

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»

Вплив параметрів гартування на структуру та
властивості підшипникової сталі B4 (100CrMnSi6 6) / The
influence of quenching parameters on the structure and
properties of bearing steel B4 (100CrMnSi6 6)

спеціальності 132 "Матеріалознавство"

освітня програма "Індустріальний інжиніринг і менеджмент"

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМ(ПМ)-41
Салата Дмитро Романович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Гусачук Дмитро Анатолійович

(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 та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Індустріальний інжиніринг і менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ ІМБІРОВИЧ Н.Ю.

“ 03 ” _____ 01 _____ 2026 року

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

Салаті Дмитру Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Вплив параметрів гартування на структуру та властивості підшипникової сталі B4 (100CrMnSi6 6)*

керівник роботи *Гусачук Дмитро Анатолійович, к.т.н., доцент*,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “31” 12 2025 року № 02 540/01-

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
« 19 » травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи *Зразки матеріалу (B4 (100CrMnSi6 6), матеріали технології, технічні умови, стандарти*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ; аналіз технічної літератури;*

опис методики досліджень; вивчення впливу відпалювання на структуру сталі B4 (100CrMnSi6); дослідження впливу гартування на структуру та властивості сталі B4 (100CrMnSi6); висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1 слайд – Характеристика сталей для деталей підшипників кочення; 2, 3 слайди – Методика дослідження; 3 слайд – Підготовка зразків для аналізу та випробувань; 4 слайд – структура сталі B4 (100CrMnSi6); 5-7 слайди – структура зразків сталі B4 (100CrMnSi6) після відпалювання; 8, 9 слайди – вплив гартування на структуру та властивості сталі B4 (100CrMnSi6); 9 слайд – висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтроль</i>	<i>доцент кафедри матеріалознавства к.т.н. Мисковець С.В.</i>		

7. Дата видачі завдання «03» 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	<i>Вступ. Аналіз літературних джерел.</i>	05.05.2026	
2.	<i>Планування та виконання експерименту.</i>	12.05.2026	
3.	<i>Опис та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій та висновків</i>	19.05.2026	

Здобувач вищої освіти _____ *Салата Д. Р.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ *Гусачук Д. А.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Салата Д.Р. Вплив параметрів гартування на структуру та властивості підшипникової сталі В4 (100CrMnSi6 6). Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП "Індустріальний інжиніринг і менеджмент" спеціальності 132 "Матеріалознавство". Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У розділах роботи висвітлено: особливості застосування підшипників кочення в машинобудуванні, характеристику сучасних сталей для їх виготовлення та особливості процесів гартування кілець роликів підшипників; розроблено методику досліджень, оцінки структури та властивостей підшипникових сталей; результати досліджень впливу відпалювання на структуру та властивості сталі 100CrMnSi6; результати досліджень впливу гартування на структуру та властивості сталі 100CrMnSi6. Пояснювальна записка роботи містить: 50 сторінок тексту, 18 рисунків, 2 таблиці, 15 літературних джерел та додатки, у вигляді 9 слайдів презентації.

В кваліфікаційній роботі на основі досліджень впливу параметрів гартування на структуру та властивості підшипникової сталі В4 (100CrMnSi6), та аналізу їх результатів розроблено практичні рекомендації щодо оптимізації технології гартування кілець підшипників кочення. Оптимальними температурами гартування сталі 100CrMnSi6, після її відпалу на зернистий перліт, слід вважати проміжок з 840 до 860 °С.

Ключові слова: підшипники кочення, сталь підшипникова, структура, властивості, твердість, гартування сталі, температура гартування.

					БР 0625.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Салата			Вплив параметрів гартування на структуру та властивості підшипникової сталі В4 (100CrMnSi6 6) / The influence of quenching parameters on the structure and properties of bearing steel B4 (100CrMnSi6 6)	Літ.	Арк.	Акрушив
Перевір.		Гусачук					3	50
Реценз.						ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПМ(ІІІМ)-41		
Н. Контр.		Мисковець						
Затверд.		Імбирович						

ANNOTATION

Salata D. The influence of quenching parameters on the structure and properties of bearing steel B4 (100CrMnSi6 6). Manuscript.

Qualifying work of a bachelor of the Educational Program "Industrial engineering and management" in the specialty 132 "Materials Science". Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of sources used and appendices. The chapters of the work highlight: the features of the application of rolling bearings in mechanical engineering, the characteristics of modern steels for their manufacture and the features of the hardening processes of roller bearing rings; the methodology for research, assessment of the structure and properties of bearing steels is developed; the results of research on the effect of annealing on the structure and properties of 100CrMnSi6 steel; the results of research on the effect of hardening on the structure and properties of 100CrMnSi6 steel. The explanatory note of the work contains: 50 pages of text, 18 figures, 2 tables, 15 literary sources and appendices, in the form of 9 presentation slides.

In the qualification work, based on research into the influence of quenching parameters on the structure and properties of B4 (100CrMnSi6 6) bearing steel, and analysis of their results, practical recommendations have been developed for optimizing the technology of quenching of rolling bearing rings. The optimal tempering temperatures for 100CrMnSi6 steel, after annealing to granular pearlite, should be considered to be the range from 840 to 860 °C. The qualification work investigated.

Key words: rolling bearings, bearing steel, structure, properties, hardness, steel hardening, hardening temperature.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вум.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	7
1.1. Застосування підшипників кочення в машинобудуванні	7
1.2. Характеристика сталей для виготовлення деталей підшипників кочення	10
1.3. Типові технології формування заготовок кілець підшипників	13
1.4. Типові процеси термічної обробки сталі В4 (100CrMnSi6 6).....	15
1.5. Особливості процесів гартування кілець роликів підшипників	18
1.6. Мета та завдання кваліфікаційної роботи	20
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	22
2.1. Підготовка зразків для проведення досліджень.....	22
2.2. Методика дослідження макро- та мікроструктури зразків	24
2.3. Термічна обробка зразків сталі В4 (100CrMnSi6 6)	27
2.4. Методи оцінки механічних властивостей зразків.....	30
РОЗДІЛ 3 ВІДПАЛЮВАННЯ ЗАГОТОВОК СТАЛІ В4 (100CrMnSi6 6) ПІСЛЯ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ.....	34
3.1. Структура формованих заготовок сталі В4 (100CrMnSi6 6)	34
3.2. Вплив відпалювання на структуру зразків	35
3.3. Твердість зразків після формування та відпалювання	39
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ГАРТУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ В4 (100CrMnSi6 6)	41
4.1. Структура загартованих зразків сталі В4 (100CrMnSi6 6).....	41
4.2. Вплив температури гартування на твердість зразків	43
4.3. Вплив температури гартування на контактну міцність сталі В4 (100CrMnSi6 6)	45
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49
ДОДАТКИ	

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Підшипники є ключовими компонентами, що використовуються для підтримки обертових елементів та перетворення навантаження. Вони відіграють дуже важливу роль у забезпеченні жорсткості та точності обертання. На сьогодні багато механічних систем залежать від стабільної та надійної роботи підшипників кочення. Якщо підшипники правильно спроектовані, зібрані, експлуатуються та обслуговуються, вони можуть забезпечити відмінний термін служби. Відомо, що передчасні поломки підшипників часто є основною причиною поломок та перешкод у безперебійній роботі різноманітних машин та механізмів.

Підшипники кочення, кулькові чи роликові, відносять до збірних конструкцій, що складаються принаймні з кілець – доріжок кочення, та тіл обертання. Звісно їх робота залежить від стану самих цих елементів як складальних одиниць збірної конструкції. Ці деталі виготовляють з легованих конструкційних сталей, що відносять до особливої групи та називають підшипниковими сталями. Світові та регіональні стандарти обумовлюють вимоги до цієї групи сталей, які мають гарантувати стабільність показників стійкості, експлуатаційної надійності та довговічності. Високі показники підшипникових сталей здебільшого формуються у процесі термічної обробки, яка є важливим етапом у процесі виготовлення деталей підшипників.

Вітчизняний стандарт на підшипникові сталі ДСТУ ISO 683-17:2008 (частина 17. Підшипникові сталі) регламентує номери та марки сталей, їх хімічний склад та режими термооброблення. Для найбільш поширених номерів підшипникових сталей В1-В8 наскрізного гартування важливим є стан металу заготовок, які поступають на кінцеву термообробку, від якого залежать результати процесу зміцнення. Тому дослідження впливу гартування на структуру та властивості сталей цих груп, для конкретних умов виробництва, є важливим завданням.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Застосування підшипників кочення в машинобудуванні

Підшипники кочення є важливим елементом у системах машинобудування та інших галузях, що використовуються для підтримки обертових елементів та перетворення навантаження. Вони відіграють дуже важливу роль у забезпеченні жорсткості та точності обертання [1]. Крім того, багато механічних систем залежать від стабільної та надійної роботи підшипників. Якщо підшипники правильно спроектовані, зібрані, експлуатуються та обслуговуються, вони можуть забезпечити відмінний термін служби. Однак передчасні поломки підшипників часто є основною причиною поломок машин та перешкод у безперебійній роботі.

Поломки підшипників можуть призвести до технічного обслуговування або пошкодження машин, або навіть до смертельних аварій [2]. До видів поломок підшипників в основному належать контактна втома (викривлення, відкол або точкова корозія), знос, перегрів та корозія [3, 4]. Причинами поломок підшипника можуть бути помилки в конструкції, виробництві, монтажі або застосуванні підшипника, такі як невідповідна структура або розмір, пов'язані з конструкцією підшипника, некваліфікована термічна обробка або розміри, пов'язані з виробництвом підшипника, неспіввісність або надмірне осьове зусилля затягування, пов'язане з вузлом підшипника, надмірна вібрація або забруднення, пов'язані із застосуванням підшипника. Часто існують відповідні взаємозв'язки між морфологією поломок підшипника та причинами поломок. Наприклад, поломки, спричинені надмірним осьовим навантаженням в авіаційному двигуні, проявлятимуться у вигляді відшаровування вздовж доріжки кочення та кульок. Крім того, пошкодження, спричинені неправильним вирівнюванням, можуть проявлятися у вигляді відшаровування, що відбувається в певних місцях, наприклад, по діагоналі

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

навпроти доріжки кочення, або один кінець роликів має серйозні пошкодження, а інший кінець має лише незначні контактні подряпини.

Аналіз відмов підшипника значною мірою залежить від розпізнавання морфології підшипника, що вийшов з ладу, та вимагає дуже специфічного досвіду. Крім того, першопричини відмови підшипника можуть бути поєднанням кількох факторів, таких як помилки проектування, відхилення від апаратного забезпечення та неправильне складання [4]. Складність визначення першопричини відмови підшипника значно зростає, коли першопричиною відмови підшипника є поєднання кількох факторів. Тому дуже важливо дослідити широкі характеристики, які вказують на взаємозв'язки між видами відмови підшипника та причинами відмови.

Неправильне встановлення призводить до помилок складання, таких як надмірне осьове зусилля затягування та не співвісність, і є однією з основних причин виходу з ладу підшипника. Надмірне осьове зусилля затягування призводить до збільшення локального напруження в геометрії та виняткового тертя, а також до зменшення терміну служби підшипника. Не співвісність, як показано на рисунку 1.1, є поширеною причиною виходу з ладу підшипника. Не співвісність та виходу з ладу підшипника, спричинені не співвісністю, широко досліджуються.

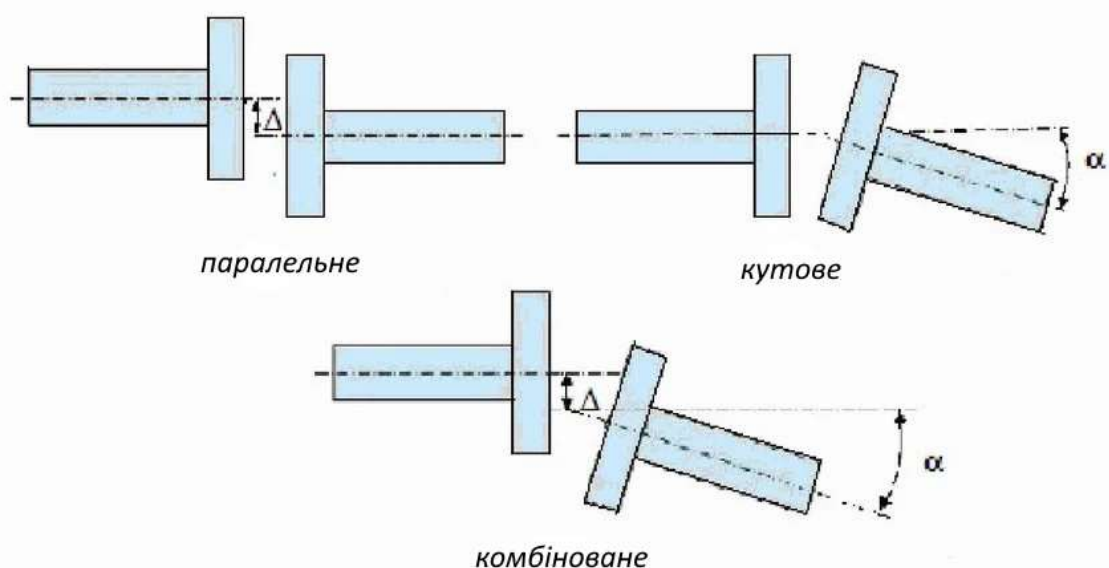


Рисунок 1.1 – Не співвісність валів обертових пар

Вивчено [5] вплив не співвісності складання на контактне напруження циліндричного роликового підшипника за допомогою методу скінченних елементів і виявив. Не співвісність збільшує контактне напруження з одного боку ролика та зменшує контактне напруження з іншого боку. При вивченні впливу помилки не співвісності на контактний тиск встановлено, що розподіл контактного тиску змінюється з рівномірного на розподіл з нахилом через помилку не співвісності та максимальне збільшення контактного тиску приблизно на 3,7 %, коли в циліндричному роликовому підшипнику утворюється помилка не співвісності $0,05^\circ$. Встановлено, що руйнування ролика підшипника з хромонікелевих сталей наскрізного прогартування спричинене не співвісністю вала, на якому кріпився підшипник.

