

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи матеріалів, технологій та гостинності
Кафедра матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

**Розробка технології термічної обробки
втулки зі сталі AISI 440C /
Development of heat treatment technology
for AISI 440C steel bushings**

132 Матеріалознавство

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Індустріальний інжиніринг і менеджмент

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ПМ)з-41

Кривонюк Андрій Васильович

(підпис)

Керівник:

д.т.н., професор

Єфременко Василь Георгійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Гусачук Дмитро Анатолійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“___” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

_____ (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____

керівник роботи _____,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ року № _____

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
«___» _____ 202_ р.

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «__» _____ 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка

Здобувач вищої освіти _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кривонюк А. В. Назва теми: «Розробка технології термічної обробки втулки зі сталі AISI 440C»

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури, додатків.

У кваліфікаційній роботі розроблено технологічний процес, що застосовується для термічної обробки втулки з високовуглецевої сталі AISI 440C.

Основні рішення, прийняті в роботі направлені на забезпечення комплексу необхідних властивостей досліджуваної сталі та технологічного процесу, а також дослідження структури матеріалу втулки, аналізу значень твердості та підбору коректного технологічного процесу.

Загальний обсяг роботи: 49 сторінок, 4 розділи та висновки, 16 рисунків, 5 таблиць, 27 літературних джерел.

Ключові слова: слась високовуглецева, втулка насоса, технологічний процес, термічна обробка.

					БР 5526.00.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка технології термічної обробки втулки зі сталі AISI 440C/ Development of heat treatment technology for AISI 440C steel bushings	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розробив	Кривонюк						3	49	
Перевірив	Єфременко								
						ЛНТУ, каф.матеріалознавства, гр. ПМ(ПМ)3-41			
Н. Контр	Мисковець								
Затв.	Імбірович								

ABSTRACTS

Kryvonyuk, A. V. Thesis Title: “Development of a Heat Treatment Process for AISI 440C Steel Bushings”

Bachelor’s Thesis in the “Materials Science” Educational Program, Major 132: Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor’s thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a bibliography, and appendices.

The thesis develops a technological process for the heat treatment of AISI 440C high-carbon steel bushings.

The main solutions adopted in the thesis are aimed at ensuring the set of necessary properties of the studied steel and the technological process, as well as investigating the structure of the bushing material, analyzing hardness values, and selecting the correct technological process.

Total volume of the thesis: 49 pages, 4 chapters and conclusions, 16 figures, 6 tables, 27 references.

Keywords: high-carbon steel, pump bushing, manufacturing process, heat treatment.

					БП 5526.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	8
1.1. Принцип роботи відцентрового насоса	8
1.2. Аналіз механізмів зношування втулки	10
1.3. Вимоги до матеріалу втулки	13
1.4. Порівняльна характеристика матеріалів втулок	15
1.5. Висновки та постановка завдань	17
РОЗДІЛ 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	20
2.1. Аналіз конструкції деталі та технологічних вимог до втулки	20
2.2. Вибір матеріалу деталі та аналіз його технологічних властивостей	21
2.3. Аналіз технологічних процесів термічної обробки деталей типу втулка	22
РОЗДІЛ 3 ПЛАНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТО.....	25
3.1. Обґрунтування режиму гартування	25
3.2. Обґрунтування режиму відпуску та доцільності кріогенної обробки	29
3.3. Розроблення технологічного маршруту термічної обробки	31
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ	37
4.1. Прогнозування структурного стану та властивостей після термічної обробки.....	37
4.2. Структурний стан сталі AISI 440C	38
4.3. Аналіз механічних властивостей сталі AISI 440C	42
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Постійне зростання вимог до надійності, довговічності та експлуатаційної стабільності деталей, що працюють в механізмах та агрегатах сучасного машинобудування, приладобудування, медичної галузі та енергетичного сектора в умовах підвищених контактних навантажень, тертя, циклічних напружень та впливу корозійно-активних середовищ вимагає використання відповідних матеріалів та технологій до якості виробів і деталей. Особливо актуальним є забезпечення високих експлуатаційних характеристик деталей типу втулок, які широко застосовуються у вузлах ковзання, напрямних механізмах, насосному обладнанні, прецизійних приводах, клапанних системах та інших відповідальних конструкціях [1]. Втулки належать до деталей, робоча надійність яких значною мірою визначається твердістю поверхневого шару, зносостійкістю, контактною витривалістю, розмірною стабільністю та корозійною стійкістю матеріалу. Передчасний знос, утворення задирів, контактне викришування та корозійне пошкодження поверхні можуть призводити до зниження ресурсу всього механізму, зростання витрат на ремонт та зменшення загальної ефективності експлуатації обладнання.

Одним із перспективних матеріалів для виготовлення деталей такого типу є сталь AISI 440C – високовуглецева корозійностійка мартенситна сталь, яка характеризується високою твердістю, значною зносостійкістю, доброю контактною міцністю та достатньою стійкістю до корозійного руйнування [2]. Завдяки високому вмісту хрому та вуглецю дана сталь після термічної обробки здатна формувати високоміцну мартенситно-карбідну структуру з твердістю до 58...62 HRC, що забезпечує її широке застосування для підшипникових елементів, клапанних деталей, медичного інструменту та прецизійних механізмів.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Разом із тим, отримання оптимального комплексу експлуатаційних властивостей деталей зі сталі AISI 440C значною мірою залежить від правильно обраних параметрів термічної обробки – температури аустенізації, витримки, швидкості охолодження, режимів відпуску та можливого застосування додаткових операцій стабілізації структури. Невідповідність технологічних параметрів може призводити до утворення надлишкового залишкового аустеніту, карбідної неоднорідності, зниження твердості, втрати розмірної стабільності та погіршення трибологічних характеристик [3].

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

1.1. Принцип роботи відцентрового насоса

Відцентрові насоси належать до найбільш поширених типів динамічних насосів, які широко застосовуються в системах водопостачання, енергетичному обладнанні, хімічній промисловості, нафтогазовому секторі, харчовому виробництві, системах охолодження та комунальному господарстві. Їх широке використання обумовлене відносною простотою конструкції, високою продуктивністю, безперервністю подачі робочого середовища, надійністю експлуатації та можливістю роботи в широкому діапазоні тисків і витрат [4].

Основними конструктивними елементами відцентрового насоса є робоче колесо, вал, корпус насоса, напрямний апарат або спіральна камера, ущільнювальний вузол, підшипникові опори та допоміжні елементи кріплення (рисунк 1.1). Робоче колесо є основним рухомим елементом насоса, тоді як корпус забезпечує формування потоку рідини, її направлення та перетворення кінетичної енергії в енергію тиску [5].

Принцип роботи відцентрового насоса базується на передачі механічної енергії від привідного двигуна до рідини за рахунок дії відцентрових сил. Перед початком роботи проточна частина насоса повинна бути заповнена робочою рідиною, оскільки більшість класичних відцентрових насосів не є самовсмоктувальними. Після запуску привід передає обертальний момент на вал, який через жорстке з'єднання приводить у рух робоче колесо.

Під час обертання робочого колеса рідина, що знаходиться між його лопатями, починає рухатися разом із ним і під дією відцентрових сил переміщується від центральної частини до периферії. При цьому рідина набуває як кінетичної енергії, так і енергії тиску. У центральній зоні робочого

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

колеса формується область зниженого тиску, завдяки чому створюється безперервне всмоктування нових порцій рідини через всмоктувальний патрубок.

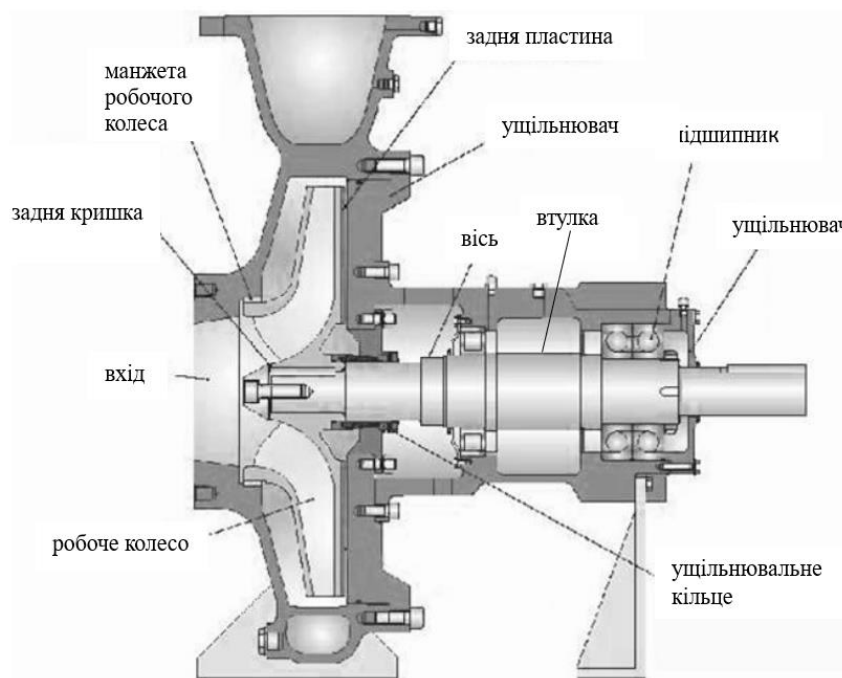


Рисунок 1.1 – Схема розташування елементів відцентрового насоса

Після виходу з робочого колеса потік надходить у спіральну камеру або дифузор, де внаслідок поступового збільшення площі проточного каналу швидкість руху рідини зменшується, а значна частина кінетичної енергії перетворюється на енергію статичного тиску. Далі рідина під необхідним напором подається через нагнітальний патрубок у трубопровідну систему до споживача.

