна обробка деталі «вал редуктора»

Різноманіття видів зношування поверхонь валів і умов їх виникнення та розвитку обумовлює і різноманіття методів усунення або локалізації зносу. Технологічні засоби підвищення зносостійкості, так само, як і всі інші, повинні використовуватися з урахуванням видів зношування, умов їх виникнення і бути спрямовані на усунення діапазону нормального окислювального зносу і мінімізацію його інтенсивності. Підвищення зносостійкості в результаті застосування методів зміцнюючої технології досягається за рахунок збільшення твердості і зниження пластичності поверхневого шару, а в деяких випадках – за рахунок зміни хімічного і фазового складу цього шару. Термічна обробка металів і сплавів є одним з найпоширеніших методів зміни їх властивостей. Для зміни об'ємних властивостей матеріалу валів застосовують різні види об'ємної термічної обробки (відпал, гартування, відпуск), а для зміни властивостей поверхневих шарів – поверхнєве гартування чи хіміко-термічну обробку [5, 6].

Поверхнєве гартування полягає в нагріві тонкого поверхневого шару до температури утворення в ньому аустеніту і наступному швидкому охолодженні для фіксації дрібногольчатого мартенситу. Нагрівання при поверхневому гартуванні здійснюється струмами високої частоти [5, 6].

Багато деталей машин та інструментів необхідно зміцнювати не повністю по всій поверхні, а на окремих ділянках. Для цієї мети перспективно застосувати технології зміцнення за допомогою струмів високої частоти. У деталі типу «вал редуктора» поверхні в процесі експлуатації піддаються стиранню і в той же час на них впливають динамічні навантаження. Для успішної роботи в таких умовах поверхня деталі повинна мати високу твердість, а серцевина бути в'язкою. Таке поєднання властивостей досягається правильним вибором марки сталі і подальшим зміцненням її поверхневих шарів. Для підвищення втомної витривалості, зносостійкості необхідно підвищувати твердість поверхні валів, що



досягається поверхневим гартуванням, хіміко-термічної обробкою, пластичною деформацією для створення на поверхні деталей залишкових напруг стиснення. На основі результатів експериментальних досліджень в сталях з поверхневим зміцненням рекомендується вміст вуглецю не вище 0,40 %, а оптимальні значення твердості серцевини після термічної обробки повинні знаходитися в межах HRC 24-32 [5, 6].

У зв'язку з необхідністю забезпечення поверхневої твердості в місцях знаходження підшипників HRC 48-50 структура шару повинна складатися в основному з дрібногольчатого мартенситу з невеликими ізольованими ділянками залишкового аустеніту. Абсолютно неприпустимі виділення карбідів у формі сітки по межах зерен, бо при цьому різко зростає крихкість. Вміст залишкового аустеніту в шарі не повинно перевищувати 15-20 % [5, 6].

Таким чином, для отримання високих показників міцності виробів необхідно забезпечити регулювання у вузьких межах ряду параметрів, що характеризують будову і властивості поверхневого шару і осердя. Разом з тим, при високих значеннях межі міцності, межі витривалості при згині, межі контактної витривалості в сталі необхідно забезпечити і задовільну в'язкість. Тому сталі повинні бути спадково дрібнозернистими (бал 6-8). Крім того, застосування дрібнозернистих сталей має дозволити використання найбільш раціонального режиму термічної обробки [5, 6].

Сталі для валів також повинні мати гарну оброблюваність різанням, тому попередня термічна обробка повинна забезпечувати оптимальну мікроструктуру. При незадовільній мікроструктурі заготовок погіршується якість робочої поверхні, а виникаючі в процесі різання внутрішні напруги сприяють збільшенню деформації виробів при подальшій термічній обробці. Тому, вали повинні мати високу твердість, міцність і зносостійкість поверхневого шару, підвищену контактну витривалість, а також в'язку, м'яку серцевину для того, щоб сприймати (гасити) знакозмінні напруги, які діють на деталі [1, 5, 6, 8].

На виробництві вал редуктора виготовляють зі сталі 40ХН. Попередня термічна обробка для сталі 40ХН – повний відпал при температурі 800-820 °С з

наступним охолодженням з піччю до 500 °С з подальшим охолодженням на повітрі. Структура після відпалу – сорбітообразний перліт і ферит. Далі проводять термополіпшення – це гартування при температурі 800-820 °С для 40ХН з охолодженням у маслі (час витримки 1,5-2,0 години), і високий відпуск при температурі 600 °С з охолодженням у маслі.

Обрана нами сталь 40Х відноситься до покращуваних легуваних сталей. Покращувані (середньовуглецеві) сталі містять 0,3 - 0,5% С і до 5 % різних легуючих елементів. Сталі цієї групи піддають зазвичай термополіпшенню – гартуванню в маслі і високому відпуску (до 600 °С). В якості попередньої термообробки ми вибираємо нормалізацію і подальше термополіпшення, так як наш вал є середньонавантаженим, має максимальний діаметр - 64 мм (входить в інтервал до 80 ... 100 мм), і його працездатність визначається міцністю на вигин і крутіння, а не контактної витривалістю і зносостійкістю [7].

Для сталі 40Х нормалізація проводиться при температурі 840-870 °С з наступним охолодженням на повітрі. Час витримки при нормалізації 0,5 години. Нормалізація – термообробка, при якій сталь охолоджується не в печі, як при відпалі, а на повітрі в цеху. Нагрівання ведеться до повної перекристалізації (на 30-50 °С вище точок  $A_{с3}$  і  $A_{cm}$ ), в результаті сталь набуває дрібнозернисту, однорідну структуру. Твердість, міцність сталі після нормалізації незначно вищі, ніж після відпалу [7].

При нагріванні до температури нормалізації низьковуглецевих сталей відбуваються ті ж процеси, що і при відпалі, тобто подрібнення зерен. Але, крім того, внаслідок охолодження, більш швидкого, ніж при відпалі, і протікаючому при цьому переохолодженні, будова перліту виходить більш тонкою (дисперсною), а його кількість більшою [1, 5, 6, 8]. Нормалізація в порівнянні з відпалом – більш економічна операція, тому що не вимагає охолодження разом з піччю. У зв'язку із зазначеними перевагами нормалізація отримала широке поширення замість відпалу низьковуглецевих сталей. Нормалізація сталі застосовується для: усунення грубозернистої структури, отриманої в результаті попередньої обробки (прокатки, кування, штампування): деякого підвищення

міцності середньовуглецевої сталі в порівнянні з відпаленою; полегшення оброблюваності різанням низьковуглецевої сталі; виправлення структури зварного з'єднання і зменшення внутрішньої напруги [1, 5, 6, 8].

При нормалізації сталь 40X нагрівають вище критичної точки  $A_{C3}$  на 30-50 °С витримують впродовж 30 хвилин, з подальшим охолодженням на повітрі. Твердість після нормалізації - 190-217 НВ, а структура – сорбітообразний перліт і ферит. Охолодження виробів на повітрі, а не в печі, підвищує продуктивність печей і здешевлює продукцію [1, 5, 6, 8].

Далі застосовуємо термополіпшення – це гартування при температурі 840-870 °С для 40X з охолодженням у маслі (час витримки 1 - 1,5 години), і високий відпуск при температурі 550 °С з охолодженням у маслі. Охолодження є виключно важливою операцією гартування, так як від нього практично залежить отримання необхідної структури в металі [1, 5, 6, 8]. Для цього має бути достатня кількість охолоджуючої рідини, щоб температура під час перебування в ній деталі підвищувалася незначно. Для досягнення рівномірного гартування нагріту деталь треба швидко занурити в охолоджуючу рідину і перемішати її в рідині до повного охолодження. Зобразимо графік режиму термічної обробки сталі 40X (рис. 5.1).