Однак, тематичні дослідження відмов, спричинених деформацією деталей підшипників, що пов'язана з неправильним встановленням, є порівняно меншими, на відміну від досліджень відмов, спричиненими неправильним встановленням та іншими причинами, такими як некваліфіковане виробництво підшипників та пагане змащення.

Роликові підшипники є одними з найпоширеніших механічних компонентів, які відіграють ключову роль у зменшенні тертя між рухомими деталями машин. Завдяки використанню рухомих елементів кочення, таких як кульки, ролики або голчасті ролики, вони забезпечують плавний та енергоефективний обертальний рух. Їхня універсальність означає, що їх можна знайти в побутовій техніці, а також у важкій промисловості та автомобільній галузі.

Роликові підшипники є повсюдними механічними компонентами в промисловому світі [6]. Вони залежать від тіл кочення для підтримки обертання та відіграють вирішальну роль у різному обладнанні, починаючи від двигунів та автомобілів і закінчуючи текстильними машинами. Конічні роликові підшипники можуть витримувати як радіальні, так і осьові навантаження завдяки своїй конічній формі. Широко використовуються в

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

автомобільних маточинах, коробках передач та інших пристроях, що потребують двосторонньої підтримки.

Принцип роботи роликових підшипників базується на перетворенні тертя ковзання на тертя кочення, що призводить до значного зниження опору руху та підвищення механічної ефективності. Це дозволяє ефективно передавати сили та крутні моменти з мінімальними витратами енергії.

У роликових підшипниках елементи кочення (наприклад, кульки, ролики, голки) котяться між внутрішнім і зовнішнім кільцями, утворюючи точковий або лінійний контакт з доріжками кочення. Саме цей метод контакту значно зменшує площу контакту і, отже, зменшує опір руху. Рух тіл кочення відбувається по точно виготовлених доріжках кочення, які направляють їх у визначеному напрямку та стабілізують всю конструкцію. Сепаратор також відіграє ключову роль: він підтримує правильну відстань між тілами кочення та запобігає їх тертю одне об одне.

Додаткову роль відіграє відповідне змащення. Мастило утворює тонку плівку, що розділяє металеві поверхні, що додатково зменшує тертя, захищає від корозії та розсіює тепло. Залежно від застосування використовується або пластичне мастило, або олія, і їх правильний вибір безпосередньо впливає на термін служби та надійність підшипника.

1.2. Характеристика сталей для виготовлення деталей підшипників кочення

Підшипники кочення працюють в екстремальних умовах, включаючи високі циклічні навантаження, тертя та зазнають інтенсивного спрацювання поверхонь. Щоб витримати мільйони обертів без руйнування, сталі для виготовлення деталей підшипників, повинні мати високу твердість, стійкість до втоми та стабільність розмірів. Найпоширенішим матеріалом для підшипників кочення є високовуглецеві хромисті сталі, з вмістом карбону біля 1,0 % та 0,9...1,5 % хрому [7].

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Сталі для підшипників повинні мати високу твердість і зносостійкість у поєднанні з високою межею контактної втоми. Після термічної обробки (гартування та відпуску) досягає твердості за Роквелом 60...64 HRC. До сталей ставлять особливі вимоги щодо мінімального вмісту неметалевих включень, розвитку карбідної неоднорідності та пористості. Ці дефекти, перебуваючи в поверхневому шарі, стають концентраторами напружень і викликають передчасне втомне руйнування. Довговічність роликів підшипників значною мірою визначається відхиленням від конічної форми, що призводить до биття. Ці відхилення ретельно контролюються [6].

Підшипникові сталі згідно стандарту ділять на групи за особливостями використання та виконання термічної обробки. Цифра після букви В вказує на номер сталі за стандартом. Стандартом встановлено п'ять груп сталей:

- підшипникові сталі наскрізної прогартуваності (сталі з приблизно 1 % С та від 1 % до 2 % Сг);
- підшипникові сталі, що цементуються;
-) підшипникові сталі (нелеговані та леговані) з індукційним гартуванням;
- нержавіючі підшипникові сталі;
- жароміцні підшипникові сталі.

Підшипники загального призначення, у тому числі більшість роликів конічних підшипників, виготовляються зі сталей наскрізної прогартуваності, до яких відносять сталі В1-В8 (таблиця 1.1). Як видно сталі цих марок містять не більше 1,05 % вуглецю 0,9...2,0 хрому та різну кількість марганцю, що визначається експлуатаційним призначенням підшипника. Для виробів, що використовуються у стандартних умовах. У цій групі знаходяться хромомарганцеві та хромисті склади, леговані молібденом та кремнієм. За основними властивостями та хімічним складом будь-яка підшипникова сталь схожа на сплави інструментальної групи. При цьому сфера її використання дозволяє віднести підшипникові матеріали до спеціальних конструкційних.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Таблиця 1.1 – Склад підшипникових сталей наскрізного гартування [7]

Марка сталі		Хімічний склад, %						
Номер	Марка	C	Si	Mn	P (max)	S (max)	Cr	Mo
B1	100Cr6	0,93...1,05	0,15... 0,35	0,25...0,45	0,025	0,015	1,35...1,60	max 0,10
B2	100CrMnSi4-4	0,93...1,05	0,45...0,75	0,90...1,20	0,025	0,015	0,90...1,20	max 0,10
B3	100CrMnSi6-4	0,93...1,05	0,45...0,75	1,00...1,20	0,025	0,015	1,40...1,65	max 0,10
B4	100CrMnSi6 6	0,93...1,05	0,45...0,75	1,40...1,70	0,025	0,015	1,40...1,65	max 0,10
B5	100CrMo7	0,93...1,05	0,15...0,35	0,25...0,45	0,025	0,015	1,65...1,95	0,15...0,30
B6	100CrMo7-3	0,93...1,05	0,15...0,35	0,60...0,80	0,025	0,015	1,65...1,95	0,20...0,35
B7	100CrMo7-4	0,93...1,05	0,15...0,35	0,60...0,80	0,025	0,015	1,65...1,95	0,40...0,50
B8	100CrMnMoSi	0,93...1,05	0,40...0,60	0,80...1,10	0,025	0,015	1,80...2,05	0,50...0,60

Під час експлуатації підшипники кочення та їх елементи (кільця, ролики, кульки) постійно сприймають знакозмінну підвищену напругу. Багаторазовий тиск на будь-яку зону цих компонентів поширюється по опорній поверхні, що має малу площу. Через це і з'являються локальні напруження зі змінним знаком, які розтягують поверхню біля контуру та стискають її в центрі.

Величина згаданих напружень може досягати 500 МПа, за рахунок чого виникає несуттєва залишкова та пружна деформація виробу кочення. Здавалося б, нічого страшного, але ж ця напруга, як було сказано, впливає на підшипник безліч разів, що і стає причиною виникнення через деякий час тріщин втоми, які призводять до руйнування виробу.

Крім того, деталі підшипників кочення схильні до стирання, тобто одного з видів руйнувань металу механічного характеру. Воно обумовлюється наявністю напружень, які утворюються під час руху контактуючих поверхонь силами тертя. Через стирання від виробів починають відпадати невеликі металеві частинки, це призводить до підвищення величини зазору між тілами кочення і кільцями підшипників, а також активізації процесу їхнього абразивного зносу. З усього вищесказаного, стає зрозумілим, що підшипникові метали повинні мати: підвищеної міцності і стійкості проти механічного зносу; великою пружністю; незначною крихкістю у поєднанні з підвищеним показником опору фізичної втоми металу.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Деталі підшипників загального призначення проходять термообробку, що включає загартування при 820...850 °С з охолодженням в олії та низькотемпературне відпускання. Перед відпусканням деталі охолоджують до 20...25 °С для забезпечення стабільності їхньої роботи (за рахунок зменшення кількості залишкового аустеніту). Відпускання проводять за температур 150...170 °С протягом однієї – двох годин. Після такої обробки структура сталі складається з мартенситу та дрібних включень карбідів хрому та має твердість 60...64 HRC.

1.3. Типові технології формування заготовок кілець підшипників

Виробнича лінія кілець підшипників складається з кування, різання, термічної обробки та механічної обробки. Найпоширенішою полошкою кілець підшипників є геометричне викривлення, яке називається овальністю. Щоб уникнути таких полошок, важливо знати про зміну залишкового напруженого стану напівфабрикатів протягом усієї виробничої лінії.

Розробляючи технологічні процеси кування та гарячого штампування, слід пам'ятати про можливий ріст зерна металу, нагрітого до високих температур [8, 9]. Завершальні переходи штампування необхідно закінчувати за температур близьких до нижньої межі допустимого інтервалу. Для сталей на діаграмі "температура – розмір зерна" (рисунок 1.2) показані процеси, які мають місце під час нагрівання, деформації та охолодження поковок.

На рисунку початковий розмір зерна a показаний на нижній осі. Під час проходження фазових перетворень (ділянка б-в) старе зерно подрібнюється, що пов'язано з зародженням нової фази. За подальшого нагрівання до температур гарячого штампування зерно поступово росте (в-г). Ріст зерна також продовжується за умов перенесення заготовки в штамп (г-д) чи інструмент для кування, хоча температура заготовки може поступово падати.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

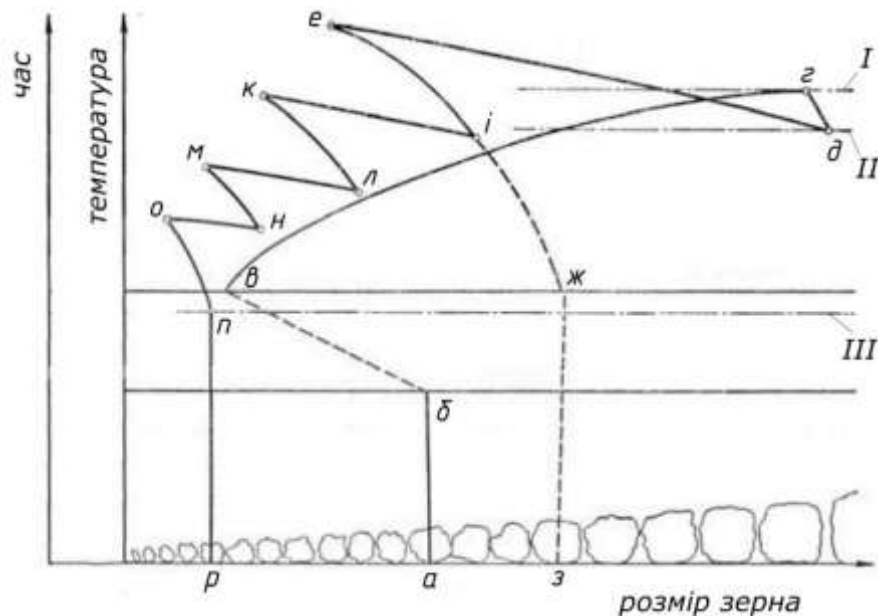


Рисунок 1.2 – Зміна розмірів зерна сталі при нагрівання, штампуванні та охолодженні:

I – температура нагрівання заготовки;

II – температура початку штампування;

III – температура закінчення штампування

За виконання штампувального переходу зерно подрібнюється (δ - e) та підвищується температура металу за рахунок переходу частини роботи деформації у тепло. Під час перенесення заготовки в інший рівчак метал відпочиває, що супроводжується ростом зерна (e - i). Цей процес буде тривати доти, доки температура не досягне фазових перетворень. Температура заготовки падає, але в проміжку до температури фазового перетворення буде відбуватись ріст зерна. Саме тому у випадку, коли штампування закінчується за високої температури, поковка має грубозернисту структуру (e - i - $ж$ - $з$). Тому, коли операція штампування має лише один перехід, технологічний інтервал гарячого штампування повинен бути зміщений до нижньої межі допустимого інтервалу температур. Якщо ж операція виконується за декілька переходів її проектують так, щоб останній перехід завершувався близько потрібної температури закінчення штампування (e - i - $к$ - $л$ - $н$ - $м$ - $о$ - $п$).