Безперервне обертання робочого колеса забезпечує постійний цикл всмоктування, прискорення та нагнітання рідини, що обумовлює рівномірність подачі та стабільність роботи насоса.

Важливою особливістю роботи відцентрових насосів є дія не лише гідродинамічних, але й значних механічних навантажень на елементи ротора,

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зокрема вал, підшипникові вузли, ущільнення та захисні втулки. У процесі експлуатації ці елементи працюють в умовах:

- безперервного обертального руху з частотою 1450...3000 об/хв;
- радіальних та осьових навантажень, що виникають внаслідок нерівномірного розподілу тиску;
- вібраційних впливів;
- локального нагріву в зонах тертя;
- дії корозійно-активного робочого середовища;
- можливого абразивного впливу твердих частинок.

Особливо відповідальним елементом конструкції є втулка вала, яка встановлюється в зоні контакту з ущільнювальними елементами та підшипниковими опорами [6]. Саме втулка сприймає значну частину контактних і фрикційних навантажень, забезпечує захист поверхні вала від зношування та визначає довговічність роботи насосного агрегату. Тому до матеріалу втулки висуваються підвищені вимоги щодо твердості, зносостійкості, контактної витривалості, корозійної стійкості та розмірної стабільності, що обґрунтовує доцільність застосування сталі AISI 440C для виготовлення даної деталі.

1.2. Аналіз механізмів зношування втулки

Втулка вала відцентрового насоса належить до відповідальних деталей роторної системи, які безпосередньо впливають на надійність, довговічність та ефективність роботи насосного агрегату. Основним функціональним призначенням втулки є захист поверхні вала від зношування, забезпечення стабільного контакту з ущільнювальними елементами, компенсація локальних навантажень та підтримання точності взаємного розташування рухомих і нерухомих елементів конструкції [1, 7].

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі експлуатації втулка працює в умовах комплексного впливу механічних, теплових, трибологічних та корозійних факторів, які можуть призводити до поступового руйнування поверхневого шару, втрати геометричної точності та передчасного виходу деталі з експлуатації [8].

Під час роботи насоса втулка контактує з елементами сальникового або торцевого ущільнення, підшипниковими поверхнями та допоміжними опорними елементами. У зонах локального контакту виникають значні питомі навантаження, величина яких залежить від конструкції ущільнювального вузла, частоти обертання ротора, сили затягування ущільнення та режиму роботи агрегату.

Для промислових відцентрових насосів контактний тиск p у зоні втулки може становити 5...40 МПа, а при пускових режимах або порушенні центрування ротора локально досягати максимально 50...60 МПа. Внаслідок багатоциклового характеру навантаження в поверхневих шарах можуть накопичуватися залишкові напруження, які з часом призводять до зародження мікротріщин та контактного викришування [9].

У процесі перекачування рідини на робоче колесо діють гідродинамічні сили, які через вал передаються на втулку. При цьому виникають:

- радіальні сили, обумовлені нерівномірністю поля тиску в спіральній камері;
- осьові сили, спричинені перепадом тиску між вхідною та вихідною зонами робочого колеса;
- динамічні навантаження, пов'язані з дисбалансом ротора.

Для насосів середньої продуктивності радіальні сили F_r можуть досягати 200...1500 Н, а осьові – F_a 500...3000 Н. Періодична дія таких навантажень викликає циклічне напруження поверхневого шару втулки та може сприяти розвитку втомного руйнування. Одним із визначальних факторів довговічності втулки є тертя в зоні контакту з ущільнювальними елементами. Локальне нагрівання поверхні може досягати 80...150 °С, що прискорює зношування та

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структурну деградацію поверхневого шару. Унаслідок нерівномірності потоку, гідравлічних ударів, дисбалансу ротора та неточності монтажу втулка працює в умовах постійних вібрацій [10]. Типові частоти вібрації насосного обладнання f можуть досягати 10...300 Гц. Вібраційний вплив призводить до:

- мікропереміщень у зоні контакту;
- фретинг-зношування;
- порушення мастильного шару;
- прискореного руйнування поверхні.

Особливо небезпечним є поєднання корозії та циклічного тертя, що суттєво скорочує ресурс деталі (рисунок 1.2.).



а



б

Рисунок 1.2 – Ерозійно-корозійні руйнування

Втулки відцентрових насосів часто працюють у водних та слабкоагресивних середовищах, які можуть містити:

- розчинений кисень;
- хлориди;
- сульфати;
- тверді абразивні частинки;
- продукти корозії.

У таких умовах реалізуються механізми пітингової корозії, щілинної корозії, ерозійно-корозійного руйнування, корозійно-механічного зношування. Особливо небезпечним є поєднання корозії та циклічного тертя, що суттєво

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

скорочує ресурс деталі. У випадку перекачування рідин із механічними домішками (пісок, окалини, тверді суспензії) поверхня втулки піддається дії абразивних частинок.

1.3. Вимоги до матеріалу втулки

Втулки вала насосного обладнання належать до деталей тертя, які працюють в умовах комплексного механічного, теплового, корозійного та трибологічного навантаження (рисунок 1.3). Експлуатаційна надійність таких деталей значною мірою визначається правильним вибором конструкційного матеріалу, оскільки саме матеріал формує ресурс роботи вузла, стабільність геометричних параметрів, ефективність ущільнення та загальну довговічність насосного агрегату.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд втулки

Вибір матеріалу втулки повинен здійснюватися з урахуванням режиму роботи насоса, частоти обертання вала, питомих контактних навантажень, температури робочого середовища, хімічної активності рідини, наявності абразивних домішок та вимог до ремонтпридатності обладнання [6]. З урахуванням розглянутих умов експлуатації матеріал втулки повинен забезпечувати:

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- твердість не менше 55...60 HRC;
- високу контактну витривалість;
- опір абразивному зношуванню;
- корозійну стійкість у водних середовищах;
- стабільність геометричних розмірів;
- низьку схильність до задирутворення;
- можливість високоточної механічної обробки.

Втулка повинна забезпечувати мінімальну інтенсивність лінійного зношування протягом тривалого ресурсу експлуатації. Особливо важливими є стійкість до абразивного зношування; стійкість до адгезійного зношування; контактна витривалість; опір фретинг-зношуванню.

Для насосного обладнання допустимий лінійний знос, як правило, не повинен перевищувати 0,01...0,05 мм за 1000 год.

Оскільки втулки часто працюють у контакті з водою, емульсіями, слабкими кислотами або лужними середовищами, матеріал повинен бути стійким до: пітингової корозії; щілинної корозії; ерозійно-корозійного руйнування; корозійно-втомного руйнування. Особливо критичною є присутність хлоридів, які активно руйнують низьколеговані сталі [12].

Під час циклічного навантаження поверхневий шар втулки не повинен руйнуватися внаслідок контактної втоми, тому матеріал повинен мати високу границю текучості; достатню ударну в'язкість; низьку схильність до викришування.

У сучасному насособудуванні для виготовлення втулок використовуються металеві, композиційні та керамічні матеріали. Саме таким вимогам відповідають різні матеріали і у тому числі сталь AISI 440C, яка після правильно підібраної термічної обробки формує високоміцну мартенситно-карбідну структуру з твердістю 58...62 HRC, високою контактною міцністю та достатньою корозійною стійкістю.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.4. Порівняльна характеристика матеріалів втулок

Традиційно для виготовлення втулок широко використовуються олов'янисті та алюмінієві бронзи, зокрема CuSn12 та CuAl10Fe5Ni5. Дані матеріали характеризуються добрими антифрикційними властивостями, низьким коефіцієнтом тертя, високою демпфувальною здатністю та доброю оброблюваністю. Їх твердість знаходиться в межах 80...250 HB, що є недостатнім для роботи у високооберткових вузлах з підвищеним абразивним навантаженням. Крім того, бронзи характеризуються обмеженою зносостійкістю при роботі в середовищах, що містять тверді механічні домішки [13, 14].