Гартування – це не остаточна операція термічної обробки, тому що після її сталь стає не тільки міцною і твердою, але і дуже крихкою, а в поковці виникають великі гартівні напруги.

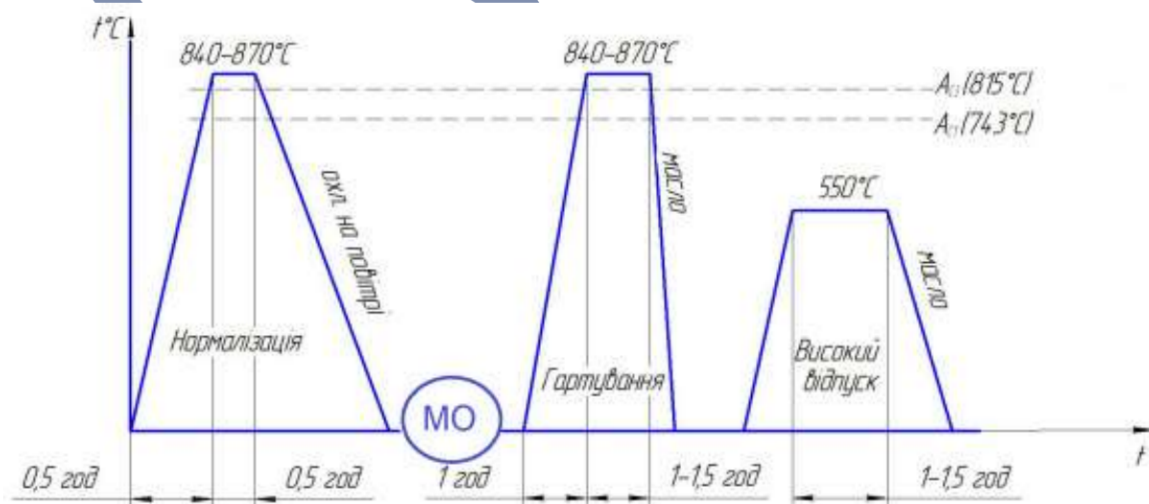


Рисунок 5.1 – Графік режимів термічної обробки вала зі сталі 40X

Ці напруги досягають таких значень, при яких в поковках з'являються тріщини або деталі з цих поковок руйнуються на самому початку їх експлуатації. Тому для зменшення крихкості, внутрішніх гартівних напруг і отримання необхідних міцнісних властивостей сталі після гартування піддають відпуску. Відпуск полягає в нагріванні загартованої сталі до температури нижче  $A_{C1}$ , витримці при цій температурі деякий час і швидкого або повільного охолодження, як правило, на повітрі. В процесі відпуску в металі структурних змін не відбувається, проте зменшуються гартівні напруги, твердість і міцність, а пластичність і в'язкість збільшуються. Високий відпуск полягає в нагріві загартованої деталі до температури 450 - 650 °С, витримці при цій температурі і охолодженні. Загартування з високим відпуском у порівнянні з відпалом, створює найкраще співвідношення між міцністю сталі і її в'язкістю. Таке поєднання термообробки називають термополіпшенням [1, 5, 6, 8]. Структура після такої обробки – сорбіт відпуску.

Після нормалізації (в рівноважному стані) сталь має структуру, що складається з фериту та перлиту (рис. 5.2). У термічно обробленій сталі структура складається з продукту розпаду мартенситу - сорбіту (рис. 5.3). Поліпшення забезпечує високий комплекс механічних властивостей:  $\sigma_B = 1000$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 800$  МПа;  $\delta = 10$  %;  $\psi = 45$  %,  $KCU = 0,6$  МДж/м<sup>2</sup>.

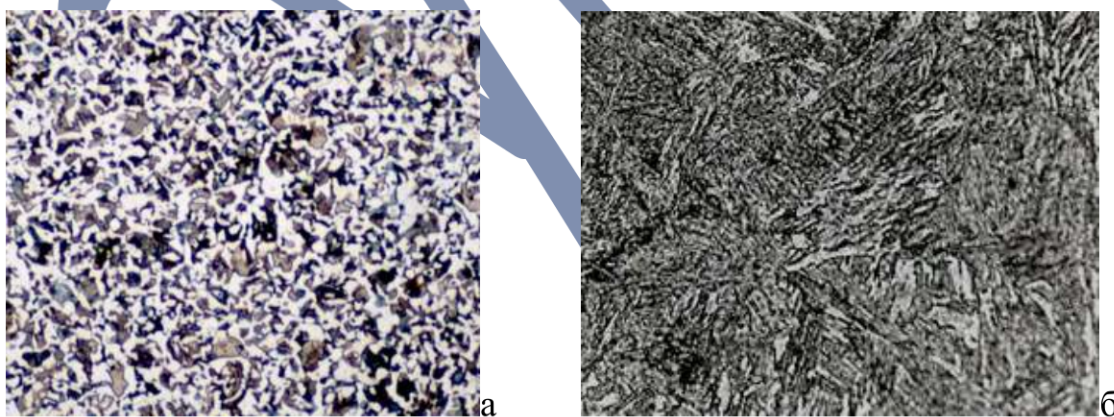


Рисунок 5.2 - Мікроструктура сталі 40X після нормалізації (а), x250 і гартування (б), x250



Рисунок 5.3 - Мікроструктура сталі 40X після термополіпшення, x250

Твердість після термополіпшення, складає 300-330 НВ.

Металеві деталі, що працюють на тертя, крутіння, вигин і т.д. повинні володіти високою твердістю, але цією властивістю вони повинні володіти тільки на поверхні, в середині деталі ж зайва твердість металу небажана. Такі деталі рекомендується піддавати поверхневому зміцненню. Один з найпростіших способів такого гартування полягає в завантаженні деталі в піч з високою температурою (950 - 1000 °С), швидкому нагріванні поверхні до гартівної температури і охолодженні з великою швидкістю в проточному охолоджуючому середовищі [5, 6, 8].

СВЧ гартування відбувається наступним чином: деталь, яку треба загартувати, поміщається в електромагнітне поле (рис. 5.4) всередині мідної трубки, яка зігнута за формою необхідної деталі, при цьому індукуються перемінні струми високої частоти, вони (струми) відтісняються до поверхні деталі зсередини виникли змінним магнітним струмом. Гартування індукційним СВЧ характеризується двома параметрами: глибиною і твердістю загартованого шару деталі. Для отримання тонкого шару у деталі використовуються індукційні нагрівачі (СВЧ установки) потужністю від 40 кВА до 160 кВА і частотою 20 - 40 кГц або 40 - 70 кГц. Якщо здійснюється гартування більш глибоких шарів, то використовується діапазон частот 6 - 20 кГц [5, 6, 8].



Рисунок 5.4 - Поверхнєве гартування валів струмами високої частоти [6]

У поверхневому гартуванні струмами високої частоти є ряд переваг: висока твердість; висока продуктивність; будь-який рівень глибини загартованого шару деталі; відсутність окалини; можливість гартування деталей будь-яких форм; можливість впровадження повної автоматизації гартування. Глибина загартованого шару залежить, насамперед, від глибини проникнення в метал індукovanого струму, який в силу так званого поверхневого ефекту концентрується біля поверхні, швидко спадаючи всередину виробу. Регулюючи частоту струму, температуру і швидкість нагріву, можна отримати прогрів на будь-яку товщину від часток міліметра до десятків міліметрів. Охолодження може проводитися водою, що надходить у вигляді душа безпосередньо з індуктора, або зануренням нагрітої деталі в бак з маслом [5, 6, 8]. Схема індукційного нагріву для гарту струмами високої частоти (СВЧ) представлена на рисунку 5.5.