Гаряче кування підшипникових сталей (1 % С та 1,5 % Cr) за температур 850...1050 °С дозволяє досягти повністю сфероїдизованої мікроструктури,

порівнянної зі сталлю, сфероїдизованою тривалим відпалом. Деформаційно-індукована сфероїдизація забезпечує вищу твердість, міцність та в'язкість, ніж відпалена сталь. Деформаційно-індукована зерниста структура та дрібніше розсіювання залишкових карбідів при температурі гарячого кування сприяють розведеному евтектоїдному перетворенню при охолодженні сталі нижче критичної температури A_1 . Гаряче кування при ще вищій температурі 1200 °C формує частково сфероїдизовану мікроструктуру зі значною часткою перлітних колоній, що призвело до гірших механічних властивостей. Нижчий рівноважний карбід при вищій температурі гарячого кування дав великі островці аустеніту, позбавлені карбідів, які при охолодженні нижче A_1 перетворювалися на перліт. Еволюцію мікроструктури та механічні властивості слід контролювати на різних стадіях обробки.

1.4. Типові процеси термічної обробки сталі B4 (100CrMnSi6 6)

Для того, щоб підшипники кочення виконували свою функцію, окремі деталі повинні мати відповідні механічні властивості [10]. Ці властивості отримують шляхом гартування та низькотемпературного відпуску. Гартування повинно надати підшипниковій сталі необхідної твердості, а відпуск має зменшити внутрішні напруження та зменшити крихкість загартованої підшипникової сталі. Термічна обробка визначає кінцеві властивості окремих деталей підшипників кочення та має вирішальний вплив на їхню функцію у значній мірі. Необхідні механічні властивості визначаються, зокрема, станом початкової мікроструктури та внутрішніми напруженнями перед гартуванням, рівномірністю нагрівання до температури аустенізації, умовами аустенізації та охолодженням від температури аустенізації. Оскільки швидкості нагрівання та охолодження поверхні та серцевини завжди різні, внутрішні напруження під час гартування зростають. Окремі деталі згодом деформуються, що може бути пов'язаним також з наявністю певної кількості залишкового аустеніту після низького відпуску.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Попередня термічна обробка поковок – пом'якшуючий сфероїдизуючий відпал, при якому забезпечується розчинення певної частини карбідної фази в аустеніті та утворення зернистого перліту. Сталь із структурою зернистого перліту забезпечує хорошу продуктивність різання та якість оброблюваної поверхні при обробці заготовок на верстатах-автоматах. Однорідний дрібнозернистий перліт є оптимальною вихідною структурою для наступного загартування, тому що глобулярна форма та рівномірний розподіл карбідів найкращим чином відповідає оптимальному за міцністю та в'язкістю структурного стану сталі після загартування (дрібні карбідні глобули рівномірно розподілені в мартенситі). Твердість після відпалу сталей В1-В8 знаходиться в межах HB179...217.

Готові деталі підшипників піддають ступінчастому або ізотермічному загартування від 850...900 °С. Вибір такої температури нагрівання обумовлений, з одного боку, необхідністю розчинити карбіди хрому в аустеніті, а з іншого – не допустити надмірного зростання зерна аустеніту. Крім того, підвищення температури загартування призводить до істотного зниження мартенситної точки M_n і, як наслідок, до утворення залишкового аустеніту, що для підшипникових сталей небажано.

В даний час застосовується як загартування в одному охолоджувачі, так і ступінчасте або ізотермічне загартування з витримкою в області утворення нижнього бейніту при 210...240 °С. Для марганець містять сталей ізотермічну загартування не застосовують через надмірно високу стійкість переохолодженого аустеніту в бейнітної області. Дуже перспективне застосування для загартування деталей підшипників індукційного нагріву. Це збільшує продуктивність та економічність термічних агрегатів, а також дозволяє отримати повністю загартований поверхневий шар із збереженням високої в'язкості серцевини. Твердість поверхні за будь-якого способу загартування повинна бути на рівні HRC 60...66.

Остаточною операцією термічної обробки підшипникових сталей є низькотемпературна відпустка, мета якої – зменшення гартівних напружень.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Завдяки йому досягається підвищення в'язкості (за рахунок зменшення тетрагональності мартенситу та внутрішніх напружень), розмірна та структурна стабільність деталей. Відпуск деталей підшипників із сталі В2-В5 здійснюють при 150...165 °С, а зі сталей В6 та В7 – при 165...175 °С. Після остаточної термообробки твердість кілець та роликів зі сталі В2-В5 повинна бути в межах HRC 61...65, а зі сталі В7 - у межах HRC 60...64. Мікроструктура є прихованокристалічний мартенсит відпустки і рівномірно розподілені глобулярні надлишкові карбіди хрому. Зміст залишкового аустеніту має бути мінімальним.

Параметри гартування для підшипникової сталі 100CrMnSi6-4, зокрема температура аустенізації, швидкість охолодження та метод, критично визначають кінцеву структуру мартенситу, залишкового аустеніту та карбідів, визначаючи необхідну високу твердість, зносостійкість та стабільність розмірів. Оптимальне охолодження, зазвичай у мінеральній олії, забезпечує високу твердість, тоді як надмірні температури спричиняють утворення грубих зерен, а повільніше охолодження сприяє небажаному бейніту.

Вплив параметрів гартування може суттєво позначитись на змінах структури та властивостей підшипникової сталі. Особливо впливають температура аустенізації та її час, швидкість охолодження, ступінь розчинення карбідної фази та деформації в процесі нагріву та охолодження.

Температура аустенізації (830...870 °С): Цей діапазон забезпечує належне розчинення легуючих елементів та карбідів. Нижчі температури спричиняють неповну аустенізацію та зниження твердості, тоді як вищі температури призводять до надмірного розчинення карбідів, більшого залишкового аустеніту, збільшення укрупнення зерен та зниження зносостійкості.

Швидкість охолодження (гартуюче середовище): Швидкість охолодження повинна бути достатньо швидкою, щоб запобігти перлітному перетворенню, що призводить до утворення дрібного мартенситу. Мінеральна

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

олія зазвичай використовується для досягнення бажаної твердості (мінімум 64 HRC), одночасно зменшуючи ризик розтріскування порівняно з водою.

Розчинення карбідів – теж важливий показник. Розчинення карбідів під час нагрівання підшипникових сталей впливає на перенасичення мартенситом. Підвищене розчинення за вищих температур збільшує вміст вуглецю в аустеніті, впливаючи на кінцеву крихкість.

Контроль деформації: щоб мінімізувати деформацію, що має вирішальне значення для кілець підшипників, теплопередача має бути рівномірною, щоб запобігти надмірним тепловим градієнтам. Аустенізацію можна використовувати для кращої розмірної стабільності порівняно з мартенситним гартуванням.

Додаткові методи обробки: кріогенна обробка (наприклад, -185 °C) іноді використовується після гартування для зменшення залишкового аустеніту та підвищення зносостійкості, тоді як відпуск при 150...180 °C зменшує крихкість.

1.5. Особливості процесів гартування кілець роликів підшипників

Термічна обробка кілець підшипників пов'язана з ризиком деформацій, спричинених внутрішнім напруженням. Для усунення внутрішнього напруження після загартування проводиться відпуск. Загалом, відпуск знімає напруження. Однак цього відпуску недостатньо для усунення напруження в так званих тонкостінних кільцях підшипників. У процесах зміцнюючої термообробки важливим є зменшення напружень у тонкостінних кільцях підшипників, виготовлених зі сталі 100Cr6, шляхом оптимізації їхньої термічної обробки.

Виробництво роликів підшипників – це складний виробничий процес. Незважаючи на те, що його специфічні виробничі операції широко відомі та усталені, деякі операції у виробництві підшипників повинні виконуватися в межах вузьких допусків, починаючи від кількох мікрометрів,

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

щоб відповідати вимогам аналізу допусків, проведеного перед виготовленням деталей, щоб гарантувати, що клієнти отримують якісний продукт, який впливає на безпеку експлуатації установки, а отже, і на безпеку людей. Виробництво включає низку операцій, необхідних для виготовлення кілець, тіл кочення та сепараторів. Воно включає початкове кування поковок, токарну обробку, термічну обробку, різання, формування, шліфування, миття деталей, їх опис, складання компонентів підшипників та упаковку. Під час виробничого процесу проводиться низка профілактичних, внутрішньоопераційних та остаточних перевірок, а також розмірних, хімічних, металургійних, витривалих та інших випробувань

Експериментальна програма прискореної карбідної сфероїдизації спрямована на значне скорочення часу, необхідного для створення мікроструктури сталі, що складається з феритної матриці та глобулярних карбідів. Традиційним способом отримання такої структури є тривалий м'який відпал після гарячого формування напівфабрикату. Дослідження прискореної карбідної сфероїдизації показало, що сфероїдизувати пластинчастий перліт можна термомеханічним або термічним обробленням протягом кількох хвилин. Термомеханічна обробка полягає у формуванні за температур навколо температури A_{c1} , тоді як термічна обробка базується на циклічному зміні температури навколо температури A_{c1} . Процес виробництва підшипників можна значно скоротити, відмовившись від традиційного тривалого м'якого відпалу. Крім того, напівфабрикати оброблятимуться один за одним за допомогою процесу прискореної карбідної сфероїдизації. Це не пакетний процес, як традиційний м'який відпал, де велика кількість матеріалу відпалюється в печі одночасно. Це дозволяє контролювати та контролювати технологічні параметри для кожного конкретного виробу та адаптувати процес до обробки невеликих серій різних матеріалів. З морфологічної точки зору, прискорена сфероїдизація карбіду створює мікроструктури, дуже схожі на ті, що утворюються в результаті звичайного м'якого відпалу, але частинки карбіду та розмір зерна матриці значно менші. Більш дрібна мікроструктура

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

призводить до вищої твердості, ніж у сталі, відпаленої традиційним способом. Більш дрібна мікроструктура також призводить до більш однорідної та дрібної структури після остаточної термічної обробки – процесу гартування. Цей факт вказує на те, що механічні властивості кінцевого продукту залежать від попередньої структури, отриманої в результаті м'якого відпалу. Більш дрібні карбіди в структурі підвищують твердість та зменшують ризик утворення тріщин на межі між карбідом та матрицею. У цій статті порівнюються мікроструктури та механічні властивості загартованої сталі після різних видів м'якого відпалу.

1.6. Мета та завдання кваліфікаційної роботи

Зміцнююча термічна обробка кілець конічних підшипників є складним виробничим процесом, декількома важливими параметрами. У цьому випадку недостатньо впроваджувати лише стандартні методи та робочі практики; їх необхідно модифікувати або оптимізувати. Однією з таких вимог є запит на виготовлення підшипників, необхідних для багатьох виробничих застосувань і стабільними характеристиками. Необхідно модифікувати зовнішнє кільце, внутрішнє кільце та тіла кочення, тому вимоги до деталей відповідно високі. Всі модифікації, необхідні для коригування технологічного процесу виробництва з метою задоволення сучасних вимог, хоча всі вони взаємопов'язані, впливають одна на одну та представляють бажаний результат цільової модифікації. В бакалаврській роботі досліджуються параметри сталі 100CrMnSi6 6, на які може впливати термічна обробка матеріалу, щоб уникнути небажаних деформацій матеріалу та дотримуватися суворіших вимог щодо овальності внутрішніх та зовнішніх кілець конічних підшипників кочення.

Розглядаються процеси термічної обробки деталей підшипників з відповідними перевірками та випробуваннями (розмірні, хімічні, метрологічні та випробування на витривалість), а технологічні аспекти виробництва кілець

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

підшипників обговорюються в однобічному аспекті, без належного розширення можливого впливу параметрів на якість термічної обробки.

Метою роботи було оптимізація процесу гартування та відпуску підшипникової сталі 100CrMnSi6 6 для усунення або запобігання небажаним деформаціям матеріалу та забезпечення відповідності суворішим вимогам до овальності кілець конічних підшипників.

Основним завданнями роботи є дослідження макро та мікроструктури підшипникової сталі 100CrMnSi6 в залежності від параметрів відпалу та зміцнюючої термічної обробки, оцінка властивостей сталі, насамперед твердості зразків, оптимізація параметрів термічної обробки сталі на основі отриманих результатів дослідження та його аналізу.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Підготовка зразків для проведення досліджень

Для виготовлення прутків використовують підшипникова сталь гарячекатана, кругла, діаметром 65 мм, звичайної точності прокатування класу В4 по ДСТУ ISO 683-17:2008, марки 100CrMnSi6, невідпалена, для гарячої обробки тиском та кування. За формою та розмірами, граничними відхиленнями сталь повинна відповідати вимогам для гарячекатаної круглої сталі класу В4.

Сталь повинна виготовлятися довжиною: 2,8...4,0 м гарячекатана кругла діаметром до 65 мм; 2,0...4,0 м – гарячекатана кругла діаметром вище 65 мм (рисунок 2.1). Допускаються прутки діаметром чи товщиною до 65 мм не коротший 2 м монопрокат в кількості не більше 10 % маси партії. За вимогою споживача для виготовлення кілець підшипників на автоматичних лініях, кривина гарячекатаних прутків не повинна перевищувати 0,2 % довжини. Кривина прутків каліброваної сталі не повинна перевищувати: для прутків діаметром вище 65 мм 0,1 % довжини. Кінці прутків, мотків, стрічок гарячекатаної, каліброваної і сталі зі спеціальною обробкою поверхні повинні бути обрізані чи обломані без згинів чи заусенців.



