

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет

Кафедра технології металів і матеріалознавства ім. О. М. Петриченко


КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ЗАЛИШКОВОГО АУСТЕНІТУ У ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ПІДШИПНИКАХ

Завідувач кафедри д-р техн. наук, проф.  Діана ГЛУШКОВА

підпис

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доц.  Юрій ДУДУКАЛОВ

Керівник, доц.



Тетяна ПРОТАСЕНКО

Студент гр. МС-61-24



Ігор ЗАЛЄВАДСЬКИЙ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет механічний
Кафедра технології металів і матеріалознавства ім. О.М. Петриченко
Освітній рівень другий (магістерський)
Спеціальність G8 Матеріалознавство
Освітня програма «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ



підпис

Завідувачка кафедри
Діана ГЛУШКОВА

«11» ЖОВТНЯ 2025 року

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

ЗАЛЄВАДСЬКОМУ Ігору Вікторовичу

1. Тема роботи: «Визначення кількості залишкового аустеніту у важконавантажених підшипниках»

Керівник Протасенко Тетяна Олександрівна, доцент.

Затверджені рішенням Вченої ради механічного факультету від «8» жовтня 2025 року протокол № 155.

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи 08.12.2025 р.

3. Вхідні дані до роботи: звіт по переддипломній практиці, вимоги до експлуатаційних властивостей матеріалу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1 Літературний огляд за темою кваліфікаційної роботи та постановка задач досліджень. 2 Методики експериментальних досліджень. 3 Науково-дослідницька частина. 4 Економічне обґрунтування 5 Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Ілюстративний матеріал до кваліфікаційної роботи магістра (13 слайдів)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 11 жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний огляд за темою кваліфікаційної роботи та постановка задач досліджень	20.10.2025	
2	Методики експериментальних досліджень	30.10.2025	
3	Науково-дослідницька частина	10.11.2025	
4	Економічна частина і охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.11.2025	
5	Формування висновків по роботі. Оформлення кваліфікаційної роботи	25.11.2025	
6	Підготовка презентації і доповіді	1.12.2025	

Студент



Ігор ЗАЛЄВАДСЬКИЙ

Керівник роботи



Тетяна ПРОТАСЕНКО

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 71 с., 10 рис., 15 табл., 30 джерел.

СТАЛЬ ШХ15СГ, ГАРТУВАННЯ, ВІДПАЛЕННЯ, СТРУКТУРА, МАРТЕНСИТ, ТРООСТИТ, ФЕРИТ, АУСТЕНИТ ЗАЛИШКОВИЙ

Об'єктом досліджень є кільця роликів залізничних підшипників зі сталі типу ШХ15СГ, які пройшли гартування і відпускання.

Метою досліджень є розробка методики, яка дозволяє визначати концентрацію залишкового аустеніту в кільцях.

Метод досліджень – аустенітометр, рентгенівський кількісний фазовий аналіз зразків, проведений за дифрактограмами, які зняті за допомогою апарата ДРОН-3 у випромінюванні хрому.

Розроблена безеталонна методика дозволяє визначати кількість залишкового аустеніту в зразках.

Для виконання поставленої мети був проведений комплекс якісних та кількісних структурних досліджень зразків сталі типу ШХ15СГ за різними методиками.

Результати досліджень можуть бути застосовані на виробництві та у науково-дослідних роботах.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Аналітичний огляд джерел інформації.....	5
1.1 Вимоги, які пред'являються до деталей залізничних підшипників.....	5
1.2 Сталь типу ШХ15СГ, яка використовується при виробництві кілець підшипників і вимоги до неї.....	6
1.3 Термічне оброблення залізничних підшипників.....	10
1.4 Вибір напрямку дослідження.....	32
2 Теоретичні та експериментальні дослідження.....	34
2.1 Матеріал дослідження.....	34
2.2 Визначення залишкового аустеніту на установці УКА.МС-56 Фст-ПЕ.....	34
2.3 Визначення залишкового аустеніту на рентгенівському дифрактометрі.....	37
2.4 Виготовлення шліфів.....	43
2.5 Травлення зразків.....	43
3 Узагальнення та оцінка результатів досліджень.....	44
3.1 Результати визначення залишкового аустеніту в зразках кілець залізничних підшипників.....	44
3.2 Оцінка похибки визначення залишкового аустеніту на дифрактометрі.....	50
3.3 Оцінка похибки визначення залишкового аустеніту на аустенітометрі.....	51
3.4 Порівняння даних, отриманих при визначенні залишкового аустеніту на аустенітометрі та дифрактометрі.....	51
4 Економічне обґрунтування і оцінка дипломної роботи.....	52
4.1 Розрахунок заробітної плати.....	52
4.2 Розрахунок витрат на матеріали.....	53
4.3 Розрахунок витрат на електроенергію.....	55