Індуктори СВЧ нагрівання повинні відповідати таким вимогам [5, 6, 8]:

- електричне узгодження з СВЧ установкою індукційного нагріву (індукційної піччю);
- наявність електричної ізоляції між витками;
- наявність теплової ізоляції від нагріваємої заготовки;
- організація протока рідини для охолодження стінок індуктора.

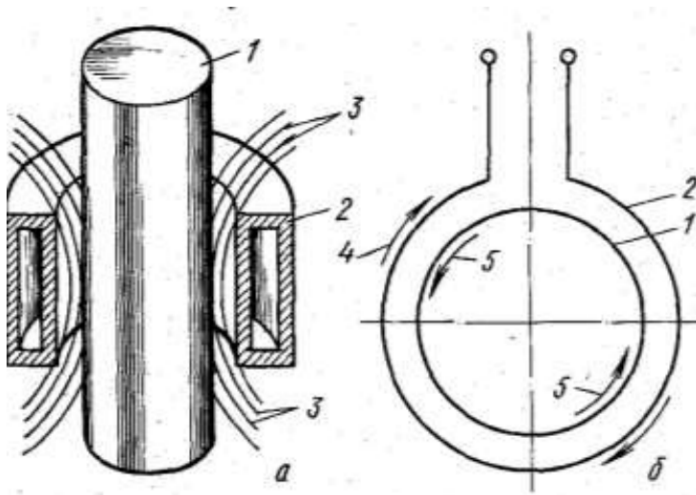


Рисунок 5.5 - Схема індукційного нагріву: а - розподіл магнітного потоку в індукторі; б - напрям струмів в індукторі і деталі; 1 - нагріваєма деталь, 2 - виток індуктора; 3 - магнітні силові лінії, 4 - напрямок струму в індукторі, 5 - напрямок струму в деталі

Першою і основною перевагою будь-якого гартування з поверхневим нагрівом, в тому числі і високочастотного поверхневого гартування, в порівнянні з наскрізним гартуванням є зменшення крихкості деталей і виробів. Крихкість зменшується в результаті утворення пластичної і в'язкої серцевини, а в багатьох випадках внаслідок місцевого розташування загартованого шару тільки на ділянках, твердість яких повинна бути високою [5-8].

Другою перевагою гартування з поверхневим нагрівом є істотне зменшення деформацій під час нагрівання й охолодження, що досягається за рахунок жорсткості холодної серцевини [5-8].

Третя перевага – практично повне усунення окислення і знеуглецювання, що при зменшенні деформації дозволяє в деяких випадках проводити загартування остаточно готових деталей без шліфування [5-8].

Четвертою перевагою є зменшення витрат енергії на нагрів: нагрівається шар в багатьох випадках становить невелику частину ваги деталі [5-8].

П'ята перевага – при порівнянні високочастотного поверхневого гартування з методами звичайної хіміко-термічної обробки звертає на себе увагу в першу чергу колосальний виграш в тривалості і вартості процесів. Час перебування металу в області температур фазових перетворень в першу чергу залежить від швидкості нагрівання. Швидкість нагрівання сталевих виробів при використанні індукційного методу не є постійною в усьому інтервалі температур. Вона змінюється внаслідок зміни його опору і магнітної проникності сталі [5-8].

Для підвищення міцнісних властивостей поверхні в місцях розташування підшипників проводимо зміцнення струмами високої частоти (нагрів СВЧ) і низький відпуск (рис. 5.6). Поверхнєве гартування струмами високої частоти проводимо за допомогою індукційної установки ИЗВ-1-650, яка призначена для поверхневого гартування циліндричних і плоских поверхонь. Для отримання зносостійкого шару на нашому зразку з глибиною  $h = 1 - 3$  мм встановлюємо частоту струму в  $f = 2500$  Гц, температуру нагрівання в  $900-950$  °С. Зразок загартовуємо протягом 5 секунд. Отримуємо твердість  $\overline{48-50}$  HRC.

Операція поверхневого гартування СВЧ розвиває в поверхневому шарі залишкові напруги. Відпуск суттєво змінює розподіл напружень і доводить залишкові напруги стиску в поверхні до нульових значень або до напружень розтягнення. Низький відпуск також підвищує міцність і поліпшує в'язкість без зміни твердості. Тому відпуск ( $180-200$  °С) необхідний як заключна операція термічної обробки. Час витримки 1,5 години. Далі проводять охолодження на повітрі. Після поверхневого гартування СВЧ поверхневий шар сталі має структуру дуже дрібноголчастого мартенситу (рис. 5.7). В серцевині зміна структури та зміцнення не відбувається, тому що нагрів був нижче  $A_{C1}$ .

Низький відпуск незначно знижує твердість поверхнево-загартованого шару виробу до  $45-48$  HRC і суттєво (часто в  $1,5 - 2$  рази) підвищує опір сталі крихкому руйнуванню, збільшує втомну міцність, зменшує чутливість до концентраторів напруг.

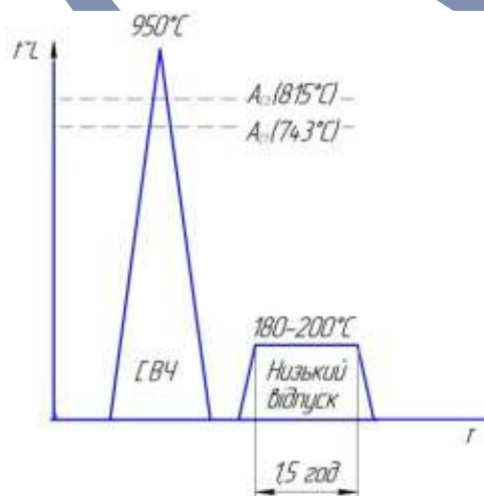


Рисунок 5.6 - Графік режиму остаточної термічної обробки вала редуктора зі сталі 40X



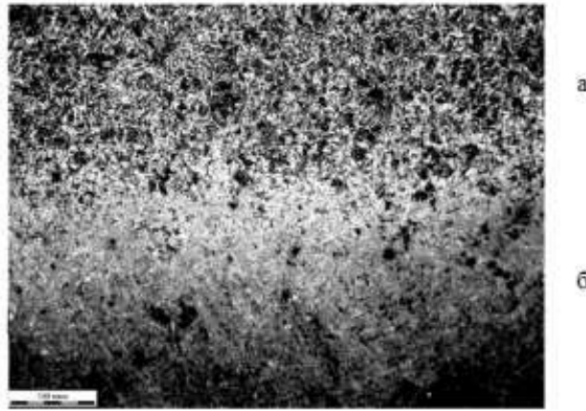


Рисунок 5.7 - Структура після гартування СВЧ – дрібногольчастий мартенсит (а), тростосорбіт (б), x500

На поверхні вала отримуємо мартенсит відпуску, товщина даного шару залежатиме від частоти установки СВЧ. Таким чином, деталь «вал редуктора» матиме в серцевині тростосорбіт, а на поверхні дрібногольчастий мартенсит. Поверхневий шар загартованого металу має товщину порядку 1,5 - 2,0 мм. Поверхнєве гартування приводить до підвищення міцності зразків – меж пропорційності, плинності і міцності на розтяг, вигин і кручення і меж витривалості у порівнянні з цими ж параметрами для сталі в незагартованій стані. Властивості, що характеризують пластичність і в'язкість, - подовження, звуження, стріла прогину, кут закручування, ударна в'язкість - при поверхневому загартуванні знижуються.