Для роботи в корозійно-активних середовищах часто застосовують аустенітні сталі, зокрема AISI304 та AISI316L. Основною перевагою цих матеріалів є висока корозійна стійкість, добра пластичність та висока технологічність. Твердість аустенітних сталей не перевищує 180...250 HB, що суттєво обмежує їх використання в умовах інтенсивного тертя та контактного навантаження. При роботі в умовах сухого тертя такі сталі можуть проявляти схильність до задиротворення та прискореного поверхневого руйнування [14].

Більш перспективними для насосного обладнання є мартенситні корозійностійкі сталі (сталь AISI 420), які після термічної обробки забезпечують твердість на рівні 48...54 HRC та достатню корозійну стійкість. Для високошвидкісних насосних агрегатів її контактна витривалість та зносостійкість можуть бути недостатніми. Сталь AISI 431 характеризується вищою в'язкістю та міцністю, її твердість після термічної обробки рідко перевищує 45...50 HRC, що також обмежує можливість її застосування в умовах інтенсивного абразивного зношування [2, 15].

Серед вітчизняних та європейських аналогів сталь 95X18 виступає хорошим претендентом для виготовлення втулок. За хімічним складом і

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивостями вона близька до сталі AISI 440C. Після термічної обробки сталь забезпечує твердість 58...61 HRC, високу зносостійкість та добру контактну міцність. Вона характеризується підвищеною чутливістю до режимів термічної обробки та може проявляти карбідну неоднорідність, що негативно впливає на стабільність властивостей.

Для спеціалізованих насосних систем використовують керамічні матеріали на основі Si_3N_4 та Al_2O_3 . Вони мають високі твердість, корозійну стійкість та низький коефіцієнт тертя. Разом з тим кераміка характеризується крихкістю, високою вартістю та складністю механічної обробки, що обмежує її широке використання у загальному машинобудуванні [16].

Для допоміжних вузлів застосовуються полімерні композиційні матеріали. Такі матеріали мають низький коефіцієнт тертя та високу хімічну стійкість, проте їх жорсткість, теплостійкість та контактна міцність є недостатніми для роботи у високонавантажених насосних вузлах.

Серед розглянутих матеріалів саме сталь AISI 440C найбільш повно відповідає умовам експлуатації втулки вала відцентрового насоса. Завдяки високому вмісту вуглецю та хрому після термічної обробки в її структурі формується високоміцна мартенситна матриця, зміцнена дисперсними карбідами хрому, високу контактну міцність, стійкість до абразивного зношування та достатню корозійну стійкість у водних і слабоагресивних середовищах [17].

Для виготовлення втулки вала відцентрового насоса доцільним є застосування сталі AISI 440C як матеріалу, що забезпечує оптимальне поєднання механічних, трибологічних, корозійних та технологічних властивостей.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.5. Висновки та постановка завдань

Відцентрові насоси широко використовуються у системах водопостачання, хімічному, енергетичному, харчовому та машинобудівному обладнанні, де до деталей роторної групи висуваються підвищені вимоги щодо надійності, довговічності та стабільності експлуатаційних характеристик.

Втулка вала є відповідальним конструктивним елементом насосного агрегату. Вона забезпечує захист робочої поверхні вала від зношування, стабілізацію положення ротора, точність взаємного розташування рухомих елементів, а також ефективну роботу ущільнювальних вузлів. Основними механізмами руйнування поверхні є абразивне, адгезійне, корозійно-механічне та втомне зношування.

Проведений аналіз показав, що матеріал втулки повинен забезпечувати високу твердість робочої поверхні; підвищену контактну витривалість; стійкість до абразивного та адгезійного зношування; корозійну стійкість у водних та слабоагресивних середовищах; розмірну стабільність; та можливість високоточної механічної обробки.

Виконано порівняльний аналіз матеріалів, які використовуються для виготовлення втулок насосного обладнання, зокрема бронз CuSn12 і CuAl10Fe5Ni5, аустенітних сталей AISI 304 і AISI 316L, мартенситних сталей AISI 420, AISI 431, 95X18, а також керамічних та полімерних композиційних матеріалів.

На основі проведеного аналізу встановлено, що сталь AISI 440C найбільш повно відповідає умовам експлуатації втулки вала відцентрового насоса. Експлуатаційні властивості сталі AISI 440C суттєво залежать від параметрів термічної обробки, зокрема температури аустенітизації, часу витримки, умов охолодження, режимів відпуску та стабілізації структури. Недостатньо обґрунтований вибір технологічних параметрів може призводити

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

до формування надлишкового залишкового аустеніту, структурної неоднорідності, підвищених залишкових напружень та зниження зносостійкості деталі. Тому актуальним є розроблення раціональної технології термічної обробки втулки вала відцентрового насоса зі сталі AISI 440C, що забезпечить формування оптимальної структури та необхідного комплексу експлуатаційних властивостей.

Розроблення раціональної технології термічної обробки втулки зі сталі AISI 440C є актуальним завданням, спрямованим на забезпечення необхідного комплексу механічних і експлуатаційних властивостей деталі.

Мета бакалаврської роботи полягає у розробці технології термічної обробки втулки, виготовленої зі сталі AISI 440C, яка забезпечує формування оптимальної структури та необхідного комплексу механічних, трибологічних і експлуатаційних властивостей деталі відповідно до умов її роботи. Об'єкт дослідження – процеси структуроутворення та формування властивостей сталі AISI 440C під час термічної обробки. Предмет дослідження – закономірності впливу параметрів термічної обробки на мікроструктуру, фазовий склад, твердість, зносостійкість та розмірну стабільність втулки зі сталі AISI 440C.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

а) провести аналіз сучасних літературних джерел щодо властивостей, структури, сфер застосування та особливостей термічної обробки сталі AISI 440C;

б) проаналізувати умови експлуатації втулок, основні механізми їх зношування та вимоги до експлуатаційних характеристик;

в) проаналізувати вплив хімічного складу сталі AISI 440C на формування фазового складу та структурних складових після термічної обробки;

г) обґрунтувати вибір раціональних режимів нагріву під гартування, температури аустенітизації, середовища охолодження та параметрів відпуску;

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

д) розробити технологічний процес термічної обробки втулки зі сталі AISI 440C;

е) визначити прогнозований фазовий склад та структурний стан матеріалу після запропонованої технології;

є) оцінити очікувані показники твердості, зносостійкості, контактної міцності та розмірної стабільності після термічної обробки та оцінити можливість практичного впровадження.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Аналіз конструкції деталі та технологічних вимог до втулки

Втулка вала відцентрового насоса є відповідальною деталлю роторного вузла, яка встановлюється на валу в зоні контакту з ущільненням або опорно-напрямними елементами. Її основне призначення полягає у захисті поверхні вала від зношування, забезпеченні стабільності посадки, збереженні точності обертання та підвищенні ремонтпридатності насосного агрегату [16].

За принципом роботи втулка близька до елементів підшипників ковзання, у яких тертя відбувається при ковзанні спряжених поверхонь. Підшипник ковзання визначається як опора механізму або машини, у якій тертя відбувається при ковзанні спряжених поверхонь; такі опори застосовують для валів з високими швидкостями обертання та підвищеними вимогами до точності монтажу. Нормальна робота підшипників ковзання можлива лише за умови розділення поверхонь вала і втулки шаром мастила достатньої товщини.

Для досліджуваної втулки доцільно прийняти такі орієнтовні конструктивні параметри:

- зовнішній діаметр втулки 32мм;
- довжина 55 мм;
- товщина стінки 6 мм;
- шорсткість робочої поверхні R_a 0,32...0,63 мкм, що необхідна для роботи в умовах тертя ковзання;
- твердість після ТО 58...62 HRC – потрібна для підвищеної зносостійкості.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