4.4 Розрахунок амортизаційних відрахувань.....	56
4.5 Витрати на господарський інвентар.....	57
4.6 Розрахунок витрат по елементу «Інші витрати».....	57
4.7 Розрахунок економічного потенціалу дипломної роботи.....	59
5 Охорона праці й навколишнього середовища.....	60
5.1 Загальні питання охорони праці.....	60
5.2 Виробнича санітарія.....	60
5.3 Електробезпека у робочому приміщенні.....	64
5.4 Пожежна безпека.....	65
5.5 Охорона навколишнього природного середовища.....	66
Висновки.....	67
Перелік посилань.....	69
Додаток. Ілюстративний матеріал до дипломної роботи магістра.....	72

ВСТУП

Як відомо, у процесі експлуатації залізничні роликові підшипники сприймають динамічні та контактні навантаження. Тому термічне оброблення таких підшипників повинне створювати в них високий рівень контактної-втомної міцності, твердості та зносостійкості.

Для кілець залізничних підшипників з діаметром 230–400 мм при товщині стінок 15–35 мм, використовують сталь типу ШХ15СГ, яка відноситься до заевтектоїдних сталей. Твердість таких сталей залежить від концентрації залишкового аустеніту, яка тим більше, чим більше кількість карбідів, які переходять у твердий розчин при нагріванні під гартування. Тому сталь типу ШХ15СГ нагрівають на 35–50 °С нижче точки *A_{cm}*, тобто до 810–840 °С, а потім загартовують в оліві, після чого проводять низьке відпускання при температурі 180 °С. Після термічного оброблення структура сталі повинна складатися з відпущеного дрібногочастого мартенситу, залишкового аустеніту і деякої кількості карбідів, а її твердість повинна бути не менш 62 HRC.

За технічними умовами кількість залишкового аустеніту після термічного оброблення не повинна перевищувати 25 %. При більшій концентрації залишкового аустеніту в процесі експлуатації підшипників можливий його розпад з утворенням мартенситу, який має більший питомий об'єм порівняно з аустенітом, що може призводити до виникнення залишкових напружень і утворення тріщин, особливо при неоднорідному розподілу залишкового аустеніту в об'ємі виробу. Тому задача визначення вмісту залишкового аустеніту в кільцях залізничних підшипників є важливою.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1.1 Вимоги, які пред'являються до деталей залізничних підшипників

Залізничні підшипники за своїми розмірами займають проміжне місце між підшипниками, які виготовлені в масовому виробництві, і великогабаритними підшипниками. Розміри зовнішніх кілець: діаметри 230–400 мм, товщина стінок 14–35 мм.

Особливістю експлуатації залізничних підшипників є значні динамічні навантаження, які сприймаються підшипниками при ударі бандажа об стики рейок і перекаті стрілочних переводів. Іншою особливістю експлуатації циліндричних роликів підшипників, які в основному використовуються на залізничному транспорті, є сприйняття значних осьових навантажень при русі рухливого складу на кривих ділянках шляху. Це викликає передчасне стирання торців кілець, що часто супроводжується утворенням у бортах дрібних тріщин, які є осередком їх руйнування.

Підшипники характеризуються вантажопідйомністю, довговічністю і надійністю, точністю і частотою обертання, масою, рівнем шуму. Підшипники працюють у широкому діапазоні температур і швидкостей.

На працездатність підшипників впливають багато чинників, у тому числі: відповідність підшипників типу і розміру, характеру і величині експлуатаційних навантажень; якість сталі і термічного оброблення; точність виготовлення деталей і чистота оброблення; якість збирання підшипників; умови монтажу, якість змащування й інші особливості експлуатаційних умов.

Таким чином при правильному вибиранні і необхідній високій якості виготовлення і збирання підшипників, що забезпечується комплексом конструкційних і технологічних заходів, довговічність підшипників визначається головним чином якістю сталі і термічним обробленням.