Рисунок 2.1 – Прокат сталі 100CrMnSi6

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Гарячекатана невідпалена сталь діаметром чи товщиною до 100 мм включно, калібрована і сталь зі спеціальною обробкою поверхні, призначена для кування, штампування повинна витримувати випробовування на осадку. Гарячекатану сталь випробовують в гарячому стані, а калібровану і з спеціальною обробкою поверхні – в холодному стані. На осаджених зразках не повинно бути розкритих дефектів, що оцінюється візуально.

Відпалена гарячекатана, калібрована і сталь зі спеціальною обробкою поверхні повинна мати твердість $HV=1800\ldots2200$ МПа (діаметр відбитка 4,5...4,2 мм), зокрема для класів (номерів) В1-В6. В макроструктурі готового металу не повинно бути слідів усадочної раковини, розшарувань, флокенів, чужорідних включень, які видно без застосування збільшувальних приладів.

Сталь марки 100CrMnSi6 поставляється з нормованою величиною дефектів, наявність яких може визначаються у виробках магнітним методом та візуальними дослідженнями поверхні макрошліфів.

Мікроструктура гарячекатаної відпаленої сталі в прутках діаметром до 100 мм, сталі зі спеціальною обробкою поверхні і каліброваної сталі повинна складатися з рівномірно розподіленого дрібнозернистого перліту, та не перевищувати балу 4 – для сталі марки 100CrMnSi6.

Сталь перевіряється на забрудненість неметалевими включеннями максимальним балом по шкалі 1, 2, 3 стандарту і повинна відповідати нормам. Це перевіряли по нетравленій поверхні зразків.

Мікроструктуру в гарячекатаній відпаленій, каліброваній сталі, та сталі зі спеціальною обробкою поверхні слід перевіряти на поперечних зразках. Зразки для виготовлення шліфів вирізали у вигляді шайб товщиною 20...40 мм та стрижнів, висотою до 20 мм (рисунок 2.2). Шліфи сталі діаметром чи товщиною до 40 мм слід виготовляти по всьому поперечному січенню, а діаметром чи товщиною вище 40 до 85 мм – на вирізаній із шайб однієї четверті січення.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.2 – Зразки сталі 100CrMnSi6

для проведення досліджень

Рекомендується шліфи травити в свіжоприготовленому 2...4 % спиртовому розчині азотної кислоти чи в розчині пікринової кислоти.

2.2. Методика дослідження макро- та мікроструктури зразків

Грубі дефекти, такі як усадочні раковини, усадочна рихлість, флокени, плямиста ліквация, крупні не металічні включення в макроструктурі прутків не допускається. Ці дефекти викликають появу тріщин при гарячій і холодній пластичній деформації підшипникової сталі, при термічній обробці, а також руйнування деталей у процесі експлуатації.

Грубим дефектом макроструктури є мікропори. Вони зустрічаються в центральній частині прутків. Мікропори представляють собою осьовий перепад, в зоні якої розриви орієнтовані по ліквацийній смугах мікроструктури. Менш небезпечні макродефекти, до яких відносяться точкова неоднорідність, центральна пористість і ліквацийний квадрат, є наслідком хімічної неоднорідності зливка яка викликана внутрішньодендритною і міждендритною ліквациєю. Найбільш грубим дефектом макроструктури є розшарування, викликане як дефектами заготовок, так і порушеннями режимів кування.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Більшість дефектів макроструктури є концентраторами напружень і центрами зародження втомлювальних тріщин в процесі експлуатації підшипників.

Для оцінки макровключень (умовно розміром більше 1 мм.) використовують такі методи: механічне ступінчате обточування, дослідження зломів загартованих зразків, травлення повздовжніх і поперечних макротемплетів, зняття сірчаного відбитка, магнітна дефектоскопія і ультразвуковий контроль.

Зразки для виготовлення мікрошліфів вирізали у вигляді стрижнів, висотою до 20 мм (рисунок 2.3). Діаметр мікрошліфів намагались обмежити до 10...20 мм, що спрощувало підготовку поверхні. Для досягнення потрібної якості експерименту окремі зразки виріували з різних зон прокату.

Макровключення та їх скупчення можуть бути виявлені у вигляді темних чи світлих ниток у зломах поперечних і повздовжніх напрямленню деформації зразків. Методика підготовки проб і характеристики зломів виконувалась у відповідності до стандартів. До найбільш широко розповсюджених методів належить метод хімічного травлення поперечних чи повздовжніх напрямленню деформації макротемплетів. Виявлені на поперечних темплетях після травлення неметалічні включення можуть бути оцінені по шкалах центральної пористості і точкової неоднорідності.



Рисунок 2.3 – Зразки сталі 100CrMnSi6
для мікроаналізу

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Одним із різновидів методу хімічного травлення є метод сірчаного відбитку, який дає можливість визначити розподілення і розміри сульфідних включень в сталі. Найбільш досконалим методом неруйнівного контролю макровключень в сталі є ультразвуковий контроль прокатої чи прокованої заготовки по всій її довжині, інколи поперечних макротемплетів. Виявляються дефекти розміром 1 мм і більше. Встановлена можливість ультразвукового контролю неметалічних включень розміром менше 1 мм.

Мікроструктура відпаленої сталі досліджується з метою визначення дисперсності карбідів, характеру їх розподілення, виявлення карбідної ліквідації, карбідної сітки, смугастості і знеуглецьовування. Ці показники мікроструктури нормуються стандартами і технічними умовами.

Мікроструктуру виявляють травленням в 2...4 % спиртовому розчині азотної і пікринової кислоти. Найбільш сприятливою є структура зернистого перліту. Степінь дисперсності карбідів надає вплив на оброблюваність сталі. Досить дрібний чи точковий зернистий перліт сприятливий для отримання однорідного мартенситу з рівномірно розподіленим вуглецем в твердому розчині, але гірше піддається обробці різанням. Крупнозернистий перліт легко піддається обробці різанням, але внаслідок збільшення відстані між карбідами погіршує рівномірність розподілення вуглецю в аустеніті при послідовному нагріві.

Внаслідок великої ліквідації хрому і вуглецю в сталі 100CrMnSi6 виникає карбідна неоднорідність, яка виявляється у вигляді карбідної ліквідації, карбідної смугастості, структурної смугастості. Ще один вид неоднорідності – карбідна сітка. Вона викликається температурними режимами прокочування і термічної обробки, та зв'язана також з дендритною ліквідацією.

Вказані дефекти виявляються після загартування сталі мартенсит, низькотемпературного відпуску і спеціального травлення шліфів. Карбідна ліквідація представляє собою грубі скупчення крупних карбідів в прокатаній сталі, розміщених у вигляді коротких стрічок вздовж прокочування.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Піддавши зразки сталі 100CrMnSi6 з великим балом карбідної ліквації загартуванню з 1150 °С і, отримавши замість суцільних згустків карбідів евтектичні утворення, можна визначити як ділянки метастабільного ледебуриту будуть розташовуватися в структурі сталі. Карбідна смугастість представляє собою смуги з великою концентрацією вторинних карбідів, витягнутих вздовж напрямлення прокочування. Карбідна смугастість виявляється при травленні мікрошліфа, вирізаного вздовж осі прокочування, до темного фону, на якому чітко видно лише карбіди.

Структурна смугастість – це почергові світлі і темні смуги мікроструктури, які виявляються також на повздовжніх шліфах при звичайному чи більш довшому (до 0,5 хвилини) травленні загартованої і низьковідпущеної сталі в свіжоприготовленому 4 % спиртовому розчині азотної кислоти. Іншим проявленням неоднорідності розподілення карбідів є карбідна сітка, яка утворюється в результаті сповільненого охолодження прокочування.

З метою зниження структурної смугастості, видалення карбідної ліквації і карбідної сітки, що виникає в смугастій структурі, кількість сталі електрошлакового і вакуумного переплавлення піддають гомогенізуючому нагріву в зливках чи заготовках по ступінчатому нагріву.

2.3. Термічна обробка зразків сталі В4 (100CrMnSi6 6)

Гартування підшипникових сталей – це технологічний процес, спрямований на отримання високої твердості, зносостійкості та контактної міцності. Підшипникові сталі зазвичай відносяться до заевтектоїдних сталей (містять біля 1 % вуглецю та 1...2 % хрому). Основні етапи гартування підшипникових сталей: нагрівання (аустенізація): заготовки нагрівають до температури 820...840 °С. Ця температура забезпечує перетворення структури на аустеніт із частковим розчиненням карбідів. Витримка необхідна для повного прогріву деталі та вирівнювання температури по всьому перетину.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Для підшипникових сталей зазвичай використовують охолодження в маслі. Це дозволяє уникнути тріщин та деформацій, які можуть виникнути при охолодженні у воді, забезпечуючи перетворення аустеніту на мартенсит. Структура після гартування: мартенсит гартування з нерозчиненими карбідами. Одразу після гартування проводиться низький відпуск (зазвичай при температурі 150...170 °С) для зняття внутрішніх напружень без суттєвого зниження твердості. Кінцева твердість підшипникових деталей після гартування та відпуску зазвичай становить 58...64 HRC.

Розчинення карбідів під час нагрівання до температури гартування має значний вплив на перенасичення мартенситом та результуючі механічні властивості. На кінетику розчинення можуть впливати різні зовнішні фактори. Температура аустенізації визначає ступінь розчинення цементиту і, отже, вміст вуглецю в аустеніті, а отже, кінцеві властивості після гартування. Тому у роботі використовували різні температури нагріву зразків перед гартуванням їх в оливі (рисунок 2.4). Від рекомендованої номінальної 820 °С, температуру підвищували до 880 °С, з кроком 20 °С. Це дозволило встановити вплив температури аустенізації на розчинення карбідної фази в γ -залізі.

Отримані механічні властивості визначаються, головним чином, мікроструктурним станом, розподілом внутрішніх напружень перед гартуванням, рівномірністю нагрівання до температури аустенізації, умовами аустенізації та охолодженням від температури аустенізації.

Спосіб нагрівання впливає на результуюче окислення та зневуглецювання поверхні. Під час нагрівання слід уникати локального перегріву та неповного витримування, оскільки вони призводять до утворення тріщин під час охолодження. Умови аустенізації, тобто температура аустенізації та витримка при температурі аустенізації, впливають на якість загартованих компонентів підшипників. Вибраний час витримки залежить від форми та матеріалу компонента, методу його нагрівання та базової мікроструктури. Витримка при температурі аустенізації має менший вплив, ніж значення температури.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

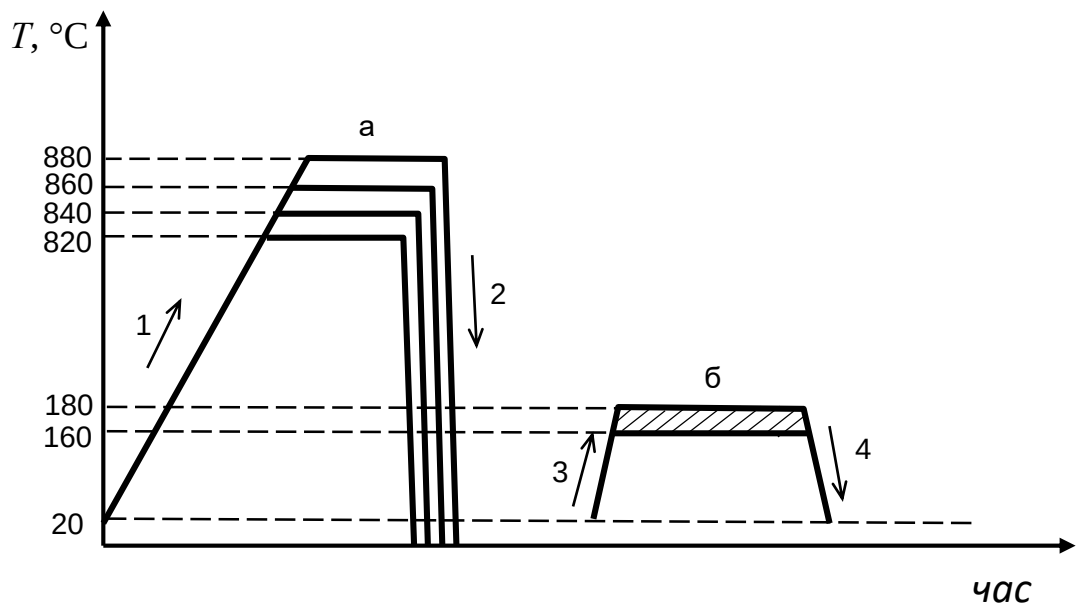


Рисунок 2.4 – Режим термічної обробки сталі 100CrMnSi6:

1 – нагрівання; 2 – охолодження в оливі (гартування); 3 – нагрівання; 4 – охолодження на повітрі; а – гартування (витримка до 0,5 години); б – відпускання (витримка 1,0 годину).

Результати гартування також залежать від швидкості розсіювання тепла. Для підшипникової сталі швидкість охолодження має бути дуже високою для діапазону температур приблизно 650 °C і нижче. Ефективність охолодження різних середовищ залежить головним чином від теплопровідності, питомої теплоємності, теплоти випаровування, в'язкості гартуючого середовища та кількості розчинених газів. Процес охолодження у воді відбувається дуже швидко і використовується для гартування кульок підшипників. У воду додають різні інгредієнти; деякі з яких збільшують охолоджувальну здатність, а деякі – уповільнюють її.