## **5.2 Вибір необхідного обладнання для отримання валу редуктора, проведення термічної обробки та розрахунок його кількості**

### **5.2.1 Вибір необхідного обладнання для отримання валу редуктора та проведення термічної обробки**

Тип обладнання для проектного цеху вибирається на підставі розробленого технологічного процесу термічної обробки і режимів термічної обробки. Вибір обладнання залежить також від способу виконання операцій, встановлюється в залежності від наступних факторів [28]:

1. Характер завантаження: поштучний або партіями, садками - застосовується в цехах індивідуального і дрібносерійного виробництва, здійснюється на обладнанні періодичної дії (камерні і шахтні печі), здатному до швидкого переналагодження технологічного режиму; безперервний - застосовується в цехах масового і великосерійного виробництва і здійснюється на поточному обладнанні безперервної дії (агрегати, конвеєрні і товкальні печі).

2. Положення виробів в процесі обробки: стаціонарне; переміщення по повторюваній траєкторії; поступальне переміщення.

3. Поєднання операцій: послідовне; паралельне; паралельно-послідовне.

4. Режим роботи обладнання: періодичний; напівбезперервний; безперервний.

Згідно таблиці 4.1 було вибрано необхідне обладнання і розраховано його кількість.

Безперервне розливання сталі виробляється на установці УБРС (операція № 1) і полягає в тому, що рідкий метал безпосередньо з ковша або через проміжний пристрій безперервно заливається в верхню частину водоохолоджуваного кристалізатора, в який попередньо вводять затравки того ж поперечного перерізу, що і злиток.

Операція № 2 проводиться на прокатному стані. Це комплекс обладнання, в якому відбувається пластична деформація металу між обертовими, тобто для здійснення процесу прокатки, у більш широкому значенні - автоматична система або лінія машин (агрегатів), що виконує не лише прокатку, але і допоміжні операції: транспортування вихідної заготовки з складу до нагрівальних печей і до валків стану, передачу прокатаного матеріалу від одного калібру до іншого, кантуванні, транспортування металу після прокатки, різання на частини, маркування або таврування, правку, упаковку, передачу на склад готової продукції та інше.

Для виконання операції № 3 можна застосувати механічну пилу КМ922, що має такі технічні характеристики: тах розміри оброблюваної заготовки - 250 мм; тах довжина розрізу матеріалу по упору - 500 мм; тах ширина пропилювання -

3,5 м; довжина ходу пильної рами - 180 мм; габарити - 1690x422, 9x900 мм, вага 835 кг.

Для попередньої термічної обробки вала редуктора (операція № 4) вибираємо шахтні печі СШЗ-8.8/9 і СШО-6.12/7. Печі з окисної атмосферою для температур до 300 °С (низький відпуск) і частково для температури 700 °С позначаються індексом СШО, для температур до 700 °С (високий відпуск), 1000 і 1250 °С (нагрів під гартування) з контрольованою атмосферою позначаються індексом СШЗ [28, 29]:.

а) піч для нормалізації і гартування СШЗ-8.8/9.

Характеристики: діаметр робочого простору – 0,8 м, висота робочого простору - 0,8 м, об'єм робочого простору - 0,4 м<sup>3</sup>, температура – 950 °С, габарити, м - 2,9x4,9x7,3, садка – 1 т, продуктивність - 150 кг/годину, потужність - 154 кВт, вакуум - 10<sup>-1</sup>.

б) піч для відпуску СШО-6.12/7.

Характеристики: діаметр робочого простору - 0,6 м, висота робочого простору - 1,2 м, об'єм робочого простору - 0,34 м<sup>3</sup>, температура-700 °С, габарити - 2,8x2,7x4,0, садка - 1т, продуктивність - 100 кг/год, потужність - 50 кВт.

Вибрані нами печі відносяться до муфельних. Муфельна піч - це нагрівальний пристрій, призначений для нагріву різноманітних матеріалів до певної температури. Головною особливістю цієї печі є наявність так званого муфеля, що захищає оброблюваний матеріал і є головним робочим простором муфельної печі (тобто, муфель оберігає матеріал або виріб від контакту з паливом і продуктами його згоряння, в тому числі газами). Муфельні печі поділяються по температурному робочому діапазону на такі типи: помірні температури: 100 °С-500 °С; середні температури: 400 °С-900 °С; високі температури: 900 °С-1400 °С; надвисокі температури: 1400 °С -1650 °С (2000 °С). За типом нагрівання: електричні та газові муфельні печі. Зовнішній вигляд і пристрій шахтної муфельної електричної печі з контрольованою атмосферою типу СШЗ (СШО) наведені на рисунку 5.8 [28, 29]:.

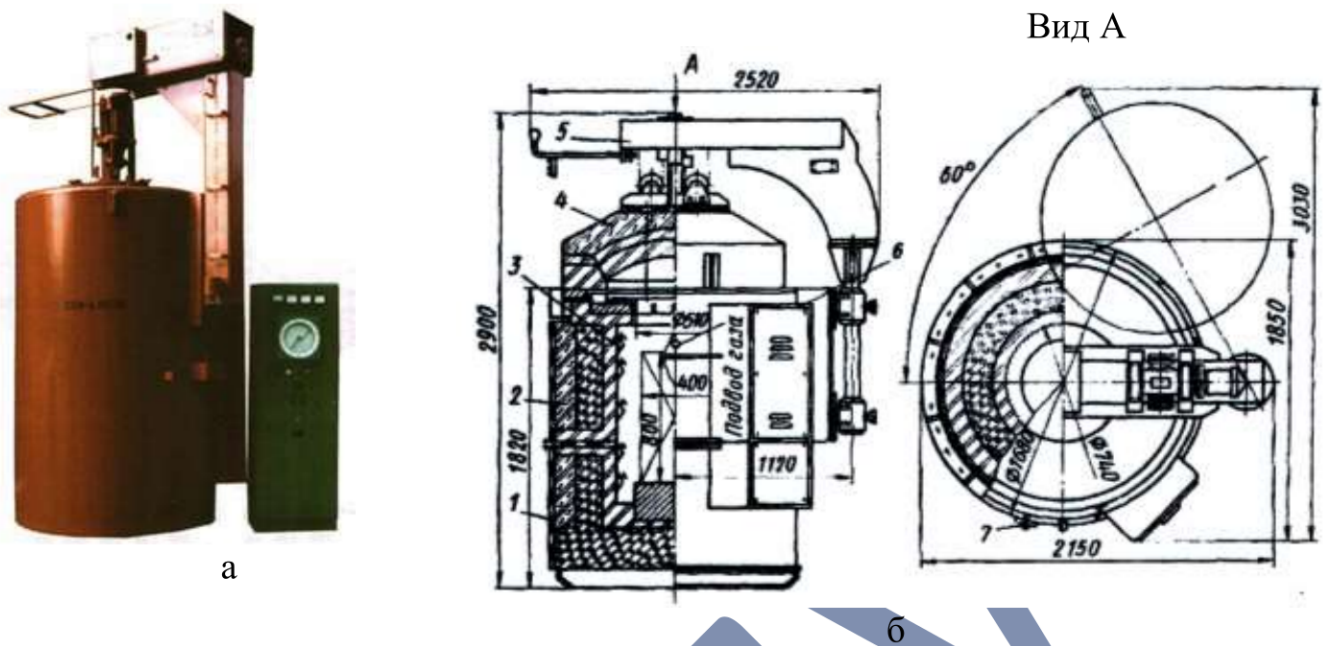


Рисунок 5.8 - Шахтна муфельна електрична піч з контрольованою атмосферою типу СШЗ (СШО): 1 - кожух, 2 - футеровка; 3 - нагрівальні елементи, 4 - кришка; 5 - механізм підйому кришки; 6 - підведення електроживлення до нагрівальних елементів; 7 - трубка для відводу газу