Основні напруження в деталях підшипників при експлуатації виникають унаслідок багаторазово повторюваних контактних напружень кілець і тіл

кочення. Контактна витривалість матеріалу є основним параметром для розрахунків довговічності підшипників. Крім того, у реальних умовах експлуатації деталі підшипників можуть зазнавати зношування (через прослизання тіл, які котяться), впливу корозійних середовищ і підвищених температур.

Призначення залізничних підшипників пред'являє до них вимоги гарантованої стовідсоткової працездатності. Термічне оброблення цих підшипників повинне створювати в них високий рівень контактної-втомної міцності і тих міцністних властивостей, які забезпечують безпеку руху поїздів. Для деталей цієї групи підшипників необхідно використати оптимальний технологічний процес термічного оброблення, який повинен бути постійним і забезпечувати високий ступінь однорідності продукції. Контроль якості термічного оброблення і готового виробу на всіх стадіях виробництва повинно бути значно посилене [2].

1.2 Сталь типу ШХ15СГ, яка використовується при виробництві кілець підшипників і вимоги до неї

Через складний комплекс виникаючих у металі напружень підшипникова сталь повинна мати:

- а) високий опір пластичному деформуванню при великих навантаженнях у зоні контакту, який забезпечує статичну вантажопідйомність підшипників;
- б) стійкість проти контактної-втомної руйнування при коченні під навантаженням, яка визначає динамічну вантажопідйомність підшипника;
- в) зносостійкість;
- г) достатню в'язкість;
- д) розмірну стабільність при тривалому збереженні й експлуатації підшипників, що запобігає їх "заклинюванню" і ослабленню посадкового натягу.

Використання сталі типу ШХ15СГ для залізничних підшипників пояснюється тим, що, будучи низьколегованою і порівняно недорогою, ця сталь

у той же час має значні переваги: високу міцність, опір втомі і зношуванню. Вміст елементів у сталі типу ШХ15СГ наведений в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі марки ШХ15СГ

Марка сталі	Хімічний склад, %					
	C	Cr	Mn	Si	S	P
ШХ15СГ	0,95–1,05	1,30–1,65	0,9–1,2	0,4–0,65	≤ 0,02	≤ 0,027

До сталей марки типу ШХ15СГ пред'являються вимоги в співвідношенні чистоти за неметалевими включеннями, поверхневими дефектами, щільністю, макроструктурою, карбідною неоднорідністю. Це пов'язано з тим, що під дією високих зосереджених у малому об'ємі знакозмінних навантажень більшість дефектів макроструктури і великих неметалевих включень є концентраторами напружень і осередків зародження втомних тріщин при експлуатації підшипників [2].

Для задоволення зростаючих вимог, що пред'являються до якості металу, які зв'язані з підвищеними питомими навантаженнями в підшипниках, усе більш широко використовуються переплави, які рафінують, (електрошлаковий, вакуумно-дуговий, плазмовий, електронно-променевий) і позапічне вакуумування. При цьому збільшується щільність і хімічна однорідність металу, знижується вміст газів, домішок, загальна кількість і розмір неметалевих включень.

Поряд з металургійною однорідністю сталь типу ШХ15СГ повинна мати велику хімічну однорідність. Кількість домішок у ній повинна знаходитися в заданих границях. Вміст шкідливих домішок у сталі повинний бути дуже низьким.

Підвищений вміст фосфору сприяє збільшенню зерна і підвищенню крихкості, унаслідок чого деталі підшипника стають чуттєвими до динамічних навантажень. При нормальному режимі теплового оброблення різко підсилюється схильність до утворення тріщин при гартуванні й особливо при

шліфуванні. Статична і динамічна міцність значно знижується. Установлено також, що підвищений вміст фосфору в сталі типу ШХ15СГ зменшує її зносостійкість [3].

В даний час переглядається питання про шкідливий вплив сірки в сталі. Підвищений вміст сірки в сталі призводить до збільшення сульфідів та їх розмірів, що вважалось не менш шкідливим, чим збільшення кількості інших неметалічних включень, тому вміст сірки обмежується граничною нормою 0,02 %.

У результаті досліджень останніх років установлено, що сульфіди, які мають порівняно з іншими включеннями (оксидами, нітридами, силікатами) меншу твердість і відносно малу відмінність коефіцієнта лінійного розширення металевої основи, менше знижують границю витривалості при контактному навантаженні, чим інші включення. Сірка сприяє утворенню складних включень, при цьому сульфіди, обволікаючи інші більш шкідливі включення, зменшують зниження контактної міцності, що викликане цими включеннями.