Для кілець конічних підшипників зі сталі 100CrMnSi6, як охолоджувальне середовище під час гартування, доцільно застосовувати рідкі мінеральні оливи. Це викликано потребою більш помірного м'якого охолодження в процесі гартування. Менші гартівні напруження менше спотворюють геометрію цих деталей в порівнянні з роликами чи кульками.

2.4. Методи оцінки механічних властивостей зразків

В роботі для оцінювання впливу термічної обробки на властивості зразків сталі 100CrMnSi6 використовували переважно методи вимірювання поверхневої та об'ємної твердості. Для цього загартовані зразки шліфували та певну їх кількість піддавали розрізанню навпіл з метою оцінки об'ємної твердості.

Твердість як здатність матеріалу чинити опір локальному пластичному деформуванню може свідчити про рівень його властивостей. Зокрема відомо, що чим вища твердість зразка, тим менша його пластичність, і навпаки. Але цей характер залежності властивий лише матеріалам металевої природи, яким є сталь 100CrMnSi6. Методи визначення твердості в матеріалознавстві мають декілька переваг в порівнянні з іншими методами механічних випробувань металу. Це, зокрема, простота техніки підготовки зразків та виконання самого вимірювання, швидкість випробувань, простота форми та невеликі розміри зразків. Також важливим є можливість проведення випробувань безпосередньо на виробі без його руйнування.

В роботі застосовували універсальний прилад для вимірювання твердості металів фірми NOVOTEST. Методика вимірювання твердості стаціонарним твердоміром NOVOTEST ТС-БРВ заснована на методах Бринеля, Роквела та Віккерса. Всі вони виконуються зануренням індентора с заданим навантаженням та вимірюванням параметрів відбитку або глибини вдавлювання індентора. Перевагою цього сучасного приладу є використання багатоступінчатого тестового навантаження та можливість застосування різних інденторів (алмазний конус 120° , кульки 1,5875...5,0 мм). Це дає можливість визначення твердості за відповідними шкалами: HRC, HB, HV.

Для належної роботи твердоміру та виконання точних вимірювань необхідно дотримуватись певної методики. Спочатку слід підготувати відповідні зразки, їх поверхня має бути плоскою, чистою та рівною. Для методу Віккерса поверхню зразка слід піддати поліруванню.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Перед здійсненням вимірювань слід вибрати метод: Бринель, Роквел чи Віккерс. Далі встановити відповідний індентор та випробувальне навантаження на нього. Для виконання вимірювання зразок встановлювали на столик твердоміру, після чого піднімали його до контакту з індентором (рисунок 2.5). Далі після увімкнення режиму вимірювання прилад автоматично прикладає на індентор попереднє та основне навантаження.



Рисунок 2.5 – Вимірювання твердості
на твердомірі NOVOTEST TC-BPV

Час навантаження на індентор автоматично регламентується приладом, в залежності від вибраного методу вимірювання. За вимірювання твердості за методом Роквела її значення зчитують прямо с РК-екрану приладу. Використовуючи методи Бринеля чи Віккерса число твердості обраховують за діаметром чи діагоналлю відбитка індентора, які визначають за допомогою вбудованого мікроскопа (збільшення: $\times 37,5$, $\times 75$). Розрахунок твердості виконується автоматично в цифровій версії приладу.

Для оцінки стійкості поверхні загартованих зразків проти спрацювання в умовах локального контактного навантаження, що є важливим для доріжок кочення підшипників, в роботі використовували випробування на знос за схемою "кулька на диску" (рисунок 2.6). Цей тип випробування часто застосовують для підшипникових сталей а стандартом ASTM G99 "Метод випробування на знос методом штифта на диску".

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

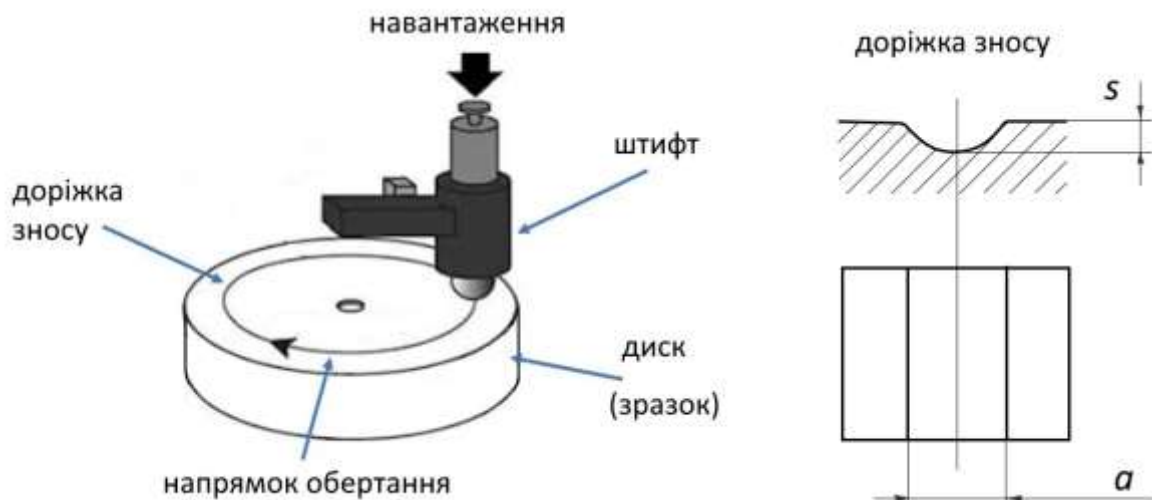


Рисунок 2.6 – Схема випробування на контактну стійкість згідно стандарту ASTM G99

Випробування на зносостійкість за стандартом ASTM G99 проводили на машині Mechmatics CFT-1 (рисунок 2.7).

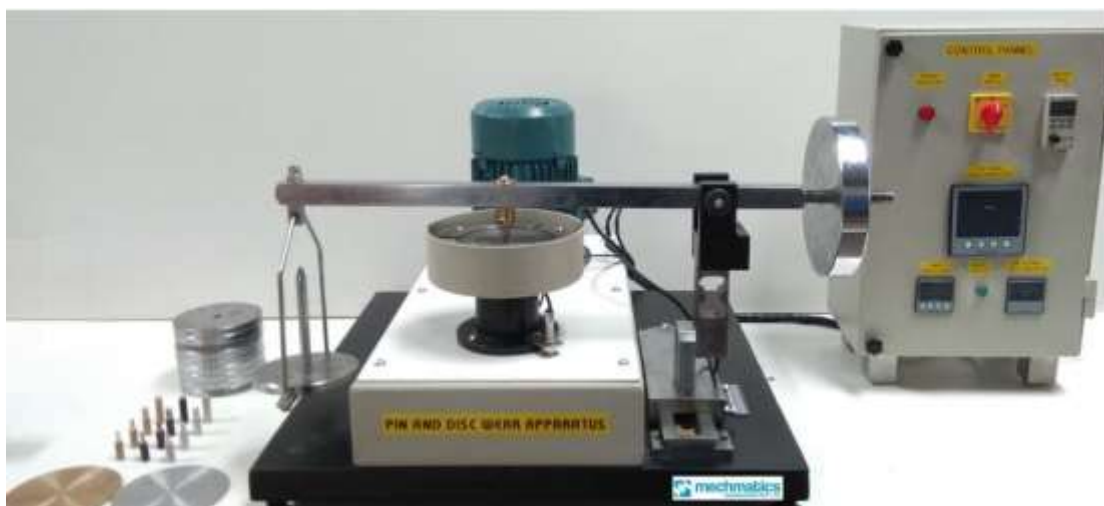


Рисунок 2.7 – Вигляд випробувальної машини Mechmatics CFT-1 для випробування за схемою «штифт на диску»

Машина «штифт на диску» – це класичний трибологічний випробувальний прилад, призначений для вивчення тертя, зносу та контактної поведінки матеріалів в контрольованих умовах ковзання. Як контактне тіло використовували штифт з контактним накінецьником у вигляді кулі, вертикально завантажений на обертовий горизонтальний диск, для імітації реальних ковзних контактів. Прилад оснащений системою навантаження, яка

мінімізує вплив інерції на тертя та реакцію на знос, що робить його придатним для сухих, змащених та розширених контактних випробувань.

Випробування проводили за швидкості обертання зразка 600 об/хв, радіус тестової доріжки тертя становив 10 мм, вагове навантаження на штифт становило 10 Н. Доріжка тертя змащувалась рідкою мінеральною оливою. Час випробування становив 30 хв.

Такий режим випробувань дозволяв виконати відносно порівняння стійкості поверхні дискових зразків сталі 100CrMnSi6, що гартувались за різних температур. Відносною величиною стійкості поверхні під час трибоконтакту була ширина доріжки чи канавки тертя a . Цю ширину визначали за допомогою мікрометричного монокулярного мікроскопу, а принципом вимірювання відбитків при вимірюванні твердості металів а Бринелем. Більшу стійкість мали зразки, для яких параметр a мав менше значення.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

РОЗДІЛ 3

ВІДПАЛЮВАННЯ ЗАГОТОВОК СТАЛІ В4 ПІСЛЯ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ

3.1. Структура формованих заготовок сталі В4 (100CrMnSi6 б)

Заготовками кілець підшипників як правило є ковані та штамповані заготовки у вигляді поковок. Більшість поковок кілець для малих та середніх підшипників кочення виготовляють гарячим куванням з прокату сталі на прес-автоматах.

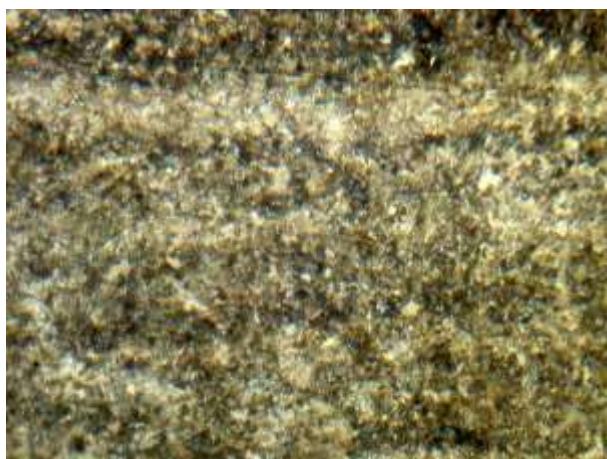
Поковки кілець підшипників – це металеві заготовки, виготовлені методом гарячого або холодної деформації (ковані або штамповані), які служать основою для виготовлення зовнішніх і внутрішніх кілець підшипників кочення. Вони забезпечують високу міцність і довговічність деталей завдяки подрібненню складових структури сталі та формуванню спрямованої структури металу. Виробництво включає етапи осадження, попереднього формування, остаточного формування та розкочування (для отримання кільцевої форми).

Структуру зразків сталі 100CrMnSi6 після впливу пластичного формування вивчали з метою порівняння впливу деформації на початковий стан металу. Як відомо пластична деформація суттєво впливає на структуру сталей. Леговані хромом високовуглецеві підшипникові сталі під час гарячої пластичної деформації зазнають істотного подрібнення карбідної фази, що важливо для їх подальшої термічної обробки. Це стосується як процесів відпалювання для отримання однорідної тонкодисперсної структури зернистого перліту сталі, так і для виконання зміцнюючої термічної обробки, а саме гартування для отримання структури мартенситу з дисперсними карбідами, що забезпечує потрібні експлуатаційні властивості сталі.

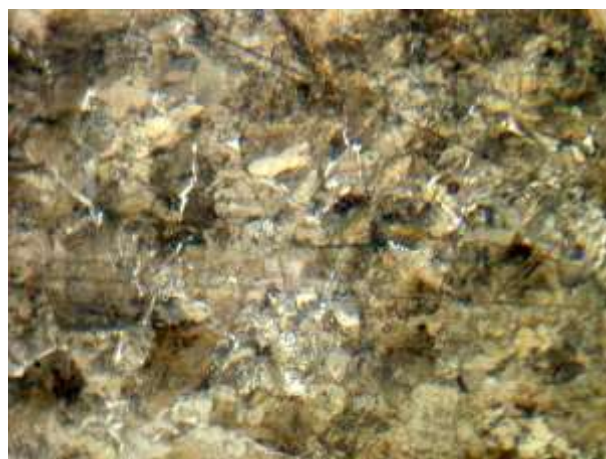
Пластичну деформацію зразків сталі 100CrMnSi6 здійснювали від температур 1000...1050 °С, що забезпечувало їх рівномірне проковування.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Дослідження структури прокованих зразків (рисунок 3.1) показало можливість подрібнення безперервно литої заготовки підшипникової сталі.



а



б

Рисунок 3.1 – Структура сталі 100CrMnSi6 після гарячого деформування:

а – збільшення $\times 100$; б – збільшення $\times 500$

За невеликих збільшень мікроскопу можна спостерігати незначну структурну неоднорідність зразків сталі. У зонах більш інтенсивного деформування спостерігається краща проробка структури перлітної складової з подрібненням ферито-цементитної суміші прокату сталі. Це чітко фіксували, використовуючи більші збільшення мікроскопу в процесі спостереження структури сталі.

Отже, гаряче деформування доцільно застосовувати не лише для формування заготовок, а і для проробки структури прокату сталі чи литих заготовок. Ефект пластичної деформації для сталі 100CrMnSi6 полягає в подрібненні структурних складових та отриманні більш дисперсної структури карбідної фази.