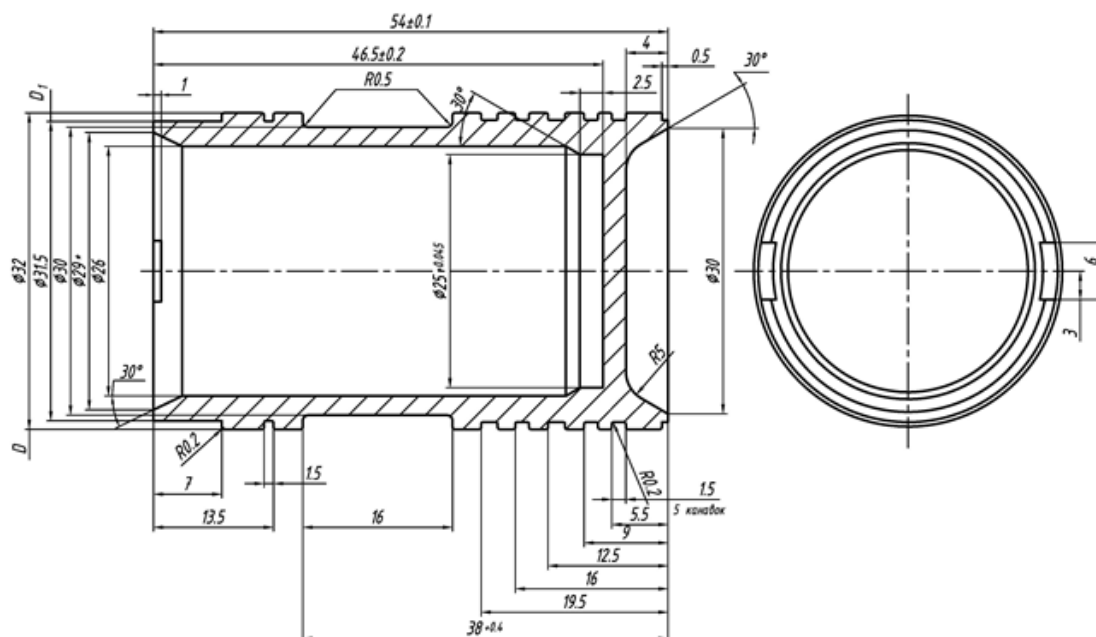


Рисунок 2.1 – Зображення втулки

До основних технологічних вимог належать висока твердість, стійкість до абразивного та адгезійного зношування, корозійна стійкість у водному середовищі, мінімальні деформації після термічної обробки та можливість фінішного шліфування [18].

2.2. Вибір матеріалу деталі та аналіз його технологічних властивостей

Для виготовлення втулки обрано сталь AISI 440C – високовуглецеву хромисту мартенситну корозійностійку сталь. Вона застосовується для деталей, яким необхідні висока твердість, зносостійкість і помірна корозійна стійкість. За даними технічних довідників, сталь AISI 440C після термічної обробки здатна досягати твердості близько 60 HRC і використовується для підшипникових деталей, клапанних елементів і високонавантажених точних виробів [19].

Типовий хімічний склад сталі AISI 440C наведено в таблиці 2.1.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1

Елемент	C	Cr	Mn	Si	Mo	Fe
Вміст, %	0,95-1,20	16, 0-18,	до 1,0	до 1,0	до 0,75	основа

Високий вміст вуглецю забезпечує формування мартенситної структури високої твердості, а також утворення карбідів хрому, які підвищують зносостійкість. Хром у кількості 16...18 % забезпечує корозійну стійкість завдяки утворенню пасивної оксидної плівки. Разом з тим частина хрому зв'язується у карбідах, тому режим термічної обробки має бути підібраний так, щоб забезпечити баланс між твердістю, корозійною стійкістю і розмірною стабільністю.

2.3. Аналіз технологічних процесів термічної обробки деталей типу втулка

Технологічні процеси термічної обробки деталей машин визначаються хімічним складом матеріалу, конструктивними особливостями виробу, габаритними розмірами, умовами експлуатації та необхідним комплексом механічних, фізико-хімічних і трибологічних властивостей [18]. Для деталей типу втулка, які працюють в умовах тертя ковзання, циклічного навантаження, вібраційного впливу та контакту з агресивними середовищами, особливого значення набуває забезпечення високої поверхневої твердості, контактної витривалості, розмірної стабільності та корозійної стійкості.

Термічна обробка являє собою сукупність операцій нагрівання, витримки та охолодження металевих сплавів, спрямованих на керування зміною його структурно-фазового стану без зміни хімічного складу (рисунки 2.1). У результаті таких перетворень змінюються механічні властивості, внутрішній напружений стан, дисперсність структурних складових та експлуатаційна надійність матеріалу.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для деталей типу втулка найбільш поширеними видами термічної обробки є:

- відпал;
- нормалізація;
- гартування;
- відпуск;
- кріогенна обробка;
- вакуумна термічна обробка;
- термомеханічна та хіміко-термічна обробка.



Рисунок 2.1 – Схема можливих процесів ТО

Вибір конкретного технологічного маршруту визначається маркою сталі, вимогами до твердості та геометричної точності деталі.

Гартування є основною зміцнювальною операцією для мартенситних корозійностійких сталей (таблиця 2.1). Метою гартування є формування пересиченої мартенситної структури з високою твердістю та міцністю [18, 20].

Для сталі AISI440C технічні довідники рекомендують нагрівання до 1010...1070 °C з охолодженням у маслі, або на повітрі. Внаслідок

ауспенітїзації частина карбїдїв хрому розчиняється, а після швидкого охолодження формується мартенситна матриця з залишковим ауспенітом та карбїдами хрому. Після такого режиму твердість може досягати близько 60 HRC.

Таблиця 2.1 – Режими обробки сталі AISI 440C

Вид обробки	Мета	Температура	Основний ефект
Відпал	Зниження твердості	850-900 °C	Підвищення пластичності
Гартування	Формування мартенситу	1010-1070 °C	Підвищення твердості
Відпуск	Зняття напружень	150-200 °C	Стабілізація структури
Кріообробка	Зменшення кількості ауспеніту	-70 до -196 °C	Розмірна стабільність
Вакуумна ТО	Підвищення точності	1000-1050 °C	Мінімальні деформації

Особливістю високо-вуглецевих мартенситних сталей є наявність залишкового ауспеніту після гартування, який може негативно впливати на розмірну стабільність деталей.

Кріогенна обробка полягає в охолодженні загартованої сталі до температур мінус 70 °C...мінус 196 °C, що забезпечує додаткове перетворення залишкового ауспеніту в мартенсит.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ПЛАНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТО

3.1. Обґрунтування режиму гартування

Гартування є основною операцією термічної обробки сталі AISI 440C, оскільки саме на цьому етапі формується високоміцна мартенситна структура. Для гартування сталі 440C рекомендується нагрівання до 1010...1066 °C з подальшим охолодженням у теплому маслі або на повітрі; також зазначено, що перегрівання є небажаним, оскільки може перешкоджати отриманню максимальної твердості.

Для втулки вала відцентрового насоса доцільно прийняти такий режим гартування:

- попередній підігрів – 750...800 °C;
- температура аустенізації – 1040 °C;
- витримка – 20...40 хв.

Витримка необхідна для повного прогріву деталі по всьому перерізу, часткового розчинення карбідів хрому, насичення аустеніту вуглецем та формування однорідної дрібнозернистої аустенітної структури [20]. Після витримки виконується охолодження. Середовище охолодження – тепле масло або повітря. Очікувана структура – мартенсит, карбіди, залишковий аустеніт [21].

Температура 1040 °C є раціональною, оскільки забезпечує достатнє розчинення карбідів і насичення аустеніту вуглецем без надмірного росту зерна. Для втулки небажано застосовувати воду як охолоджувальне середовище, оскільки різке охолодження може спричинити високі внутрішні напруження, деформацію або утворення тріщин.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рисунку 3.1 відображено графік термічної обробки, яка включає описаний вище режим, та забезпечує формування мартенсито-карбідної структури з мінімальними деформаціями.



Рисунок 3.1 – Температурно-часовий режим гартування втулки вала відцентрового насоса зі сталі AISI 440C

Для проведення гартування рекомендовано вибір вакуумної печі (рисунок 3.2), так як її можна застосовувати для відпалу та інших видів робіт [22, 23].

Одним із ключових факторів забезпечення стабільності структурно-фазових перетворень під час термічної обробки високолегованих мартенситних корозійностійких сталей є правильний вибір термічного обладнання. Для реалізації процесу гартування втулки вала відцентрового насоса зі сталі AISI 440C найбільш доцільним є застосування промислової вакуумної печі, оскільки саме цей тип обладнання дозволяє забезпечити високу точність температурного режиму, стабільність процесу нагрівання та мінімальний вплив зовнішнього середовища на поверхню деталі.

Промислова вакуумна піч являє собою високотехнологічну систему термічної обробки, в якій нагрівання деталей здійснюється у герметичній

робочій камері за умов зниженого тиску. Вакуумне середовище формується за допомогою багатоступеневої насосної системи, яка забезпечує розрідження в межах $1,3 \times 10^{-3}$ Па. Такий рівень вакууму практично повністю виключає присутність кисню, водяної пари та інших активних газів у робочому просторі, що запобігає окисненню поверхні, зневуглецюванню та небажаним хімічним реакціям під час нагрівання сталі до температур аустенітизації [24].