Однорідність властивостей загартованої сталі порушується також при карбідній ліквації і смугастості, як наслідку ліквації в сталевому злитку. Скупчення карбідів, карбідні рядки, також як неметалеві включення, можуть бути осередками викришування, утворення дрібних тріщин і, отже, причиною передчасного руйнування підшипника.

Карбідна смугастість призводить до утворення в процесі гартування суміжних смуг різних структур, від трооститу до голчастого мартенситу, що різко знижує механічну міцність і, зокрема, границю витривалості при контактному навантаженні.

Випадкові домішки (нікель і мідь) у сталі допускаються в сумі не більш 0,5 %, тому що вони змінюють властивості сталі після відпалення і гартування.

Атомно-кристалічна будова хрому подібна α -залізу, тобто хром має ґратку центрованого куба. Залізо-хромові сплави у твердому стані утворюють безупинний ряд твердих розчинів. Область γ -твердого розчину під впливом хрому звужується. У зв'язку з тим, що атомно-кристалічна будова хрому

аналогічна α -залізу, перехід α -заліза в γ -залізо з додаванням хрому утруднюється [3].

Атоми хрому, знаходячись у фериті, заміщають у вузлах ґратки залізо, не викликаючи її значного викривлення, тому твердий розчин хрому в залізі (до 2 % хрому) мало змінює його властивості: лише ударна в'язкість трохи підвищується. Навпаки, твердий розчин хрому в аустеніті помітно змінює його властивості. Зокрема, помітно збільшується твердість, і отже, утруднюється деформуємість аустеніту, який містить у розчині хром. Стійкість заліза і сталі проти корозії, з додаванням хрому також сильно підвищується.

Великий вплив на довговічність підшипників робить щільність сталі, насиченість її порами, міхурами тощо, а також розташування волокон стосовно найбільш навантажених поверхонь деталей, які знаходяться в зоні контактного навантаження (доріжки кочення кілець, поверхні кочення роликів і кульок).

Вивчення питання про оптимальне розташування волокон у кільцях підшипників показало, що довговічність кілець підшипників з волокном, що виходить під кутом до контактної площадки, дорівнює в середньому 50–60 % від довговічності кілець підшипників з подовжнім волокном. При цьому виявилось, що найменшу довговічність мають кільця, у яких волокно виходить під кутом 45° до контактної площадки. У цьому випадку довговічність кілець різко знижена і дорівнює лише 20 % від довговічності кілець з подовжнім волокном. Отже, найменш міцними є ті кільця, у яких напрямок волокон збігається з напрямком максимальних дотичних напружень. Інакше кажучи, кільця мають мінімальну контактну міцність тоді, коли максимальні дотичні напруження збігаються із шарами, найбільш ослабленими дефектами металу і розташованими уздовж волокон.

Щільність сталі забезпечується металургійною якістю злитка і великих обтиснень при раціонально обраних схемах деформування в процесі оброблення тиском. При цьому необхідно виключити можливе влучання найбільш навантажених ділянок деталі на найменш щільні шари сталі.

Сталь для підшипників постачається машинобудівним заводам гарячекатаною чи у вигляді холоднокатаних каліброваних прутків. Гарячекатана сталь призначається для гарячої механічного оброблення на підшипникових заводах. Невелика частина прутків і труб постачається у відпаленому вигляді і безпосередньо надходить на механічне оброблення [2].

1.3 Термічне оброблення залізничних підшипників

1.3.1 Відпалення поковок

В умовах шарикопідшипникового виробництва відпалення використовується для пом'якшення металу, з метою полегшення оброблення різанням, а також для підготування структури до наступного, якісного гартування.

Високопродуктивна робота токарських автоматів може бути досягнута тільки при відомій постійній структурі поковок. Постійність структури вимагає постійності теплового режиму відпалення для всієї садки, якою б великою вона не була, тому швидкість нагрівання, як і інші елементи теплового режиму, повинні бути однаковими для всіх частин садки. При неодночасному прогріванні садки перебування при тій чи іншій температурі різних частин садки буде різним. Це призводить до неоднорідності структури в партії поковок і до погіршеної оброблюваності. Поковки при відпаленні можна нагрівати з такою швидкістю, з якою піч, яка є в наявності, дозволяє рівномірно нагріти дану садку.

Відпалення при температурі вище точки A_{c1} вигідно відрізняється від інших видів відпалення, тому що супроводжується перекристалізацією при перетворенні перліту в аустеніт.