3.2. Вплив відпалювання на структуру зразків

Відпал поковок кілець підшипників кочення виконують з метою зняття напружень та формування рівноважної структури підшипникової сталі, придатної для досягнення оптимальних структурних перетворень у процесі гартування. Важливим явищем процесу відпалу є подрібнення перліту, і

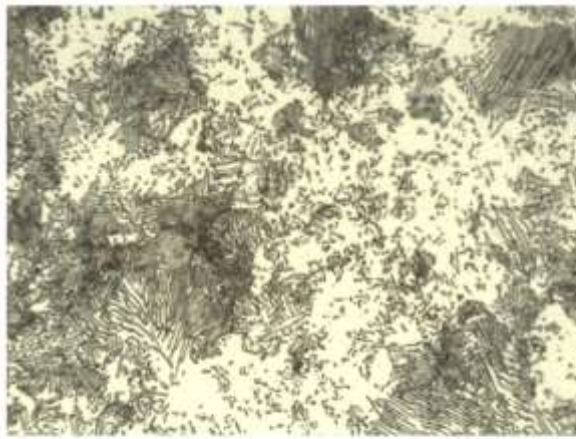
головне, сфероїдизація карбідної фази цієї структурної складової. Зернистий перліт є ідеальною структурою для підшипникових сталей перед процесами гартування. Це свого роду підготовка структури для отримання дрібнокристалічного мартенситу при наступному гартуванні. Також таке відпалювання зменшує твердість для покращення обробки різанням (точіння) кілець підшипників. Після правильного відпалу твердість підшипникової сталі становить близько $HV=1700...2070$ МПа, що є оптимальним для механічної обробки.

Для отримання ідеальної структури зернистого перліту іноді застосовують циклічний відпал. Проте, такий процес відпалу є дуже витратним по часу, енергетичним та експлуатаційним затратам. Тому в роботі виконували звичайний сферодизуючий відпал з різним часом витримки зразків сталі 100CrMnSi6 при типовій температурі відпалювання для підшипникових сталей $770...790$ °C. Час витримки змінювали в межах від 2 до 11 годин, з кроком 3 години.

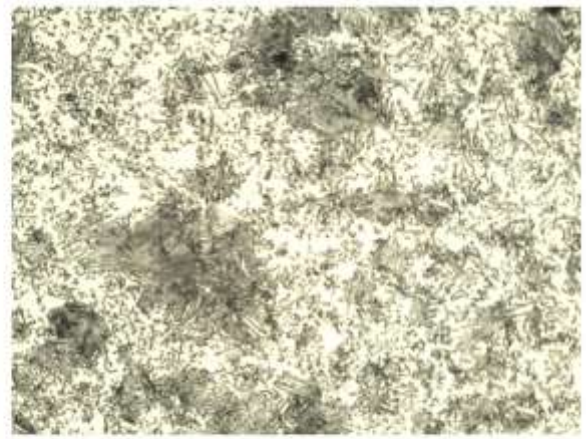
На рисунку 3.2 представлені фрагменти структури відпалених зразків сталі 100CrMnSi6 після різної тривалості витримки за температури відпалу $770...790$ °C. Як видно з представлених структур значного подрібнення структури перліту та отримання практично глобулярного перліту можна отримати лише за тривалого відпалювання зразків сталі, протягом 11 годин. Такий процес є досить енергозатратним в умовах виробництва. Тому в роботі додатково оцінювали вплив відпалу на співвідношення часток подрібненого цементиту, що не зазнав повної сфероїдизації.

Як відомо для повної сфероїдизації цементиту перліту сталей необхідні великі витримки за критичних температур. В експерименті намагались досягнути подрібнення пластин цементиту в перліті, що оцінювали за зміною параметра співвідношення довжини до товщини пластини в січенні шліфа (рисунок 3.3). Для цього використовували параметр k , яким можна було характеризувати ступінь сфероїдизації, коли $k \rightarrow 1$ (ідеальна сфера).

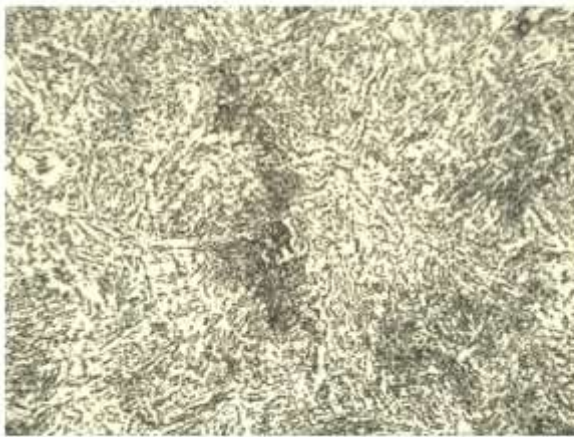
					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36



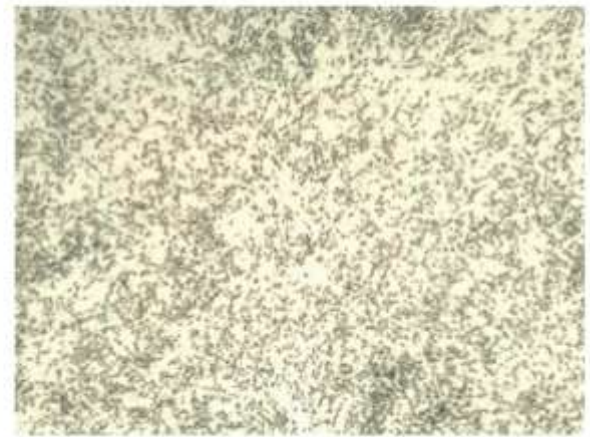
a



б

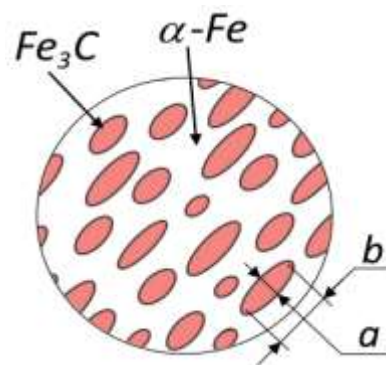


в



г

Рисунок 3.2 – Структура зразків після відпалу при 770...790 °С (х800), час витримки: а – 2 год.; б – 5 год.; в – 8 год.; г – 11 год.



Фрагмент
структури
перліту

$$k=b/a$$

Група включень	<i>k</i>
1	1...3
2	3...6
3	6...10
4	10...20
5	>20

Рисунок 3.3 – Визначення ступеня компактності часток цементиту (параметр форми *k*)

За структурами відпалених разків, в залежності від параметра форми часток Fe_3C , визначали об'ємне співвідношення в структурі сталі відповідних груп часток (рисунк 3.4). Як видно з представлених на гістрограмах результатів, час витримки суттєво впливає на процес сфероїдизації карбідів сталі 100CrMnSi6. Збільшення часу витримки при відпалюванні до 8...11 годин значно зменшує кількість часток цементиту типової пластинчастої форми, з параметром $k > 10$.

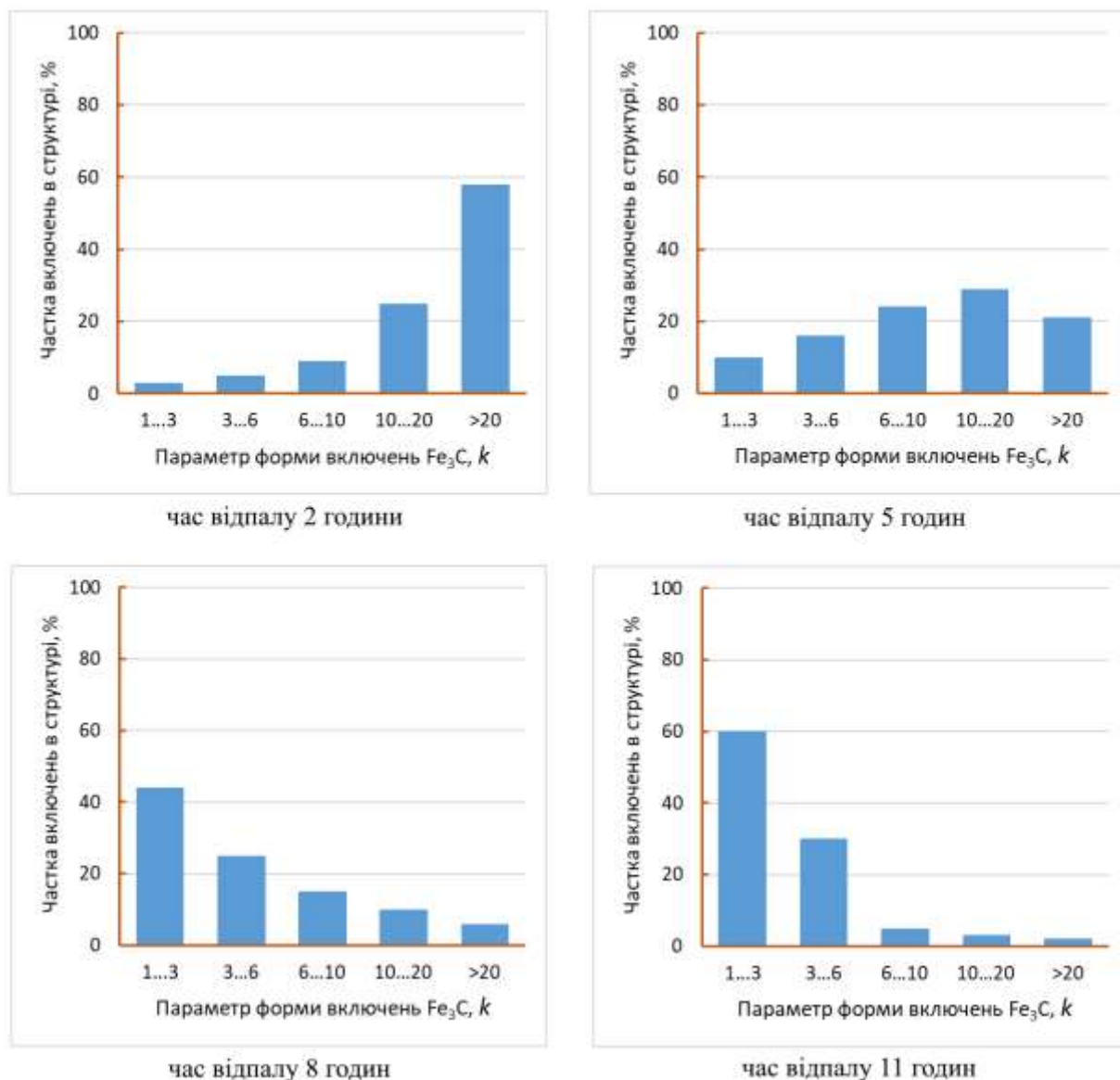


Рисунок 3.4 – Співвідношення об'єму часток цементиту в структурі відпалених зразків з різним ступенем компактності форми k

З практики використання процесів сфероїдизації перліту високовуглецевих сталей відомо, що повної сфероїдизації пластин карбиду

заліза досягнути важко. Разом з тим доцільність цього не завжди виправдана. Для істотного покращення процесу розчинення карбідної фази під час аустенізації перед гартуванням достатньо досягнути ділення пластин цементиту, що є основною метою відпалу. Повна сфероїдизація подрібнених пластин цементиту є недоцільною, що крім всього забирає дуже багато виробничого часу та енергії. Тому аналізуючи кількість часток цементиту з різним параметром форми k , тобто ступенем компактності, можна робити висновок про оптимальну тривалість витримки при температурах відпалювання сталі 100CrMnSi6.

3.3. Твердість зразків після формування та відпалювання

Відпал кованих чи штампованих заготовок з підшипникових сталей приводить до зменшення їх твердості, що помічали в дослідженнях на зразках сталі 100CrMnSi6.

Зменшення твердості кілець підшипників є важливим під час виконання операцій механічної обробки. Менші значення твердості оброблюваних заготовок дозволяють підвищити стійкість металорізального інструменту, що вкрай важливо у підшипниковому виробництві, бо найчастіше таке виробництво є масовим. Отримання зернистого чи змішаного типу перліту також позитивно впливає на стійкість різців при точінні. Глобулярний тип перліту менше затуплює ріжучу робочу частину інструменту.

Після правильного відпалу твердість підшипникової сталі має становити близько $HV=2000$ МПа, що є оптимальним для механічної обробки.