Піч типу СШЗ (СШО) (рис. 5.8) має зварний кожух, в який поміщена вогнетривка і теплоізоляційна кладка. Особливістю печі даного типу є використання в робочому просторі печі контрольованої атмосфери. Печі типу СШО (СШЗ) працюють з окисної або захисною атмосферою. Зверху піч перекривається поворотною кришкою з механізмом підйому і повороту. Вентилятор розташований внизу печі. Нагрівачі розміщені на бічних стінках печі. Між нагрівачами і оброблюваними деталями або виробами є екран з напрямними для запобігання його від пошкоджень при завантаженні виробів. Для забезпечення рівномірності нагрівання піч розбита по висоті на три температурні зони I-III. Температуру вимірюють термопарами. Роз'їм між піччю і кришкою ущільнюють за допомогою пісочного затвора. Завантаження деталей проводимо за допомогою пристроїв та крана або кран-балки [28, 29].

Гартування проводиться в гартівних баках. Звичайні охолоджувачі при термічній обробці (вода, водні розчини солей або масло) знаходяться в гартівних баках. Розрізняються три види гартівних баків: немеханізовані, механізовані

безконвеєрні і конвеєрні. Баки встановлюють зазвичай на підлозі цеху. При великій висоті їх поглиблюють в землю так, щоб висота над рівнем підлоги цеху не перевищувала 800 - 900 мм. Часто застосовують здвоєні баки для води та масла: в цьому випадку бак розміром 1200x700x800 мм розділяється перегородкою на дві половини розміром 600x700x800 мм [28, 29].

При шахтних гартівних печах встановлюють зазвичай циліндричні баки, які заввишки трохи перевищують висоту робочого простору печі. Висота такого бака над рівнем підлоги знаходиться у відповідності з висотою шахтної печі над рівнем підлоги.

Як устаткування для охолодження встановлюємо бак масляний немеханізований, деталі в який переносимо кран-балкою або краном з печі разом з пристосуваннями. Обсяг бака визначається з розрахунку 10 - 20 л води на 1 кг гартованих деталей при температурі гартування 800 - 1050 °С. У конструкції бака передбачений бортовий відсмоктувач парів і отвори для переливання при переповненні бака [28, 29].

Для виконання операції № 5 використовується токарно-гвинторізний верстат з ЧПУ моделі 16К20. Як пристосування використовується трикулачний пневмопатрон, а як інструмент різці з твердосплавними пластинами Т5К10.

Операція № 6 виконується на токарно-копіювальному багаторізцові напівавтоматі 1Н713. Напівавтомат 1Н713 призначений для токарної обробки деталей в патроні деталей складної конфігурації: обточування циліндрових, конічних і сферичних поверхонь в умовах серійного, великосерійного виробництва.

Операція № 7 виконується на шпоночно-фрезерному верстаті моделі 6Д91.

Шліфування (операція № 8) проводиться на кругло-шліфувальному верстаті типу 3М151, призначеному для зовнішнього шліфування гладких і переривчастих циліндричних і пологих конічних поверхонь методами поздовжнього і врізного шліфування.

Операція № 9 виконується з використанням установки для обробки СВЧ. Для обробки поверхні вала струмами високої частоти використовуємо установку

індукційну ИЗВ-1-650 (рис. 5.9), яка призначена для поверхневого гартування циліндричних і плоских поверхонь. При гартуванні вали і шестерні обертаються навколо своєї осі або нерухомі; плита нерухома. Індуктор з блоком узгодження переміщається уздовж осі деталі. Установка забезпечує кріплення і обертання оброблюваної деталі, рух індуктора уздовж осі деталі, а також подачу гартівної рідини і має такі технічні характеристики: розміри оброблюваних деталей: діаметр вала – 10 - 200 мм, діаметр шестерні – 10 - 200 мм, ширина плоскої плити 20 - 300 мм; довжина оброблюваних деталей – 10 - 950 мм; маса оброблюваних деталей - до 35 кг. Продуктивність установки 350 - 450 кг/год.



Рисунок 5.9 - Установка індукційна ИЗВ-1-650 для обробки СВЧ

Габаритні розміри установки (ДхШхВ), не більше - 1500x800x2000мм. Маса, не більше - 200 кг (без охолоджуючої рідини)

Після термообробки та обробки поверхні струмами високої частоти застосовується операція - чистове шліфування, операція № 11, яка виконуються на кругло-шліфувальному верстаті 3М151. Обробка проводиться методом врізного шліфування, що застосовується при обробці шийок незначної довжини. У серійному виробництві шліфування цим методом виконується з автоматичного циклу, що забезпечує кращу якість обробки і підвищує продуктивність.

Остаточний контроль готових виробів (операція № 12) проводиться за допомогою вимірювальних інструментів.

В якості підйомно-транспортного устаткування на дільниці встановлено електротельфер (електрична таль), підвішений на монорельсовому пристрої і переміщуваний вручну або електродвигуном.

## 5.2.2 Розрахунок необхідної кількості обладнання для проведення термічної обробки

Вибір обладнання починається з аналізу технологій термічної обробки деталей, що проводять в цеху чи на термічній дільниці. Також необхідно розглянути, які види обладнання мають більшу продуктивність, забезпечують кращі показники якості термообробки, є краще автоматизованими й механізованими [28].

Як зазначено вище для термічної обробки вихідного вала редуктора РМ-400, вибираємо шахтні печі СШВ-8.8/9, СШО-6.12/7, і установку ИЗВ-1-650 для поверхневого гартування СВЧ. Приймаються річний випуск продукції 200 т = 200000 кг.

Маса готової деталі:  $m = 6,9$  кг.

Річний випуск продукції становить 200 000 кг.

Кількість деталей, що випускаються за рік –  $200\ 000 / 6,9 = 29\ 000$  шт / рік.

Отже за 1 рік випускається 29000 валів.

Дану деталь потрібно піддавати зміцненню СВЧ. Режим роботи термічної ділянки буде 1-но змінний.

Річний фонд ефективного часу роботи обладнання залежить від встановленого режиму роботи, тривалості зміни, втрат часу на ремонт і переналадження обладнання та розраховується за формулою [28]:

$$\Phi_{\text{д}} = (365 - В - П) \cdot 3 \cdot t \cdot K_{\text{р}}, \quad (5.1)$$

де  $\Phi_{\text{д}}$  - дійсний річний фонд часу обладнання, год;

$В$  - кількість вихідних днів на рік (за вирахуванням вихідних, співпадають зі святковими днями);

$П$  - кількість святкових днів у році;

$С$  - кількість змін у добі;

$t$  - середня тривалість однієї зміни.