Карбіди сталі відносно важко розчиняються в аустеніті і, отже, для їх розчинення необхідна більш висока температура і велике витримування, навіть

якщо сталь має нормальну структуру пластинчастого перліту без значної карбідної сітки.

Температура кінця евтектоїдного перетворення в сталі з 1,6 % хрому зсувається до більш високих температур і дорівнює $750\text{ }^{\circ}\text{C} - 760\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отже, при нагріванні до $760\text{ }^{\circ}\text{C}$ перліт перетворюється в аустеніт. При цьому в аустеніт переходить лише та кількість карбідів, яка відповідає евтектоїдному складу ($0,70\text{ } \% - 0,72\text{ } \% \text{ вуглецю}$). Інші карбіди розчиняються в міру зростання температури. У зв'язку з цим, якщо тільки незначно перегріти сталь вище точки A_{c1} , вона буде складатися з аустеніту і великої кількості карбідів, які не розчинилися. Ці карбіди і є зародками, центрами кристалізації при охолодженні сталі. При нагріванні трохи вище точки A_{c1} (на $15\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) кількість карбідів, що не розчинилися, велика, і після охолодження виходять численні глобулярні карбіди. Чим вище температура нагрівання, тим менше залишається нерозчинених карбідів, тим менше центрів наступної кристалізації [4].

Однак центрами кристалізації є не тільки нерозчинені карбіди. Розчиненням карбідів в аустеніті не закінчується процес утворення аустеніту. Безпосередньо за розчиненням карбідів там, де вони раніше знаходилися, утворюються місця з різко підвищеною концентрацією вуглецю. У зв'язку з тим, що вирівнювання концентрації в результаті дифузії відстає від процесу розчинення, створюються численні місцеві градієнти концентрації.

У сталі типу ШХ15СГ, де процеси дифузії уповільнені, ця неоднорідність зберігається до відносно високих температур ($840\text{ }^{\circ}\text{C} - 850\text{ }^{\circ}\text{C}$) зі значним градієнтом концентрації.

Таким чином, після нагрівання вище точки A_{c1} численні карбіди, які не розчинилися, вкраплені в аустеніт, концентрація вуглецю і хрому в якому коливається від вмісту, близького до вмісту його у фериті, до вмісту, близького до складу карбіду. Досить невеликого зниження температури такого різноманітного за складом аустеніту, щоб у місцях, де концентрація близька чи дорівнює карбідній, утворився стійкий зародок, який є центром наступної кристалізації карбіду.

Таким чином, у сталі, що нагріта вище точки A_{c1} , в інтервалі температур, до яких зберігаються ділянки аустеніту, з високою концентрацією вуглецю і хрому і значна кількість карбідів, яка не розчинилася, є в наявності готові осередки, які перетворюються при охолодженні в стійкі зародки. Карбіди, які утворилися, кристалізуються у формі, яка відповідає структурній рівновазі, тобто глобулярній.

При більш високому нагріванні відбувається більше вирівнювання концентрації аустеніту. Охолодження однорідного аустеніту призводить до отримання, як правило, пластинчастого перліту, тому в тих ділянках, у яких відбулося розчинення карбідів і вирівнювання концентрації аустеніту, після відпалення утвориться пластинчастий перліт. У ділянках, де карбіди при нагріванні не розчинилися, вони зберігають свою роль центрів кристалізації. У цьому випадку після відпалення, поряд із пластинчастим перлітом, мають місце окремі карбіди чи скупчення карбідів тим у меншій кількості, чим вище температура нагрівання.

Таким чином, отримання зернистого перліту залежить від температури нагрівання, а не від швидкості охолодження, що визначає дисперсність карбідів.

Кінець перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$, тобто температура $760\text{ }^{\circ}\text{C}$, є нижньою границею, а температура відносного вирівнювання концентрації аустеніту $840\text{ }^{\circ}\text{C} - 845\text{ }^{\circ}\text{C}$ – верхньою границею тих температур нагрівання, при яких можливе утворення зернистого перліту при відпаленні. У цьому інтервалі температур оптимальної необхідно вважати температуру $790\text{ }^{\circ}\text{C}$. З огляду на можливі у виробництві відступи, температуру нагрівання при відпаленні можна прийняти $(790 \pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Більш широкий інтервал температур неприпустимий, унаслідок пред'являємої до структури відпаленої сталі обов'язкової вимоги – однорідності. У широкому інтервалі температур нагрівання не можна одержати однорідного зернистого перліту.