В дослідженнях вимірювали твердість зразків відпаленої сталі 100CrMnSi6 в залежності від часу витримки за температури відпалювання: 2, 5, 8 та 11 годин, відповідно до вибраного режиму відпалу (рисунок 3.5). Характерним є порівняно невеликий спад твердості від її значень, що притаманні деформованим разкам.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

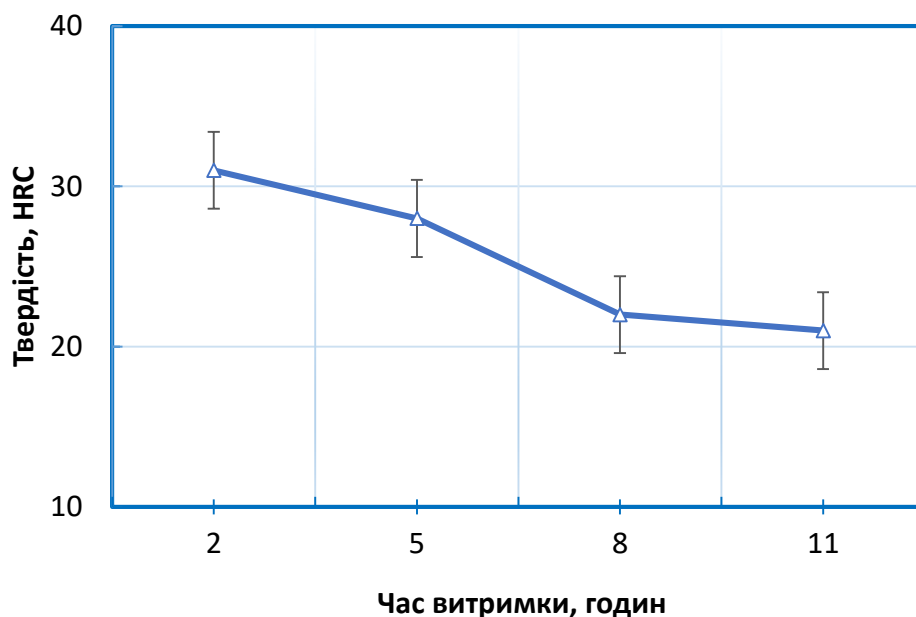


Рисунок 3.5 – Твердість зразків після відпалу при 770...790 °С в залежності від часу витримки.

Як бачимо на відміну від змін структури, зміна твердості досліджуваних зразків від часу витримки під час відпалювання є не такою значною.

Характерним було досягнення рівномірності розподілення значення твердості сталі в об'ємі зразків. Це помічали під час виконання серії випробувань на різних місцях поверхні зразків та вимірювань в їх об'ємі. Для таких вимірювань зразки розрізали в різних напрямках. Об'ємна твердість для зразків з одним часом витримки мало залежала від місця вимірювання.

З отриманих значень твердості та аналізу структури разків можна робити висновок, що оптимальним часом витримки, за використання звичайного відпалу штампованих заготовок сталі 100CrMnSi6, є проміжок 8...11 годин. Підвищення часу витримки ймовірно покращить результати, але такий процес буде надто кропітким, тривалим та невиправданим за енергетичними витратами.

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ ГАРТУВАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА
ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ В4 (100CrMnSi6 6)

4.1. Структура загартованих зразків сталі В4 (100CrMnSi6 6)

Структура підшипникової сталі 100CrMnSi6 зазвичай формується шляхом термічної обробки для досягнення високої втомної міцності, твердості та зносостійкості, головним чином для компонентів підшипників. Остаточна, загартована мікроструктура як правило має складатися з дрібнозернистого мартенситу, невеликої кількості залишкового аустеніту та дисперсних, дрібних сфероїдальних карбідів. У такому випадку характер структури сталі забезпечує високу контактну міцність та експлуатаційну стійкість кілець підшипників кочення.

Процес гартування експериментальних зразків підшипникової сталі 100CrMnSi6 виконували за прийнятою схемою. Зразки, що пройшли відпалювання при температурі 770...790 °С, протягом 8 годин, нагрівали до температур аустенізації: 820, 840, 860, 880 °С. Нагрівання здійснювали об'ємне, у лабораторній камерній печі електричного нагріву. Зразки завантажували в нагріту піч до температури 700 °С, та нагрівали до вибраної температури межі. Для завершення фазового перетворення сталі зразки витримували протягом 1,0 години. Відразу після витримки зразки гартували, занурюючи їх в оливу.

Для прискореного охолодження зразків відразу після нагріву та витримки застосовували оливу FUCHS, фірми THERMISOL, основу якої складають базові мінеральні олійні конденсати. Ці олії часто застосовують для індукційного гартування низько- та високолегованих сталей. Після охолодження зразки промивали очищували та готували для структурного аналізу.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз мікроструктури загартованих зразків сталі 100CrMnSi6 (рисунок 4.1) здійснювали на кожній серії зразків, що проходили гартування від температур, відповідно: 820, 840, 860, 880 °С. Такі дослідження давали можливість оцінити вплив температури гартування, в межах рекомендованого інтервалу аустенізації, на структуру сталі 100CrMnSi6.

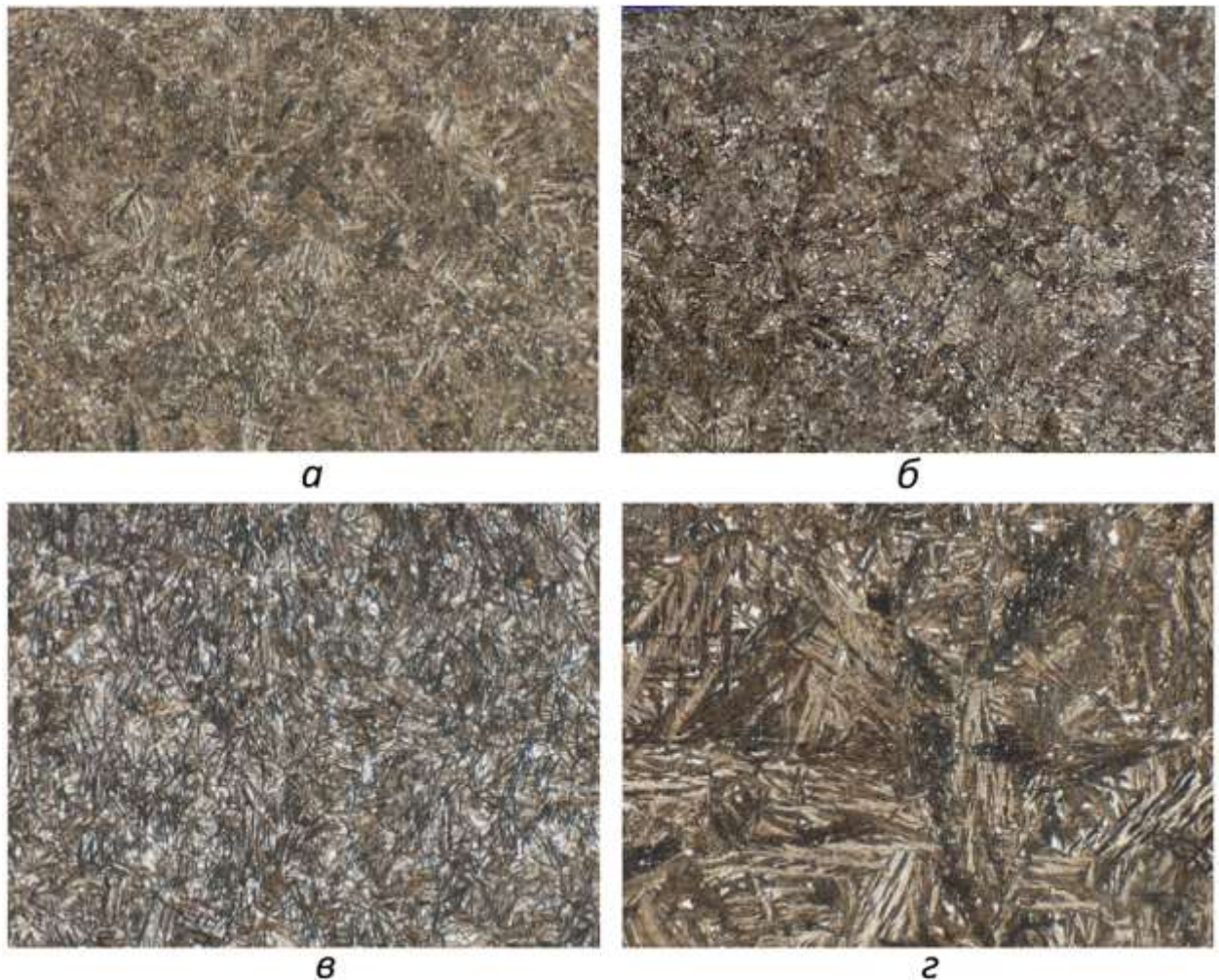


Рисунок 4.1 – Структура зразків сталі 100CrMnSi6 після гартування та відпуску (x800). Температура аустенізації перед гартуванням: а – 820 °С; б – 840 °С; в – 860 °С; г – 880 °С. Температура відпуску 160...180 °С.

Як видно мікроструктура загартованих зразків після відпускання залежить від температури аустенізації. У всіх зразках спостерігали присутність відпущеного мартенситу та дрібних включень карбідів компактної форми. Проте при збільшенні температури аустенізації структура мартенситу стає більш грубішою, що особливо помітно за характером мікроструктури зразків, які гартували від температури 880 °С.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Така ситуація може бути пов'язана як з більшим розчиненням цементиту в аустеніті за високого нагріву, так і з ростом розміру зерна аустеніту. Більші температури нагрівання сприяють більш інтенсивному розчиненню зернистого карбіду заліза. Разом з цим зростає розмір зерна фази, що за швидкого охолодження викликає появу грубих пластин перенасиченого твердого розчину γ -Fe. Розмір зерна попереднього аустеніту пов'язаний з щільністю карбідів у матриці. Зерна попереднього аустеніту були поліедричними у всіх зразках. Їх розміри чутливі до температури аустенізації, тобто до температури гартування. Втрата дрібних карбідів при температурі аустенітизації 840 °С, яка була виявлена металографічними спостереженнями, відобразилася на зростанні розміру зерна аустеніту. Розмір зерна аустеніту в мікроструктурі з більш грубими карбідами, отриманою звичайним м'яким відпалом, не виявляв такої чутливості до температури в діапазоні 840...860 °С.

Завдяки меншому розміру попереднього зерна аустеніту після процесу аустенізації, кінцева мартенситна структура виглядає дрібнішою з рівномірним розподіленням дрібних включень карбідів. Характеристики мартенситу дрібніші, ніж ті, що отримані після гартування від температури аустенізації 880 °С. Тому оптимальним проміжком температур аустенізації слід вважати інтервал 840...860 °С.

4.2. Вплив температури гартування на твердість зразків

Твердість зразків після гартування вимірювали за методом Роквелла, по шкалі С. Визначали як поверхневу так і об'ємну твердість, з наступним усередненням значень. Значення твердості оцінювали в залежності від температури гартування зразків (рисунок 4.2). Вимірювання здійснювали на трьох однотипних зразках, у кількості по три вимірювання у певній зоні поверхні чи серцевини зразка.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

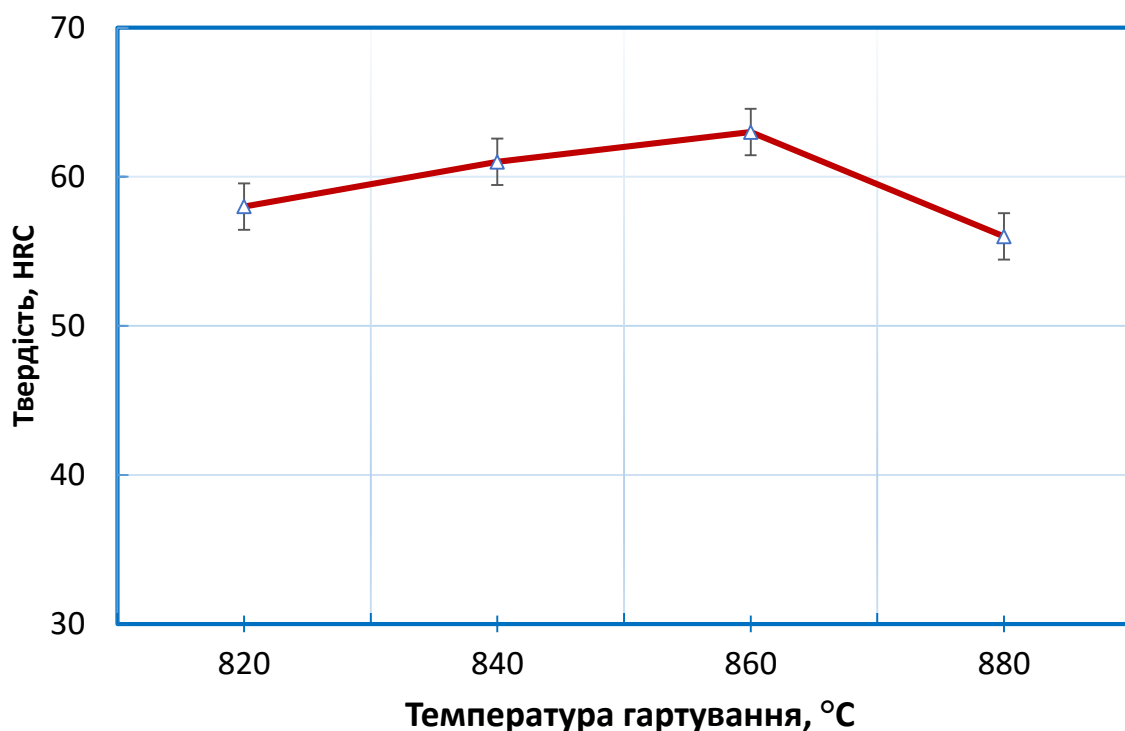


Рисунок 4.2 – Твердість зразків сталі 100CrMnSi6 після гартування та відпуску в залежності від температури гартування.