Рисунок 3.2. – Вакуумна піч для гартування

Використання вакуумної печі є особливо актуальним для сталі AISI 440C, яка містить підвищену кількість хрому та вуглецю і є чутливою до поверхневого окиснення при нагріванні в атмосферних печах. Наявність оксидних плівок або зон зневуглецювання може суттєво погіршувати твердість, зносостійкість та корозійну стійкість готової деталі, тому безокиснювальне нагрівання є технологічно обґрунтованим. Сучасні вакуумні печі оснащуються програмованими системами керування на базі PLC-контролерів, які дозволяють реалізувати складні багатоступеневі

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурно-часові цикли, автоматично регулювати швидкість нагрівання, тривалість витримки, вакуумування та охолодження. Це дає можливість забезпечити високу повторюваність результатів і документування технологічних параметрів, що є важливим для деталей відповідального призначення. Нагрівання у вакуумних печах здійснюється за допомогою електронагрівальних елементів, виготовлених переважно з графіту або молібдену. Дані матеріали характеризуються високою жаростійкістю, хімічною інертністю та здатністю забезпечувати рівномірний розподіл температури по всьому об'єму робочої камери. Рівномірність температурного поля зазвичай становить 3...5 °С, що є достатнім для однорідного прогріву тонкостінних деталей типу втулка. Конструкція сучасних вакуумних печей також передбачає наявність системи газового загартування, яка дозволяє проводити охолодження деталей без контакту з рідким середовищем. Як охолоджувальне середовище використовують азот, аргон або гелій.

Для втулки вала відцентрового насоса використання газового охолодження є більш доцільним порівняно з традиційним гартуванням у маслі, оскільки дозволяє:

- зменшити внутрішні термічні напруження;
- мінімізувати овальність і короблення тонкостінної деталі;
- виключити забруднення поверхні залишками гартівного масла;
- підвищити розмірну стабільність після термічної обробки;
- скоротити обсяг очистки після термічної обробки.

Використання промислової вакуумної печі для гартування втулки зі сталі AISI 440C є технічно та металургійно обґрунтованим рішенням, що дозволяє забезпечити формування однорідної мартенситно-карбідної структури, високу твердість, чистоту поверхні та стабільність геометричних параметрів готової деталі.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Обґрунтування режиму відпуску та доцільності кріогенної обробки

Після гартування сталь AISI 440C має високу твердість, але також характеризується підвищеними залишковими напруженнями. Тому обов'язковою операцією є низький відпуск, який знижує крихкість, стабілізує структуру і частково знімає напруження.

Для обраної сталі у рекомендовано відпуск у діапазоні приблизно 148...177 °C, що дає змогу зберегти твердість близько 60 HRC. Водночас слід уникати відпуску в інтервалі 425...565 °C, оскільки він може знижувати корозійну стійкість і ударну в'язкість сталі.

Для втулки вала насоса доцільним є такий режим:

- температура відпуску – 160...180 °C;
- тривалість відпуску – 1,5...2 год;
- Кількість циклів відпалу – 1...2.

Охолодження після відпуску на повітрі, а очікувана твердість – 58...62 HRC.

Для деталей, до яких висуваються підвищені вимоги щодо розмірної стабільності, доцільним є подвійний відпуск (рисунк 3.3). Це пояснюється тим, що повторний відпуск сприяє додатковій стабілізації мартенситної структури та зменшенню залишкових напружень.

Для сталі AISI 440C характерна підвищена кількість залишкового аустеніту після гартування. Його наявність може бути небажаною для втулки, оскільки під час експлуатації залишковий аустеніт може поступово перетворюватися на мартенсит, викликаючи зміну розмірів деталі.

Після гартування в структурі сталі AISI 440C може зберігатися до 10...20 % залишкового аустеніту, що негативно впливає на розмірну стабільність деталі. Для його зменшення доцільно застосовувати кріогенну обробку.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

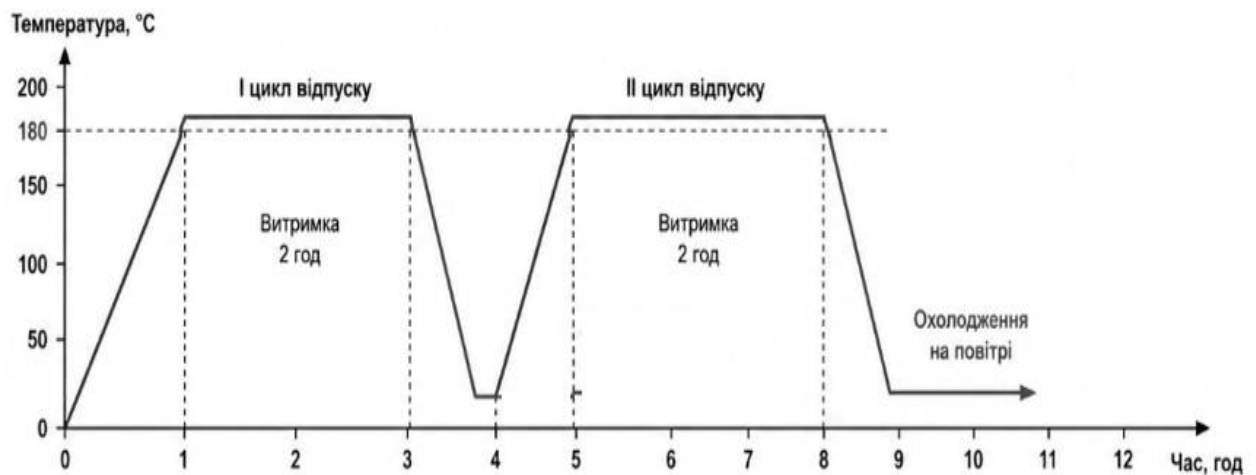


Рисунок 3.3 – Режим подвійного відпуску

Однією з важливих операцій запропонованого технологічного маршруту термічної обробки втулки вала відцентрового насоса зі сталі AISI 440C є обробка холодом (таблиця 3.1), основною метою якої є зменшення кількості залишкового аустеніту, стабілізація структурного стану після гартування та підвищення розмірної стабільності деталі в процесі експлуатації.

Кріогенна обробка після гартування рекомендована для зменшення кількості залишкового аустеніту (рисунок 3.5). Кріогенна обробка покращує твердість і корозійну стійкість, а також сприяє перетворенню залишкового аустеніту. Для практичного режиму можна прийняти обробку при температурі від мінус 70 до мінус 196 °C протягом 2...6 год з подальшим низьким відпуском.

Таблиця 3.1 – Варіанти обробки

Варіант	Переваги	Недоліки
Без кріообробки	Простота технології, нижча собівартість	Більше залишкового аустеніту
Кріообробка	-70 °C, Доступність, помірне підвищення стабільності	Менш повне перетворення аустеніту
Кріообробка	-196 °C Найкраща стабілізація структури	Потребує спеціального обладнання

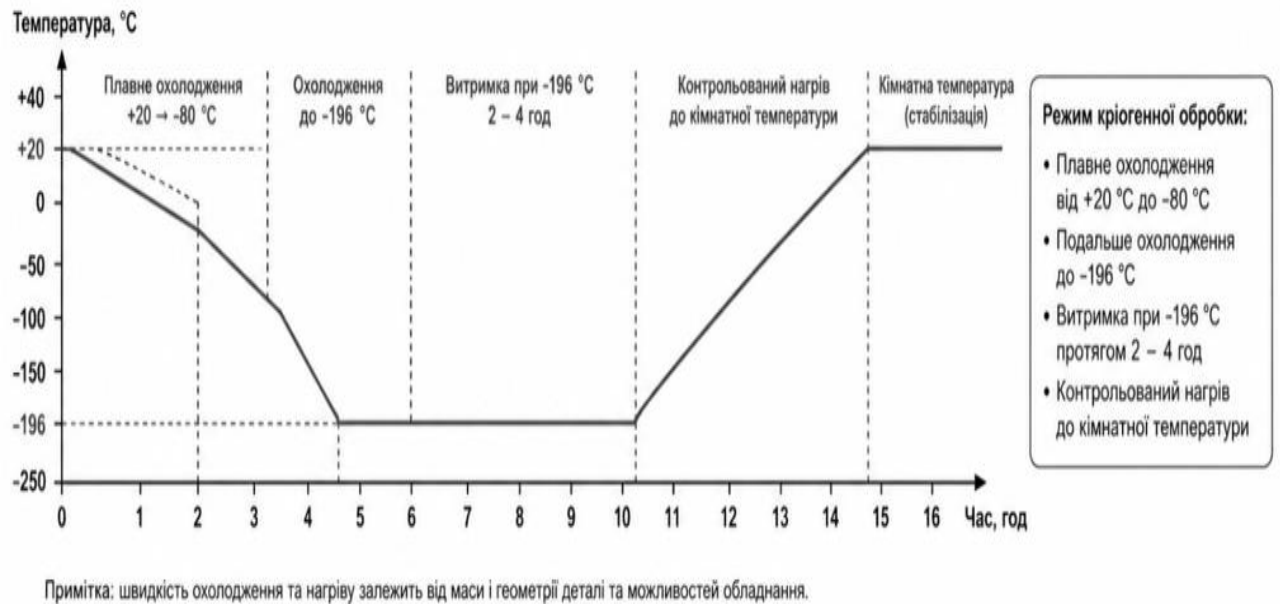


Рисунок 3.4 – Режим охолодження із застосуванням криоустановки

Для реалізації операцій використовують програмовані печі [25] для низького відпуску та криогенні камери (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд печі для низького відпуску (а) та криогенної установки

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Створення низькотемпературного середовища для обробки сталі холодом у промисловості здійснюється двома основними способами:

- використанням охолоджувальних сумішей;
- застосуванням спеціалізованих холодильних або кріогенних установок.