Зі збільшенням температури до $800 - 820\text{ }^{\circ}\text{C}$ твердість зменшується в міру усе більшої сфероїдизації карбідів. Вище $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігається збільшення

твердості, у зв'язку з появою в структурі пластинчастого перліту тим у більшій кількості, чим вище температура. У цьому випадку обидва процеси йдуть одночасно і відображають сумарний ефект; природно, що він буде різний для різних швидкостей охолодження. Чим більше швидкість охолодження, тим дисперсніше структура, і тим, отже, менше вплив сфероїдизації карбідів і сильніше вплив більш дисперсного пластинчастого перліту [4].

При нагріванні сталі до нижньої границі інтервалу температур відпалення, що рекомендується, (780 °C) перлітне перетворення встигає завершитися протягом 5 хв – 10 хв. Трохи повільніше розчиняються карбіди крупнопластинчастого перліту і карбідна сітка. При нагріванні вище точки A_{c1} на 30 °C – 40 °C тонка сітка коагулює і частково розчиняється також за короткий термін (30 хв – 40 хв), тому, з погляду завершення процесу, витримування тривалістю 45 хв – 60 хв цілком достатня.

Форма карбідів залежить від стану твердого розчину і визначається температурою нагрівання. Дисперсність карбідів є функцією швидкості охолодження.

Дисперсність карбідної фази в перліті, у свою чергу визначає механічні властивості сталі, зокрема твердість. Залежність твердості від швидкості охолодження при відпаленні наведена на рис. 1.1.

При відпаленні з охолодженням 5 °C/г отримуються цілком відособлені карбіди і поля фериту, що вільні від карбідів. При охолодженні 300 °C/г отримується суцільне поле дрібних карбідів. Різниця в структурі при проміжних швидкостях охолодження не настільки помітна. У цьому випадку лише твердість, яка зменшується, є показником ступеня минулої коагуляції.

Усе вищесказане про зміну твердості і структури в зв'язку зі зміною швидкості охолодження відноситься до нормальних поковок з вихідною структурою пластинчастого перліту. У практиці виробництва в зв'язку з неоднаковими, часто високими температурами закінчення кування (штампування), уповільненим охолодженням і так далі, структура перед відпаленням неоднорідна. Поряд з нормальною структурою, має місце

крупнопластинчастий перліт із залишками карбідної сітки, стійкої, як уже вказувалося, при наступному нагріванні. У цьому випадку доводиться трохи збільшувати витримування при нагріванні і сповільнювати швидкість охолодження.

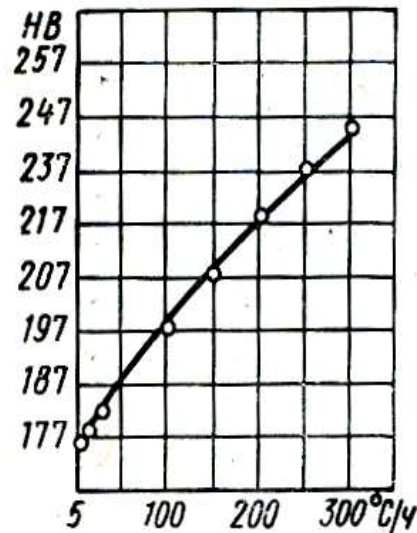


Рисунок 1.1 – Зміна твердості залежно від швидкості охолодження при відпаленні

Використання малих швидкостей охолодження необхідно лише в інтервалі температур розпад аустеніту, тобто практично до 500 °C – 550 °C для сталі типу ШХ15СГ.

1.3.2 Вплив вихідної структури на структуру і властивості загартованої сталі

Гартування, яке є основною операцією, що визначає необхідні властивості сталі, повинно гарантувати постійність і однорідність результатів і високу якість виробів, тому усі чинники, які впливають на результати гартування, повинні бути постійними чи коливатися в дуже вузьких границях [4].

Результати гартування сталі типу ШХ15СГ, крім ряду загальновідомих чинників (температури і тривалості нагрівання, швидкості охолодження і так

далі) значною мірою залежать від вихідної структури, яка повинна бути постійною й оптимальною для даних умов гартування.