Таким чином,  $\Phi_{\text{д}}$  для 1-но змінного режиму роботи дорівнює 1808 годин.

$$K_{\text{р}} = E_{\text{і}} / \Phi_{\text{д}} = P_{\text{і}} / (P_{\text{і}} \cdot \Phi_{\text{д}}). \quad (5.2)$$

Так як я вибираю однозмінний робочий день:

$\Phi_{\text{д}} = 1808$  годин;

$E_i$  – необхідна кількість годин для виробничої програми для відповідного виду термічної обробки виробу  $i$ -го найменування.

$$E_i = \Pi_i / P_i. \quad (5.3)$$

де  $\Pi_i$  - річна виробнича програма по відповідній операції оброблюваної деталі  $i$ -го найменування;

$P_i$  - годинна продуктивність одиниці обладнання при відповідній операції обробки деталей  $i$ -го найменування.

$$P_i = M_i / \tau_i. \quad (5.4)$$

де  $M_i$  - маса садки деталі  $i$ -го найменування;

$\tau_i$  - нормування часу обробки однієї садки деталей  $i$ -го найменування.

Маса деталі до механічної обробки буде 6,9 кг [28].

Нормалізація проводиться при температурі 840-870 °С в шахтній печі типу СШВ-8.8/9:

$\Pi_{\text{Н}} = 200\ 000$  кг;  $\Phi_{\text{д}} = 1808$  год;  $\tau_{\text{О}} = 0,5$  год; кількість деталей у садці – 40 штук.

$$M_{\text{О}} = 40 \cdot 6,9 = 276 \text{ кг}$$

$$P_{\text{О}} = M_{\text{О}} / \tau_{\text{О}} = 276 / 0,5 = 552 \text{ кг / год}$$

$$K_{\text{Р}} = 200\ 000 / (552 \cdot 1808) = 0,49$$

Коефіцієнт завантаження печі  $\eta = (0,49 / 1) \cdot 100 \% = 49 \%$  – обираємо 1 піч.

Для повного гартування при температурі 840-860°С обираємо шахтну піч типу СШВ-8.8/9:

$\Pi_{\text{Г}} = 200\ 000$  кг;  $\Phi_{\text{д}} = 1808$  год;  $\tau_{\text{О}} = 0,5$  год; кількість деталей у садці – 40 штук.

$$M_{\text{О}} = 40 \cdot 6,9 = 276 \text{ кг}$$

$$P_{\text{О}} = M_{\text{О}} / \tau_{\text{О}} = 276 / 0,5 = 552 \text{ кг / год}$$

$$K_{\text{Р}} = 200\ 000 / (552 \cdot 1808) = 0,49$$

Коефіцієнт завантаження печі  $\eta = (0,49 / 1) \cdot 100 \% = 49 \%$  – обираємо 1 піч.



Для високого відпуску при температурі 600 °С обираємо шахтну піч типу СШО-6.12/7:

$P_{ВВ} = 200\ 000$  кг;  $\Phi_d = 1808$  годин;  $\tau_{ВВ} = 1,5$  години; кількість деталей у садці – 40 штук.

$$M_{ВВ} = 40 \cdot 6,9 = 276 \text{ кг}$$

$$P_{ВН} = M_{ВВ} / \tau_{ВВ} = 276 / 1,5 = 184 \text{ кг / год}$$

$$K_p = 200\ 000 / (184 \cdot 1808) = 0,61 \text{ – обираємо 1 піч}$$

$$\eta = (0,61 / 2) \cdot 100\% = 61 \%$$

Для низького відпуску після проведення СВЧ використовуємо ту ж піч, що і для проведення відпуску після гартування, тобто СШО-6.12/7.

$P_{НВ} = 200\ 000$  кг;  $\Phi_d = 1808$  годин;  $\tau_{ВВ} = 1,5$  години; кількість деталей у садці – 40 штук.

$$M_{ВВ} = 40 \cdot 6,9 = 276 \text{ кг}$$

$$P_{ВН} = M_{ВВ} / \tau_{ВВ} = 276 / 1,5 = 184 \text{ кг / год}$$

$$K_p = 200\ 000 / (184 \cdot 1808) = 0,61 \text{ – обираємо 1 піч}$$

$$\eta = (0,61 / 2) \cdot 100\% = 61 \%$$

Тобто нам вистачить 2 печі для відпусків.

Гартування СВЧ проводимо у установці ИЗВ-1-650 і беремо 1 установку для гартування.

Пристрій для гартування в печі СШВ-8.8/9 має розміри 730x580 мм. Деталі встановлюються у відведені для них отвори вертикально. На спеціальних пазах встановлюється 20x2 = 40 деталей. Відстань між виробами складає 25-30 мм. Маса однієї деталі «вал вихідний»  $g = 6,9$  кг. Маса садки валів  $G = 17 \cdot n = 6,9 \cdot 40 = 280$  (кг). Вага пристосування 100 кг. Маса садки всього 380 кг. Пристосування для укладання деталей у піч наведено на рисунку 5.10.

За результатами розрахунків для обробки 200 000 кг вихідних валів редукторів приймаємо для гартування і нормалізації 2 печі СШВ-8.8/9 для відпуску 2 печі СШО-6.12/7 та одну установку ТВЧ ИЗВ-1-650. Згідно результатів розрахунку заповнюємо зведену таблицю 5.1.

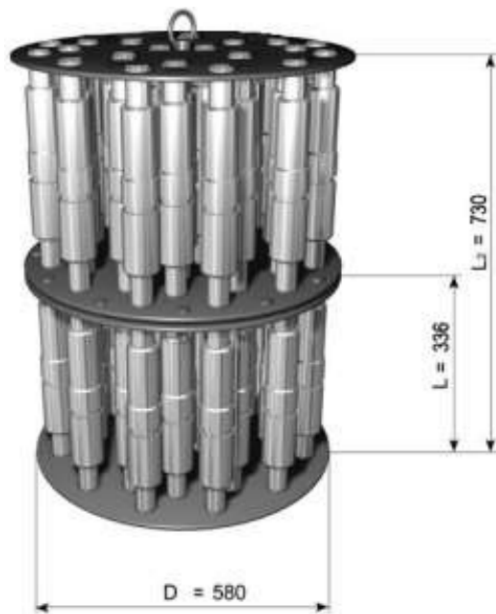


Рисунок 5.10 - Схематичне зображення пристосування для укладання деталей у піч: кількість деталей в пристосові 40 шт. Вага садки 380 кг

Таблиця 5.1 - Основне обладнання термічного цеху

№ п/п	Назва обладнання	Кількість
1	СШВ-8.8/9	(1+1) = 2
2	СШО-6.12/7	(1+1) = 2
3	ИЗВ-1-650	1

### 5.3 Проектування плану термічної дільниці (відділення, цеху) і вантажопотоків

Планування термічної дільниці - графічне розташування приміщень і розташованого обладнання, основного та допоміжного, приладів, підйомно-транспортного устаткування, комунікацій. Для складання планування необхідна відомість на всі види обладнання та інші засоби оснащення з габаритними розмірами, потужністю, місцями підключення. На кресленнях приміщень вказують ширину прольоту, крок колон, вікна, воріт, підвал. Розміщення печей один за одним здійснюється таким чином, щоб, з одного боку, забезпечити мінімальний шлях для транспортування заготовок, а, з іншого боку, зберегти необхідні з точки зору функціонування установок і дотримання правил охорони праці мінімальні проміжки між обладнанням. Таким чином, забезпечується

послідовне з'єднання основного і допоміжного обладнання - по етапах виконання термічних операцій [28].