Перший спосіб, що базується на використанні охолоджувальних сумішей, переважно застосовується в умовах лабораторного, одиничного або дрібносерійного виробництва. Найпростішим прикладом є суміш органічного розчинника (ацетону, етилового спирту або бензину) із сухим льодом (твердим діоксидом вуглецю). Охолодження відбувається внаслідок поглинання теплоти під час сублімації вуглекислоти, що дозволяє отримувати температури в межах мінус 70 – мінус 80 °С. Однак застосування таких сумішей характеризується низькою стабільністю температурного режиму, складністю автоматизації процесу та обмеженою повторюваністю результатів, що робить їх малопридатними для обробки відповідальних деталей машин.

Для деталей, до яких висуваються підвищені вимоги щодо точності геометричних розмірів і стабільності властивостей, більш доцільним є використання холодильних або кріогенних камер із програмованим керуванням температурою [25]. У холодильних установках формування низьких температур відбувається за рахунок циркуляції спеціальних робочих середовищ – холодоагентів. До основних вимог до холодоагентів належать:

- здатність переходити в пароподібний стан при низьких температурах;
- висока теплота пароутворення;
- можливість багаторазового циклу випаровування та конденсації;
- термодинамічна стабільність;
- хімічна інертність відносно конструкційних матеріалів.

У сучасних холодильних системах як холодоагенти використовують R404A; R507A; Liquid Nitrogen.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для реалізації обробки холодом втулки в даній роботі доцільно застосовувати камеру холоду і тепла програмованого типу, яка дозволяє реалізувати контрольований температурний цикл з високою точністю підтримання режиму.

3.3. Розроблення технологічного маршруту термічної обробки

Термічна обробка сталі AISI 440C передбачає аустенізацію при температурі 1030 ± 10 °C з витримкою 40...45 хв, що забезпечує достатнє розчинення карбідної фази та формування однорідного аустенітного стану. Після чого проводять гартування шляхом охолодження в маслі з подальшим охолодженням на повітрі до 80 °C, що дозволяє сформувати мартенситну структуру з твердістю 59...60 HRC. Для зменшення кількості залишкового аустеніту та підвищення структурної однорідності застосовується кріогенна обробка при температурі -196 °C з витримкою 1...2 години. Завершальною операцією є низький відпуск при температурі 150...200 °C протягом 2 годин, у результаті чого знижуються внутрішні напруження без істотної втрати твердості, а кінцева твердість матеріалу стабілізується на рівні 56...59 HRC.

З урахуванням конструкції втулки, властивостей сталі AISI 440C та умов експлуатації запропоновано технологічний маршрут, що зображено на рисунку 3.6 та в таблиці додатку. В таблиці наведено детальний опис операцій та послідовності їх проведення.

3.3.1. Контроль якості проведеної обробки

Для оцінювання якості термічної обробки деталей застосовують міжопераційний та кінцевий контроль. У разі міжопераційного контролю перевірку здійснюють після окремих етапів технологічного процесу з метою своєчасного виявлення відхилень режимів обробки та запобігання виникненню дефектів. Кінцевий контроль проводять після завершення

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повного циклу термічної обробки для підтвердження відповідності отриманих властивостей встановленим технічним вимогам.

Під час контролю якості термічно оброблених деталей оцінюють насамперед механічні властивості, серед яких основним показником є твердість, а також досліджують мікроструктуру матеріалу, ступінь фазових перетворень, рівномірність структурного стану та, за необхідності, глибину зміцненого шару (при хіміко-термічній обробці або поверхневому загартуванні). Особлива увага приділяється виявленню можливих дефектів термічної обробки, таких як тріщини, зони неповного загартування, трооститні плями, перегрів, обезвуглецювання або деформації.

Контроль проводять безпосередньо у виробничих умовах, а також у спеціалізованих цехових або заводських лабораторіях із застосуванням відповідного вимірювального обладнання.

Після термічної обробки сталі AISI 440C основним методом оцінювання якості є визначення твердості. Для деталей після гартування, кріогенної обробки та низького відпуску контроль доцільно проводити на твердомірах за методами Rockwell hardness test (шкала HRC) або Vickers hardness test, які забезпечують високу точність вимірювання твердості високоміцних мартенситних сталей [26].

У межах даної роботи контроль якості після термічної обробки здійснювали за такими параметрами:

- вимірювання твердості методом Rockwell (HRC);
- металографічний аналіз мікроструктури при збільшенні від $\times 500$;
- контроль геометричних розмірів після термообробки;
- візуальний контроль поверхні на наявність тріщин, окалини та деформацій.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.6 – Технологічний процес термічної обробки втулки зі сталі AISI 440C

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ СТАЛІ AISI 440C

4.1. Прогнозування структурного стану та властивостей після термічної обробки

Під час нагрівання сталі AISI 440C до температур аустенітизації відбувається часткове розчинення карбідів хрому та насичення аустеніту вуглецем і легувальними елементами. Після охолодження аустеніт перетворюється на мартенсит, однак через високий вміст вуглецю та хрому частина аустеніту може зберігатися у вигляді залишкового аустеніту [26, 27].

Для сталі AISI 440C характерна структура після гартування, що включає мартенсит, залишковий аустеніт і нерозчинені карбіди. Це підтверджується дослідженнями мікроструктури термообробленої сталі, де після аустенітизації спостерігаються мартенситна матриця, залишковий аустеніт і карбідна фаза.

Залишковий аустеніт є небажаною складовою для втулки вала насоса, оскільки він може знижувати твердість і спричиняти зміну розмірів під час експлуатації. Сучасні дослідження показують, що кріогенна обробка сприяє перетворенню залишкового аустеніту на мартенсит і утворенню дрібнодисперсних карбідів, що позитивно впливає на твердість та зносостійкість.

Після запропонованої термічної обробки структура сталі AISI 440C повинна складатися з відпущеного мартенситу, карбідів хрому та незначної кількості залишкового аустеніту (рисунок 4.1). Саме така структура забезпечує високу твердість, зносостійкість і контактну міцність.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 4.1 – Прогнозовані зміни структури після термічної обробки

Для оцінювання твердості застосовували метод Роквелла за шкалою HRC, оскільки саме цей показник найчастіше використовується для високовуглецевих мартенситних корозійностійких сталей. Твердість визначали за HRC із навантаженням 150 кгс, а також застосовували мікротвердість за Віккерсом для аналізу окремих структурних зон. Після термічної обробки відбувається підвищення міцності, утворення карбідів типу $M_{23}C_6$ і поліпшення мартенситного перетворення (таблиця 4.1). Після термічної обробки межа міцності може перевищувати 2,2 ГПа.

Таблиця 4.1 – Очікувані властивості втулки після термічної обробки наведено в таблиці

Показник	Очікуване значення
Твердість	58...62 HRC
Мікротвердість	650...760 HV
Межа міцності	1900...2200 МПа
Структура	відпущений мартенсит + карбіди Cr
Залишковий аустеніт	мінімальний після кріообробки

4.2. Структурний стан сталі AISI 440C

Для дослідження мікроструктури сталі AISI 440C зразки піддавали стандартній металографічній підготовці, яка включала послідовне механічне шліфування, полірування та хімічне травлення поверхні. Початкову підготовку здійснювали методом шліфування на абразивному папері із поступовим зменшенням зернистості, що забезпечувало видалення

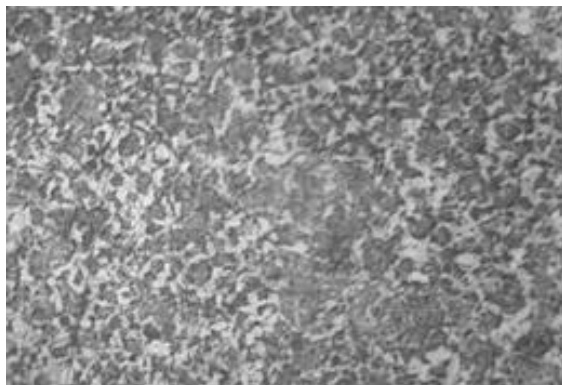
деформованого поверхневого шару та отримання рівної поверхні. Подальше полірування проводили із застосуванням алмазних суспензій, а завершальне тонке полірування виконували колоїдним діоксидом кремнію до отримання дзеркальної поверхні без механічних пошкоджень.