Таким чином, можна зробити такі висновки:

а) форма і дисперсність карбідів впливають на розмір зерна сталі типу ШХ15СГ, вони визначають дійсний розмір зерна загартованої сталі навіть з різною природною схильністю до зростання зерна;

б) при низьких температурах, які небагато перевищують точку A_{c1} , розмір зерна визначається дисперсністю карбідів і розміром феритного (перлітного) зерна вихідної структури, а при більш високих температурах найбільше впливає форма, розмір і склад карбідів, які визначають температуру їх розчинності, яка одночасно є температурою початку інтенсивного зростання зерна;

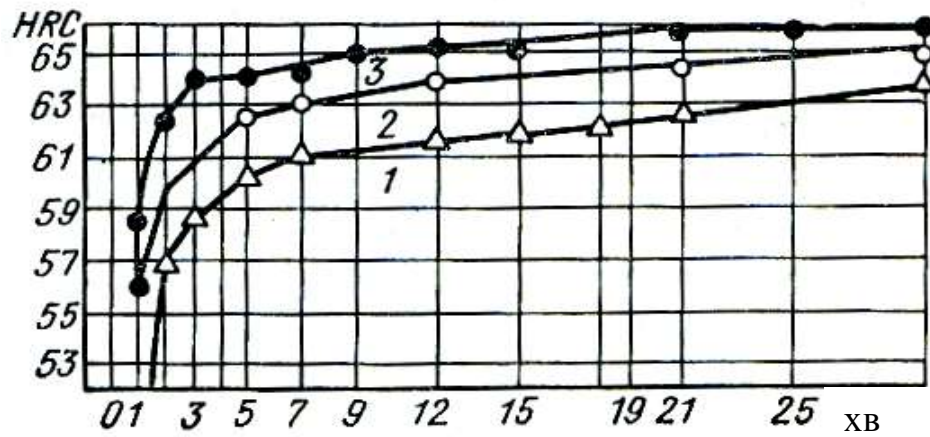
в) мінімальний розмір зерна і найменшу схильність до його зростання в інтервалі гартувальних температур має сталь із дрібнозернистим (точковим) перлітом;

г) найбільшу схильність до зростання зерна, тобто схильність до перегрівання, мають структури пластинчастого перліту; їх зерно після гартування відрізняється неправильною формою і неоднорідною величиною;

д) структури глобулярного перліту мають найбільший розмір зерна в інтервалі інтервалу гартувальних температур; однак вони характеризуються однорідним розміром зерна і правильною рівновісною формою, яка властива всім глобулярним структурам.

Вплив температури на процес розчинення глобулярних карбідів характеризується кривими твердості (рис. 1.2).

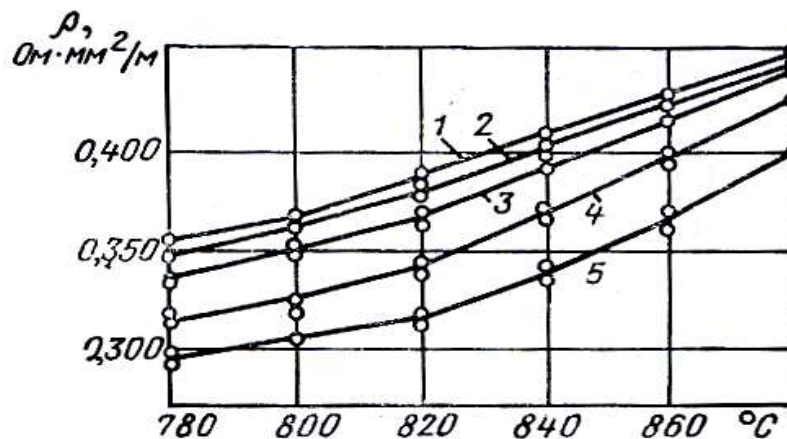
Процес розчинення карбідів при більш високих температурах захоплює більш великі карбіди й у цілому йде тим інтенсивніше, чим вище температура. Ступінь дисперсності вихідної структури визначає концентрацію твердого розчину, який отримується після гартування з даної температури. Чим крупніші карбіди, тим більше збіднений твердий розчин і тем нижче твердість після гартування.



1 – 820 °C; 2 – 840 °C; 3 – 860 °C

Рисунок 1.2 – Вплив температури і тривалості витримування на твердість загартованої сталі з вихідною структурою зернистого перліту

Велике насичення твердого розчину при нагріванні дисперсних структур веде до двох наслідків: збільшенню ступеня тетрагональності мартенситу і зростанню кількості залишкового аустеніту (рис. 1.3).