Обладнання повинне бути розташоване таким чином, щоб до нього був відкритий вільний доступ для ремонту. Так як печі мають різні габарити, то їх необхідно розташувати в одну лінію. Гартівні баки маємо в безпосередній близькості від печей, таким чином, щоб робітникам потрібно було робити мінімальні рухи при перенесенні вироби для охолодження з печі в бак або у ванну. Для вихідного і вхідного контролю в термічному цеху передбачаються окремі приміщення, в яких розташовані необхідні прилади. Є також кімната майстра даної термічної ділянки. Для забезпечення охорони праці та культури виробництва передбачаються також побутові приміщення. До них відносяться роздягальні для зберігання спецодягу і чистого одягу, які поділяються душовими, а також кімната відпочинку персоналу, але вони знаходяться в цеху механічної обробки [28].

Побутові приміщення, склади продукції і сировини, проходи, площа виробничих приміщень, розраховану за укрупненими нормативами, розрахованих на окремі види термічного обладнання або знімання продукції з 1 м<sup>2</sup>. Проїзди і проходи складають 25-30 % від усіх виробничих площ. Площі підсумовують і розбивають за довжиною по сітці колон. Ширина прольотів 12, 15, 18, 24 м [28].

Проектована дільниця розміщена в одноповерховій будівлі прямокутної форми, це забезпечує ефективне відведення шкідливих газів і парів природним шляхом (аерацією). Основною несучою частиною даного цеху є колони, виготовлені із залізобетонних конструкцій. Зверху колон встановлюються і нерухомо кріпляться залізобетонні ферми, які мають трикутну форму. При проектуванні ділянки розраховують площу для розміщення обладнання, додаткових служб, проходів, проїздів [28].

Загальна площа розраховується за формулою:

$$S_{\text{заг}} = S_{\text{кор}} + S_{\text{дод}} + S_{\text{прох}} \quad (5.5)$$

де  $S_{\text{кор}}$  - корисна виробнича площа, необхідна для розміщення обладнання;

$S_{\text{доп}}$  - додаткова площа, необхідна для розміщення технологічного оснащення, деталей до і після термічної обробки, технологічних і допоміжних матеріалів для організації складів, місць для формування садок і інше.

$S_{\text{прох}}$  – площа проходів и проїздів.

При знаходженні  $S_{\text{заг}}$  користуються нормативами площі, необхідної для розміщення одиниці обладнання (печі, установки, агрегати),  $\text{м}^2$  на одиницю обладнання:

Для дільниці термообробки виробів, з використанням обладнання періодичної дії відводиться 25-30  $\text{м}^2$ ; товкальні, ролгангові, з висувним подом - 60-150  $\text{м}^2$ , потокові лінії 250-450  $\text{м}^2$ . Ковальсько-термічне відділення 80-120  $\text{м}^2$ , штампувальне 30-50  $\text{м}^2$ .

Площі для складування виробів і оснастки  $S_{\text{доп}}$  і площа проходів  $S_{\text{прох}}$  визначається як частина від  $S_{\text{заг}}$ :

$$S_{\text{доп}} \approx 0,3 S_{\text{заг}}$$

$$S_{\text{прох}} \approx 0,3 S_{\text{заг}}$$

$$S_{\text{заг}} = 5 \cdot 30 = 150 \text{ м}^2$$

$$S_{\text{доп}} = 0,3 \cdot 150 = 45 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{прох}} = 0,3 \cdot 150 = 45 \text{ м}^2$$

$$S_{\text{заг}} = 150 + 45 + 45 = 240 \text{ м}^2.$$

Для проектованої дільниці цеху вибираємо один проліт шириною 12 м. Довжина визначається за допомогою:

$$L = S_{\text{заг}} / B,$$

де  $B$  - ширина цеха.

$$L = 240 / 12 = 20 \text{ м}.$$

Застосовуємо сітку 18\*24.

Так як, для подальшої механічної обробки деталей, необхідно провести нормалізацію і термополіпшення (гартування і високий відпуск), то відразу за складом заготовок знаходяться дві печі СШВ-8.8/9 і одна піч СШО-6.12/7. Для обробки поверхні вала струмами високої частоти розташовують установку індукційну ИЗВ-1-650. Для проведення низького відпуску після гартування СВЧ

розміщують одну піч СШО-6.12/7. При подальшому просуванні розташовується ділянку ВТК, де перевіряють 5% продукції, і потім всю виготовлену продукцію відправляють на склад готової продукції. Розмір цехових воріт  $4 \times 4$ . Підлога виконані з цементу. Вона повинна мати тверде і міцне покриття на проїзній частині і на ділянках складування, не ковзати і добре очищатися від різних забруднень. Вікна шириною 2 м з одинарним склінням. Для поліпшення освітленості будівлі ферми забезпечені ліхтарями. Будівля термічного цеху виготовляється з вогнетривких матеріалів, відповідних I-II ступеня вогнестійкості. Дах дільниці виконано з пожаростійких і теплоізолюючих матеріалів з ліхтарем, що призначаються для додаткового освітлення ділянки і провітрювання його в теплу пору року.

На дільниці передбачають не менше двох виходів. План розробленої термічної дільниці наведено в додатку Б.

## Висновки

Для виготовлення валу двоступеневого горизонтального циліндричного редуктора РМ-400-нами був обраний матеріал – сталь 40Х, яка відноситься до поліпшуваних легуваних сталей. Поліпшувані (середньовуглецеві) сталі містять 0,3 - 0,5 % С і до 5 % різних легуючих елементів.

Для сталі 40Х нормалізація проводиться при температурі 850 - 870 °С з наступним охолодженням на повітрі. Час витримки при нормалізації 0,5 години. Проводимо далі термополіпшення – це гартування для сталі 40Х при температурі 840 - 860 °С з охолодженням у маслі (час витримки 1 - 1,5 години), і високий відпуск при температурі 600 °С з охолодженням у маслі.

Для отримання високої твердості і зносостійкості поверхневого шару та підвищення контактної витривалості проводиться поверхнєве гартування СВЧ на ділянках, які стикаються з підшипниками ковзання. Після поверхневого гартування СВЧ поверхневий шар обраної для виготовлення валу сталі 40Х має структуру дрібно-голчастого мартенситу. В серцевині зміна структури та зміцнення не відбувається, тому що нагрів був нижче за температуру  $A_{c1}$ . Обробка СВЧ забезпечує досить високу твердість поверхневого шару - сталь, що містить 0,4% С - 40Х - має твердість поверхні HRC 45-48).

Вали повинні мати високу твердість, міцність і зносостійкість поверхневого шару, підвищену контактну витривалість, а також в'язку, м'яку серцевину для того, щоб сприймати (гасити) знакозмінні напруги, які діють на деталі.

Для виконання цих вимог було проведено проектування маршрутної технології виготовлення деталі типу вал редуктора і підібрано відповідне обладнання.

## ВИСНОВКИ

1. В кваліфікаційній бакалаврській роботі було проаналізовано призначення та умови роботи тихохідного вихідного валу редуктора.

2. Було розглянуто причини виходу з ладу деталей типу «вал редуктора» та визначено технічні вимоги і основні технологічні та експлуатаційні властивості, вплив на них зовнішніх параметрів. Вали повинні мати високу твердість, міцність і зносостійкість поверхневого шару, підвищену контактну витривалість, а також в'язку, м'яку серцевину для того, щоб сприймати (гасити) знакозмінні напруги, які діють на деталі.