Для виявлення структурних складових високовуглецевої корозійностійкої сталі AISI 440C застосовували реактив Вілли (Villela's reagent), який добре виявляє мартенситну матрицю, залишковий аустеніт та карбідну фазу у високохромистих сталях. Травлення проводили методом занурення поверхні протягом 10...30 с для досягнення необхідного контрасту.

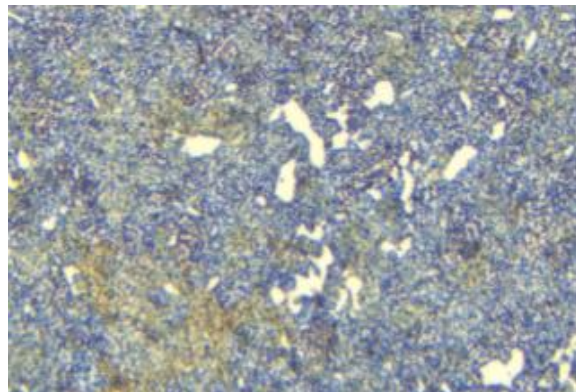
Після травлення поверхню промивали етиловим спиртом, висушували теплим повітрям і досліджували за допомогою електронної мікроскопії при збільшеннях 200...500 разів, що дозволило детально оцінити морфологію мартенситу, характер розподілу карбідів та ступінь перетворення залишкового аустеніту.

Після відпалу структура сталі істотно відрізняється від загартованого та кріообробленого станів (рисунок 4.2). На мікрофотографії спостерігається більш рівноважна структура з феритною або ферито-карбідною матрицею та значною кількістю карбідних включень. Карбіди мають переважно округлу або глобулярну форму й розміщуються по всьому об'єму металевої основи. Відпал сприяє зняттю внутрішніх напружень, зменшенню твердості та підвищенню пластичності й оброблюваності сталі. На відміну від гартування (рисунок 4.3), у відпаленому стані не спостерігається вираженої голчастої мартенситної будови. Така структура є менш твердою, проте більш стабільною та придатною для подальшої механічної обробки.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а



б

Рисунок 4 2 – Мікроструктура AISI 440C після відпалу:

а – відпал при 900 °C×200;

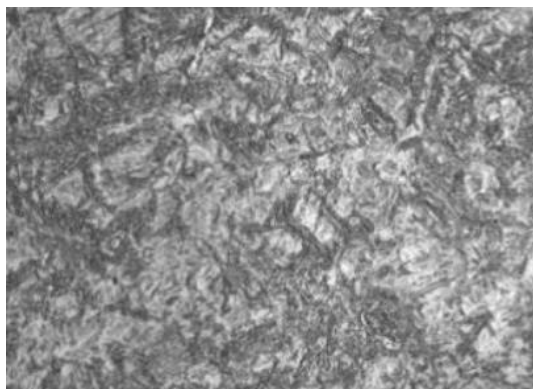
б – сфероїдизуючий відпал.×500

Після відпалу сталь AISI 440C характеризується дрібнодисперсною ферито-карбідною структурою. У темнішій металевій матриці рівномірно розташовані світлі карбідні включення округлої та неправильної форми, що можуть бути ідентифіковані як карбіди хрому типу $M_{23}C_6$ та M_7C_3 . Відсутність вираженої мартенситної голчастої морфології свідчить про перехід структури у більш рівноважний стан. Така будова є типовою для пом'якшувального відпалу.

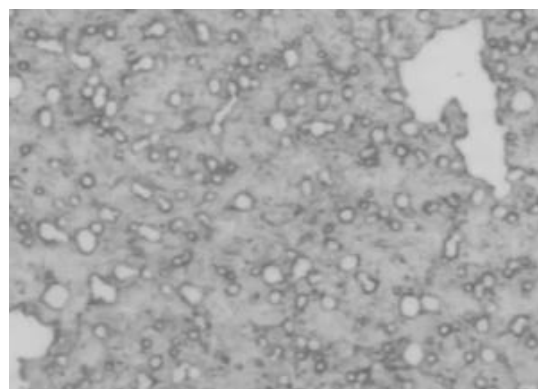
Після гартування структура сталі AISI 440C має переважно мартенситний характер. На мікрофотографії рисунку 4.3 спостерігається голчасто-пластинчаста або дрібноголчаста будова, характерна для високовуглецевих хромистих сталей після інтенсивного охолодження. Основною структурною складовою є мартенсит гартування, який формується внаслідок бездифузійного перетворення аустеніту. У структурі також зберігаються ділянки залишкового аустеніту, що проявляються як світліші або менш виразно травлені області. Крім того, для сталі AISI 440C характерна наявність карбідів хрому, які розташовуються у матриці нерівномірно та підвищують твердість і зносостійкість матеріалу. Така структура забезпечує

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високу твердість після гартування, однак може характеризуватися підвищеними внутрішніми напруженнями та певною крихкістю.



а



б

Рисунок 4 3 – Мікроструктура AISI 440C після гартування:

а – без відпуску×500;

б – з подвійним відпуском.×800

Після подвійного відпуску мікроструктура сталі AISI 440C характеризується формуванням відпущеного мартенситу з рівномірно розподіленими дисперсними карбідними виділеннями. На відміну від структури після гартування, де спостерігається виражена голчаста мартенситна будова з підвищеним рівнем внутрішніх напружень, після подвійного відпуску мартенситні рейки стають менш контрастними, частково релаксують, а структура набуває більш рівноважного та однорідного характеру. У структурі чітко спостерігаються дрібнодисперсні вторинні карбіди, переважно хромистого типу $M_{23}C_6$ та M_7C_3 , які виділяються як усередині мартенситних пакетів, так і по межах колишніх аустенітних зерен. Повторний відпуск сприяє більш повному розпаду пересиченого твердого розчину, стабілізації мартенситної матриці та додатковому зменшенню кількості залишкового аустеніту. Порівняно зі станом після кріообробки, структура після подвійного відпуску характеризується більшою структурною стабільністю та рівномірнішим розподілом карбідної фази.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після кріообробки структура сталі стає більш однорідною та дисперсною (рисунок 4.4).

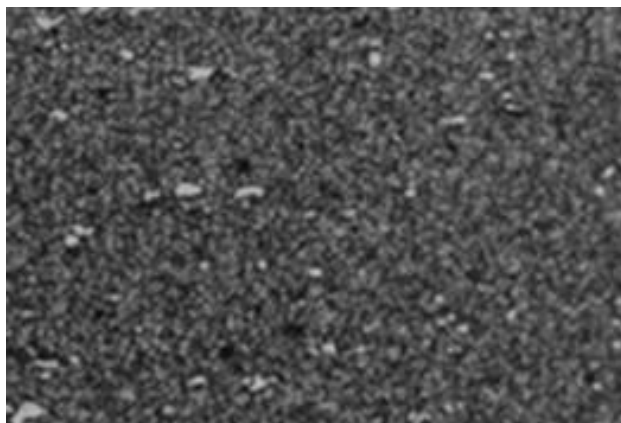


Рисунок 4.4 – Мікроструктура AISI 440C
після обробки холодом. $\times 500$

Порівняно зі станом після гартування, кількість залишкового аустеніту зменшується, оскільки під дією низьких температур він додатково перетворюється на мартенсит. На мікрофотографії це проявляється у вигляді дрібнішої, щільнішої та більш рівномірної структури. Матриця має переважно мартенситну будову, а карбідна фаза розподілена більш дисперсно. Кріообробка сприяє стабілізації структури, зменшенню неоднорідності та підвищенню розмірної стабільності сталі. Формування більшої кількості мартенситу та дисперсних карбідів позитивно впливає на твердість, контактну міцність і зносостійкість сталі AISI 440C.

4.3. Аналіз механічних властивостей сталі AISI 440C

Твердість є одним із ключових показників якості термічної обробки втулки. Для роботи в умовах тертя ковзання, контактного навантаження та можливого абразивного впливу твердість поверхні повинна становити не менше 58 HRC. Аналіз отриманих результатів показує, що після гартування з

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відпуском сталь AISI 440C демонструє твердість 56 HRC та експериментальне значення межі міцності 1665 МПа, що перевищує типові довідкові характеристики (таблиця 4.1). Після кріогенної обробки твердість зростає до 58–59 HRC, а межа міцності стабілізується на рівні ≈ 1280 МПа, що пов'язано зі зменшенням кількості залишкового аустеніту та додатковим мартенситним перетворенням. Подвійний відпуск забезпечує твердість 56–57 HRC при межі міцності ≈ 1230 МПа, що відповідає типовим експлуатаційним характеристикам сталі AISI 440C та свідчить про формування структурно стабільного стану з пониженим рівнем внутрішніх напружень.