Температура відпуску 160...180 °C.

Як видно з аналізу оцінки твердості, найвищу твердість після гартування було виявлено у зразка, що загартовувались від температури аустенізації 860. Високий рівень твердості, можливо, можна пояснити дрібною мікроструктурою сталі 100CrMnSi6. Окрім густо дисперсних карбідів, можна очікувати невелику кількість залишкового аустеніту в мікроструктурі. За вищих температур аустенітизації більша кількість вуглецю розчиняється в аустеніті. Отримана мартенситна структура стає грубішою та містить більшу частку залишкового аустеніту. Це викликає незначне зменшення твердості зразків загартованих від температури 880 °C. Порівняно помітний спад твердості на графіку можна пов'язати також з меншою кількістю дисперсних карбідних включень, що вірогідно розчинились в аустеніті.

Невисокі значення твердості у зразках, що гартувались від температури 820 °C, обумовлені малим ступенем розчинення вуглецю в аустеніті. Невисокі температури, що нижчі 840 °C мабуть є недостатніми для інтенсифікації процесів розчинення вуглецю цементиту у γ -Fe. Тому оптимальними

температурами для гартування сталі 100CrMnSi6 слід вважати температури 840...860 °С, що достатньо точно співпадає з результатами аналізу мікроструктури дослідних зразків.

4.3. Вплив температури гартування на контактну міцність сталі В4 (100CrMnSi6 6)

Теоретично можна передбачити, що дрібнодисперсні кінцеві структури мартенситу відпуску, з дрібними карбідами, які отримані відпалом сфероїдизацією та гартуванням від 840..860 °С, будуть оптимальними для стійкості поверхонь кілець підшипників проти контактної втоми. Для оцінки цього припущення в роботі було проведено випробування зносостійкості оброблених матеріалів методом "штифт на диску" за допомогою трибометра. Індентором трибометра слугувала кулька з карбіду вольфраму, що була поміщена в оправку накінецьника штифта трибометра. Зразок сталі був у даному випадку диском, що обертався, та до поверхні якого притискався індентор з навантаженням 10 Н. Швидкість обертання зразка становила 600 об/хв, радіус доріжки кочення становив 10 мм. У такому випадку колова чи лінійна швидкість ковзання v становила:

$$v = \omega \cdot r = (600 / 60) \cdot (10 \cdot 0,001) = 0,1 \text{ м/с},$$

де: ω – швидкість обертання, 600 об/хв;

r – радіус доріжки кочення, 10 мм.

Випробування на знос проводилися на трьох зразках кожного типу, тобто на загартованих від температур 820, 840, 860, 880 °С. Доріжка тертя змащувалась рідкою мінеральною оливою. Час випробування становив 30 хв.

Такий режим випробувань дозволяв виконати відносне порівняння стійкості поверхні дискових зразків сталі 100CrMnSi6, що гартувались за різних температур. Відносною величиною стійкості поверхні під час трибоконтакту була ширина a (у мкм) доріжки чи канавки тертя. Канавка (рисунок 4.3) формувалась в наслідок поверхневої деформації поверхні зразка.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

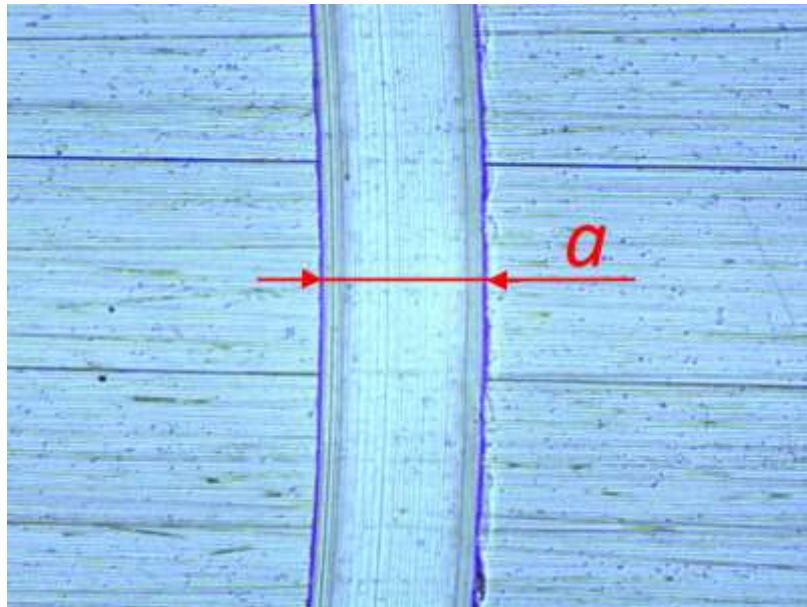


Рисунок 4.3 – Доріжка (канавка) тертя на зразках сталі 100CrMnSi6 (x50).

В дослідженнях припускали, що ширина канавки a напряму залежатиме від стійкості поверхні загартованого зразка під час випробувань за схемою "штифт на диску". Тому у роботі проводили серію досліджень для побудови залежності параметра a від температури гартування (рисунок 4.4). Значення a вимірювали у мікрометрах за допомогою мікрометричного мікроскопу.

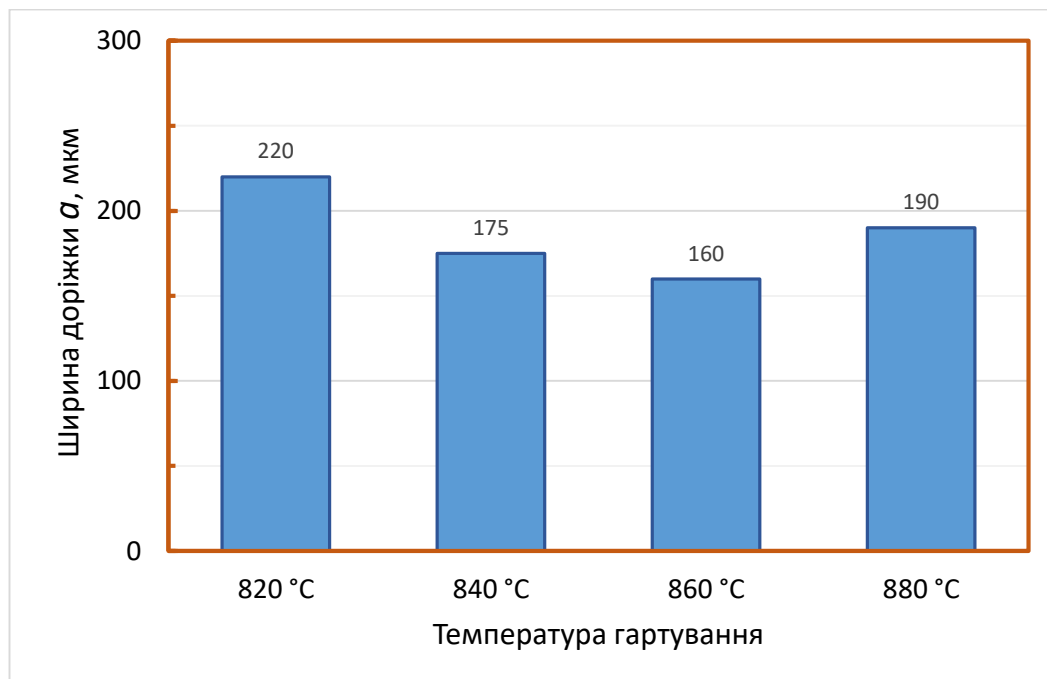


Рисунок 4.4 – Залежність ширини канавки кочення a від температури гартування.

З отриманих результатів вимірювання ширини доріжки тертя видно, що підвищення температури гартування зразків сталі 100CrMnSi6 з 820 °С до 860 °С, викликає зменшення параметра a . Ширина доріжки зменшується з 220 мкм до значень 160 мкм. Ці результати корелюють з значеннями твердості зразків сталі, загартованих від відповідних температур. Більші значення твердості забезпечують більшу стійкість поверхні, та опір пластичному деформуванню під час контактної взаємодії.

Разом з тим, збільшення температури гартування зразків до 880 °С, знову викликає ріст параметра a . Величина виміряної ширини доріжки кочення на поверхні зразка зростає з 160 мкм до 190 мкм. Тобто, контактна стійкість та протидія локальній пластичній деформації сталі зменшується. Така особливість є логічною, тому що в структурі цих зразків спостерігали значну кількість залишкового аустеніту, який має малу твердість. Крім того, в зразках загартованих від температури 880 °С, зменшується кількість вільних карбідів, що також може викликати зменшення твердості.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі на основі досліджень впливу параметрів гартування на структуру та властивості підшипникової сталі В4 (100CrMnSi6), та аналізу їх результатів розроблено практичні рекомендації щодо оптимізації технології гартування кілець підшипників кочення.

На основі аналізу літературних джерел та досліджень інших авторів встановлено, що оптимізація процесів зміцнюючої термічної обробки підшипникових сталей є актуальним завданням.

В роботі проведено комплекс досліджень структури та властивостей зразків підшипникової сталі 100CrMnSi6 (ДСТУ ISO 683-17:2008), що включав: розробку методики та підготовку зразків; дослідження процесу відпалювання зразків після пластичного формування та його впливу на структуру сталі; дослідження процесу гартування відпалених на зернистий перліт зразків, з оцінкою впливу різних температур аустенізації на структуру сталі 100CrMnSi6, її твердість та стійкість проти контактного спрацювання за схемою "штифт на диску".

На основі аналізу результатів досліджень процесу відпалювання зразків встановлено, що оптимальним часом відпалу прокованих зразків сталі 100CrMnSi6 за температур 770...790 °C є проміжок 8...11 годин. Більші витримки сприяють збільшенню дисперсності зернистого перліту сталі, проте такі рішення слід зважувати з енергетичними та часовими витратами в умовах конкретного виробництва та програм випуску продукції.

На основі аналізу результатів досліджень процесу гартування відпалених зразків встановлено, що оптимальним проміжком температур аустенізації сталі 100CrMnSi6 є температури 840...860 °C. Після гартування від цих температур та виконання низького відпускання зразки сталі набували структури дрібнокристалічного мартенситу відпуску, з рівномірно розподіленими дрібними включеннями карбідів. Зразки сталі оброблені а цим режимом мали найвищу твердість та високу стійкість проти спрацювання.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Деталі машин. Конспект лекцій : підручник / В. О. Малащенко. – Львів: «Новий Світ-2000», 2026. – 192 с. ISBN 978-966-418-258-1.
2. Деталі машин, теорія механізмів і основи взаємозамінності. Машинні вали (осі) та їхні опори : навчальний посібник для студентів механічних спеціальностей / С. Г. Карнаух, М. Г. Таровик. – Краматорськ : ДДМА, 2020. – 100 с.
3. Підшипники кочення. ч.2. Роликові підшипники. Навчальний наочний посібник: для студентів спеціальності 131 "Прикладна механіка", 133 "Галузеве машинобудування" уклад.: А. К. Скуратовський. – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 52 с.
4. Rolling Bearings Handbook. NTN, New Technology Network. CAT Publisher. No. 9012/E. URL: https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-03/rolling_bearings_handbook_en.pdf.
5. Gismeros Moreno R, Marques F, Corral Abad E, et al. Rolling contact bearing modelling solutions: Critical analysis and comparison. Friction, 2026, 14(3): 9441147. <https://doi.org/10.26599/FRICT.2025.9441147>.
6. Rolling bearings, catalogue. SKF Group 2018. PUB BU/P1 17000/1 EN. p.1152.
7. ДСТУ ISO 683-17:2008 Сталі термооброблені, леговані та автоматні сталі. Частина 17. Підшипникові сталі. ДП «УкрНДНЦ», Київ, 2013. – 16 с.
8. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин: навчальний посібник / В. О. Іванов, Б. А. Ступін, Х. В. Берладір. – Суми: Сумський державний університет, 2023. – 189 с.
9. Технології та устаткування машинобудівних виробництв. Виробництво заготовок: навч. посібник для здобувачів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» / Укладачі: Комар Р.В., Паньків М.Р., Сенчишин В.С. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. – 152 с.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

10. Матеріалознавство: підручник для вищих навчальних закладів III-IV ступенів акредитації / Є.Г.Афтандіянц, О.В.Зазимко, К.Г.Лопатько. – К.: "Гельветіка", 2020. – 612 с.

11. Металознавство: навчальний посібник / І. В. Прокопович. – Одеса: Екологія, 2020. – 308 с.

12. Методи структурного аналізу матеріалів : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавр спеціальності 132 Матеріалознавство / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Г. Г. Лобачова, Є. В. Іващенко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 180 с.

13. Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальностей 132 "Матеріалознавство" всіх форм навчання / уклад.: Імбірович Н.Ю. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. – 36 с.

14. Пожарова О. В. Охорона праці: навчальний посібник / О. В. Пожарова. – Одеса, 2022. – 86 с.

15. Безпека життєдіяльності та охорона праці: підручник / В. В. Сокурєнко, О. М. Бандурка, С. М. Бортник та ін.; за заг. ред. В. В. Сокурєнка; Харків. нац. ун-т внутр. справ. – Харків: ХНУВС, 2021. – 308 с.

					БР 2226.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		