3. Для виготовлення валу двоступінчастого горизонтального циліндричного редуктора РМ-400 була обрана сталь 40Х, яка відноситься до поліпшуваних легуваних сталей. Поліпшувани (середньовуглецеві) сталі містять 0,3 - 0,5 % С і до 5 % різних легуючих елементів.

4. Для виконання цих вимог було проведено проектування маршрутної технології виготовлення деталі типу вал редуктора і підібрано відповідне обладнання для отримання і термічної обробки деталі - термополіпшення (гартування + високий відпуск) та запропонований один з перспективних процесів зміцнення деталі типу вал редуктора – обробка СВЧ.

5. Обробка СВЧ порівняно не дорогий метод підвищення зносостійкості деталі типу «вал редуктора», що дозволяє суттєво зменшити деформації під час нагрівання та охолодження, забезпечить властивості серцевини (має структуру, отриману шляхом гартування з високим відпуском - сорбіт) незалежно від властивостей поверхневого шару з досить високою твердістю (після гартування СВЧ – сталь, що містить 0,4 % С - 40Х - має твердість поверхні HRC 45-48).

6. При виборі обладнання проаналізована і розрахована його оптимальна кількість для проведення термічної обробки виробу, вибрано такі види обладнання, що мають більшу продуктивність і ефективність та забезпечують найкращі показники щодо якості термічної обробки, є максимально механізованими і автоматизованими.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пчелінцев В.О., Раб В.М. Пошкоджуваність основних деталей машин: Навчально-методичний посібник. Суми: Вид-во СумДУ, 2008. 137 с.
2. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин / Учебное пособие для студентов тех. спец. Вузов.- 8-е изд., перераб. и доп.. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. 496 с.
3. Карнаух С. Г., Таровик М. Г. Деталі машин : курс лекцій для студентів технічних спеціальностей. Краматорськ : ДДМА, 2017. 261 с.
4. Анохин А.А. Некоторые прогрессивные технологии восстановления качества поверхности деталей. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Харьков. 2003. № 5. С. 10-16.
5. Мохорт А.В., Чумак М.Г. Термічна обробка металів : навч. посіб. Київ: Либідь, 2002. 512 с.
6. Середа Б.П., Калініна Н. Є., Кругляк І. В. Поверхневе зміцнення матеріалів: монографія. Запоріжжя : Видавництво ЗДІА, 2004. 230 с.
7. Вибір матеріалу та зміцнюючої термічної обробки валу двоступеневого горизонтального редуктора / Сергієнко В. М., Говорун Т. П // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 20–23 квітня 2021 р.). Суми : Сумський державний університет, 2021. С. 79-80.
8. Руденко Л.Ф. Леговані сталі та сплави : навч. посіб. / Л. Ф. Руденко, Т. П. Говорун. Суми : Сумський державний університет, 2012. 171 с.
9. Патент «Зубчатый редуктор» / Беганский С. А.; Парфентьев А. С. / Патент № 2085798, кл. F16H57/04, 4933637/28, 1997.
10. Блескун В.Ф., Бережная О.А. Исследование наклонного участка кривой усталости для оценки долговечности работы зубчатых передач. *Матеріали 12-ої регіональної науково-методичної конференції*. Донецьк: ДонНТУ, 2010. С. 9-12.



11. Патент «Автомат для закалки валов» / Шитко Е. П.; Деминова Т. В.; Клешня И. Е. (Заявник: Кременчущкий автомобільний завод (UA) / Патент Російської Федерації № 2081183, кл. C21D1/10, C21D9 / 28, 1997.

12. Патент «Пособ восстановления изношенных посадочных поверхностей валов под подшипники скольжения» / Улитовский Б.А.; Шкрабак В.С.; Улитовский С.Б.; Шкрабак Р.В.; Полишко Г.Ю. / Патент № 2105650, кл. B23P6/00, 95117550/02, 1998.

13. Тимофеева Л.А., Федченко И.И., Тимофеев С.С. Повышение эксплуатационных свойств деталей транспортного назначения. Харьков: *Вісник СНУ ім. В. Даля*. № 4 (158). Частина 2. 2011. С. 26-31.

14. Патент «Способ формирования нанокристаллического поверхностного слоя в материале изделий из металлических сплавов» / Смыслов А.М.; Смылова М.К., Дыбленко Ю.М.; Селиванов К.С и др. / Патент № 2385968, кл. C23C14/48, C22F1/00, C22F3/00, B82B3/00, 2010.

15. Mohanad, M. K. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding / Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., & Kostyk, K. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. V. 2. №5(80). P. 45-49.

16. Zharin, A. Contact Potential Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A. Zharin // In book: *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology*. Ed. by B. Bushan. – Berlin: Springer, 2009. P. 687–720.

17. Зміцнення сталевих деталей за допомогою поверхневого індукційного загартування / Фроленкова О.В., Костецький Д.О. // Тези доповідей 54-ої наукової конференції молодих дослідників ОНПУ магістрантів «Сучасні інформаційні технології та телекомунікаційні мережі» // Одеса: ОНПУ, 2019, вип. 54 С. 64-67.

18. Лебедев В. Г. Снижение вероятности появления прижогов закалки при шлифовании закаленных сталей / Лебедев В. Г., Клименко Н.Н., Чумаченко Т.В., Фроленкова О.В. // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении. Материалы международной научно-технической конференции (16-18 мая 2019г.). Одеса: ОНПУ. 2019.

19. Bogoduhov S.I. Research of structural processes at highspeed sintering and thermal processing of powder steels with use of heating by currents of high frequency. S.I. Bogoduhov, E.S. Kozik, D.I. Churnosov. // *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka*. M.: Maschinostroenie – 2009. P. 395 - 400.

20. Мамаева Д., Зинин Ю., Ройзман Ю. Конструирование индукционной установки для нагрева ТВЧ-изоляции труб большого диаметра // *Силовая электроника*. 2018. № 4. С. 87-93.

21. Стали и сплавы. Марочник: Справ. изд./ В.Г. Сорокин и др.: Науч. ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. - М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 608 с.

22. Марочник сталей и сплавов/ Под общ. ред. А.С. Зубченко, 2-е издание доп. и испр. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.

23. Говорун Т. П. Лабораторний практикум з курсу «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство». Частина 2 «Матеріалознавство» / укладачі Т.П. Говорун, О.П. Гапонова, В.М. Раб, Н.А. Харченко. Суми: Сумський державний університет, 2011. 86 с.

24. Пчелінцев В.О. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із дисципліни «Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів» : у 2 частинах. Ч. 1. Випробування металів / укладачі: В.О. Пчелінцев, А. І. Дегула, Т. П. Говорун. Суми : Сумський державний університет, 2015. 53 с.

25. Пчелінцев, В.О., Дегула А.І. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : навч. посіб. / Суми: СумДУ, 2012. 247 с.

26. Марченко С. В., Гапонова, О. П., Говорун Т. П. , Харченко Н. А. Технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. Суми : СумДУ, 2016. 146 с.

27. Марченко С. В., Будник А. Ф., Юскаєв В. Б. Основи виробництва матеріалів та формоутворення об'єктів технологій : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2013. 232 с.

28. Будник А. Ф. Типове обладнання термічних цехів та дільниць : навч. посіб. Суми: СумДУ, 2008. 212 с.

29. Будник, А. Ф. Обладнання термічних цехів та дільниць. Атлас конструкцій: навч. посіб. / А.Ф. Будник, А.О. Томас. – Суми: СумДУ, 2014. – 112 с.

ДОДАТОК А