Таблиця 4.1 – Порівняння властивостей після різних режимів ТО

Режим термічної обробки	Твердість, HRC	Межа міцності σ_v , МПа
Гартування + відпуск (250 °C)	56	1665
Кріообробка (–196 °C)	58-59	1280
Подвійний відпуск (2×200 °C)	56-57	1230

Аналіз отриманих результатів показує, що найбільше зростання твердості (до 59 HRC; рисунок 4.5) та достатнє значення міцності (до 1280 МПа) спостерігається після кріообробки, що обумовлено майже повним перетворенням залишкового аустеніту в мартенсит та дисперсійним зміцненням карбідами. Можна припустити, що достатнє поєднання міцності та пластичності забезпечує подвійний відпуск, при якому відносне подовження може бути більш ніж у 4 рази порівняно зі станом після одиничного відпуску. Зазвичай такі показники надають зниження внутрішніх напружень та стабілізацію мартенситно-карбідної структури.



Рисунок 4.5 – Гістограма порівняння твердості

Найвище значення твердості (59 HRC) отримано після кріообробки, що на 5,4 % вище порівняно зі станом після гартування з відпуском. Це обумовлено додатковим перетворенням залишкового аустеніту в мартенсит та формуванням більш дисперсної карбідної фази. Після подвійного відпуску твердість дещо знижується до 57 HRC, що пояснюється релаксацією внутрішніх напружень та стабілізацією структури.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Аналіз результатів досліджень структури та властивостей сталі AISI 440C після термічної обробки показав, що після гартування та відпуску сталь AISI 440C формує структуру відпущеного мартенситу з карбідами хрому, яка забезпечує належний комплекс властивостей. Порівняльний аналіз результатів досліджень показав, що механічні властивості сталі AISI 440C безпосередньо визначаються особливостями сформованої мікроструктури після відповідного режиму термічної обробки.

Після гартування з наступним відпуском при температурі 200 °C формується структура відпущеного мартенситу з карбідами хрому та певною кількістю залишкового аустеніту. Така структура забезпечує твердість на рівні 56 HRC та межу міцності 1665 МПа, однак характеризується низькою пластичністю (менше 1 %) внаслідок збереження значних внутрішніх напружень.

Застосування кріогенної обробки сприяє додатковому перетворенню залишкового аустеніту в мартенсит, що приводить до ущільнення структури та формування більш дисперсного карбідного зміцнення. Внаслідок цього спостерігається максимальне підвищення твердості до 59 HRC та тимчасового опору розриву до 1280 МПа.

Після подвійного відпуску відбувається часткова релаксація внутрішніх напружень, стабілізація мартенситної матриці та виділення вторинних карбідів типу $M_{23}C_6$, що забезпечує формування оптимального комплексу механічних властивостей: твердість 57 HRC, межа міцності 1230 МПа та можливого підвищення пластичності до 4,2 %.

Кріогенна обробка забезпечує максимальне зміцнення сталі AISI 440C, тоді як подвійний відпуск формує найбільш збалансований комплекс експлуатаційних властивостей. твердість на рівні 58...62 HRC.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз структури показав, що дрібний і рівномірний розподіл карбідів сприяє підвищенню опору абразивному та адгезійному зношуванню, тоді як великі карбідні скупчення можуть виступати концентраторами напружень. Злишковий аустеніт може знижувати розмірну стабільність втулки, тому для відповідальних деталей доцільно застосовувати кріогенну обробку або подвійний відпуск.

На основі літературних даних та вивчення мікроструктури обґрунтовано, що запропонований режим термічної обробки дозволяє сформувати комплекс властивостей, необхідний для втулки вала відцентрового насоса: високу твердість, зносостійкість, контактну витривалість, достатню корозійну стійкість і розмірну стабільність. Відповідно до отриманих результатів сформовано карту технологічного процесу втулки відцентрового насоса зі сталі AISI 440C. Для деталей, що працюють в умовах контактного навантаження та зношування, найбільш збалансованим режимом є кріообробка з наступним низьким відпуском.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Підшипники ковзання. Навчальний наочний посібник [Електронний ресурс]: для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальностями 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» уклад.: А. К. Скуратовський .– Електронні текстові данні 1файл:10,7 МБ – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 38 с.

2. Moheimani, K., Tan, Q., Knibbe, R. et al. Enhancing the mechanical properties and corrosion resistance of AISI 440C martensitic stainless steel via laser powder bed fusion and post-processing treatment. Prog Addit Manuf 10, 11405–11424 (2025). <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01294-z>.

3. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. - Кривий Ріг: Видавець ФО-П Чернявський Д.О., 2015. – 492 с.; з іл.

4. Lu, SY., Yao, KF., Chen, YB. et al. Influence of Heat Treatment on the Microstructure and Corrosion Resistance of 13 Wt Pct Cr-Type Martensitic Stainless Steel. Metall Mater Trans A 46, 6090–6102 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3180-1>.

5. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство, розділ Матеріалознавство: Навчальний посібник / Л.Г. Бодрова, Г.М. Крамар, Я.О.Ковальчук, І.В. Коваль – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 157 с/

6. Krishna SC, Tharian KT, Chakravarthi KVA, Jha AK, Pant B. Heat Treatment and Thermo-Mechanical Treatment to Modify Carbide Banding in AISI 440C Steel: A Case Study. Metallography, Microstructure, and Analysis. 2016;5:108-15. <https://doi.org/10.1007/s13632-016-0266-0>.

7. <https://www.smithsadvanced.com/assets/pdf/440c-stainless-steel-bars.pdf>.

8. Behnam Akhoundi and Vahid Modanloo 2024 Eng. Res. Express 6 015005 <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad14af>.

9. <https://www.smithsadvanced.com/assets/pdf/440c-stainless-steel-bars.pdf>.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 1 [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньо-професійної програми «Технології машинобудування» та освітньо-наукової програми «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Ю.В.Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Електронні текстові данні (1 файл: 10,2 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с.

11. Deng B, Yang D, Wang G, Hou Z, Yi H. Effects of Austenitizing Temperature on Tensile and Impact Properties of a Martensitic Stainless Steel Containing Metastable Retained Austenite. Materials. 2021;14:1000. <https://doi.org/10.3390/ma14041000>.

12. Iakovakis E, Avcu E, Roy MJ, Gee M, Matthews A. Wear resistance of an additively manufactured high-carbon martensitic stainless steel. Scientific Reports. 2022;12:12554. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15621-9>.

13. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/tcsme-2020-0166>.

14. ДСТУ ISO 4379:2015 (ISO 4379:1993, IDT) Підшипники ковзання. Втулки з мідних сплавів

15. <http://ua.gerollte-gleitlager.com/bronze-alloy/nickel-aluminum-bronze/astm-standard-c95500-cual10fe5.html>.

16. ДСТУ ГОСТ ИСО 2795-2003 Підшипники ковзання. Металокерамічні втулки. Розміри і допуски.

17. T.Y. Zeng, W. Li, N.M. Wang, W. Wang, K. Yang, Microstructural evolution during tempering and intrinsic strengthening mechanisms in a low carbon martensitic stainless bearing steel, Materials Science and Engineering: A, Volume 836, 2022, 142736, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142736>.

18. Термічна обробка: методичні вказівки до лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітніх програм «Матеріалознавство» та «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» спеціальності 132 Матеріалознавство, галузі знань 13 Механічна інженерія

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук., Ю.П. Фещук Луцьк: ЛНТУ, 2022. – 74 с.

19. Леговані сталі та сплави : навч. посіб. / Л. Ф. Руденко, Т. П. Говорун. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 171 с.

20. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія і практика термообробки» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 104 Фізика та астрономія, за освітньо-професійною програмою «Фізика та астрономія» всіх форм навчання / Укладач: Лисенко О.Б. – Кам'янське: ДДТУ, 2019.– 124 с.

21. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – 89 с.

22. Леговані сталі та сплави : навч. посіб. / Л. Ф. Руденко, Т. П. Говорун. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 171 с.

23. Устаткування процесів теплової обробки : Конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освітніх програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. С.В. Мисковець, Д.А. Гусачук. Луцьк : ЛНТУ, 2025. 100 с.

24. <https://ua.shj-carbon.com/info/vacuum-furnace-how-it-works-17685473954489344.html>.

25. Масліков М.М. Кріогенна техніка і технологія: Навч. посіб. – К.: НУХТ, 2010. – 180 с.

26. Термічна обробка: методичні вказівки до практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг» спеціальності G8 Матеріалознавство галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво денної та заочної форм навчання / уклад. Н.П. Зайчук, Н.Ю. Імбірович – Луцьк: ЛНТУ, 2026. – 77 с.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

27. Бодрова Л.Г. Б-75 Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство, розділ Матеріалознавство: Навчальний посібник / Л.Г. Бодрова, Г.М. Крамар, Я.О. Ковальчук, І.В. Коваль – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 157 с.

					БР 0X26.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		