1 – дрібнопластинчастий перліт; 2 – пластинчастий перліт;
3 – точковий перліт; 4 – дрібнозернистий перліт;
5 – крупнозернистий перліт

Рисунок 1.3 – Залежність кількості залишкового аустеніту від температури гартування сталі з різною вихідною структурою (витримування 15 хв)

Найбільшу кількість залишкового аустеніту при всіх температурах гартування має структура пластинчастого перліту й особливо

дрібнопластинчастого перліту. Максимальна кількість залишкового аустеніту отримується при гартуванні сталі, яка має структуру глобулярного перліту. Дрібні глобулярні структури займають проміжне положення, даючи тим більше залишкового аустеніту, чим дисперсніше вихідна структура [4].

1.3.3 Гартування сталі ШХ15СГ

При проведенні термічного оброблення і тим більше гартування виробів дуже важливо дотримуватись рівномірності нагрівання як для кожного виробу окремо, так і для всієї партії. Від цього залежить можливість отримання високої якості (міцності) усіх виробів даної партії.

Вибирання температури визначається як практичними міркуваннями, так і необхідністю створити визначену концентрацію твердого розчину перед гартуванням. Випробування механічних властивостей показує, що такою оптимальною концентрацією для сталі при використуванні вихідній структурі є вміст вуглецю у твердому розчині 0,55 % – 0,65 % при загальному вмісті його в сталі 1,0 % – 1,05 %.

Зміна твердості відображає процес розчинення карбідів, який йде паралельно насиченню твердого розчину і появою в зв'язку з цим більш м'якої складової аустеніту. Поки вплив аустеніту незначний, твердість зростає паралельно з розчиненням карбідів.

Під час витримування, крім вирівнювання температури, відбувається насичення твердого розчину. Сталь типу ШХ15СГ загартовується тільки в оливі.

Основна частина більш дисперсних карбідів розчиняється незабаром після досягання температури гартування. Однак подальше збільшення витримування дає безупинне насичення твердого розчину ще тривалий час.

Вирішальне значення для результатів гартування має тривалість процесу перетворення аустеніту в мартенсит. Перетворення аустеніту в мартенсит відбувається без зміни концентрації твердого розчину, і, на відміну від перлітного і голчасто-трооститного перетворювань є бездифузійним.

Бездифузійність і оборотність мартенситного перетворення дозволяє розглядати цей процес як перетворення, аналогічне фазовому перетворюванню однокомпонентної системи.

Механізм мартенситного перетворення складається в закономірній перебудові ґратки, при якій сусідні атоми зміщаються відносно один одного на малі відстані, що складають частки міжатомних відстаней. Нова фаза, яка утворюється при цьому, має ґратку закономірно орієнтовану щодо старої.

Мартенситні кристали (голки) мають величезну швидкість утворення і зростання, у зв'язку з чим, перетворення практично протікає шляхом миттєвого утворення мартенситних голок, які швидко зростають до деяких розмірів, які залежать, як правило, від розмірів зерна аустеніту, після чого їх зростання припиняється [4].

Подальше перетворення мартенситу йде не внаслідок зростання голок, які утворилися, а за рахунок нових областей перетворення.

Мартенсит, який утворився в результаті бездифузійного перетворення аустеніту, завжди є пересиченим розчином проникнення вуглецю в α -залізі і тому є метастабільним. Чим більше мартенсит пересичений вуглецем, тим більше тетрагональне викривлення його ґратки, тим менш він стабільний.

Результати гартування залежать від температури точки M_n і від швидкості охолодження в інтервалі мартенситного перетворення, якщо, як правило, перетворення не почалося в першій чи другій ступені прискореного розпаду аустеніту. І те й інше позначається на кількості залишкового аустеніту в загартованій сталі. Це особливо важливо для сталей, які піддають низькотемпературному відпусканню, при якому зберігається залишковий аустеніт, який впливає на механічні властивості сталі.

При гартуванні зміна розмірів без зміна форми відбувається внаслідок двох чинників:

- 1) зміна структури сталі при гартуванні;
- 2) пластичної деформації, викликані внутрішніми напруженнями, які перевищують границю плинності сталі.

Невелика зміна розмірів через усебічне пружне стискання чи розтягання, яке створена внутрішніми напруженнями, тут не розглядається, тому що ця деформація після гартування і тим більше відпускання незначна.

Основна частина зміна розмірів при загальноприйнятих режимах гартування відбувається у результаті зміни структури загартованої сталі.

Питомий об'єм мартенситу й аустеніту в загартованій сталі при різному вмісті вуглецю у твердому розчині наведений на рис. 1.4.

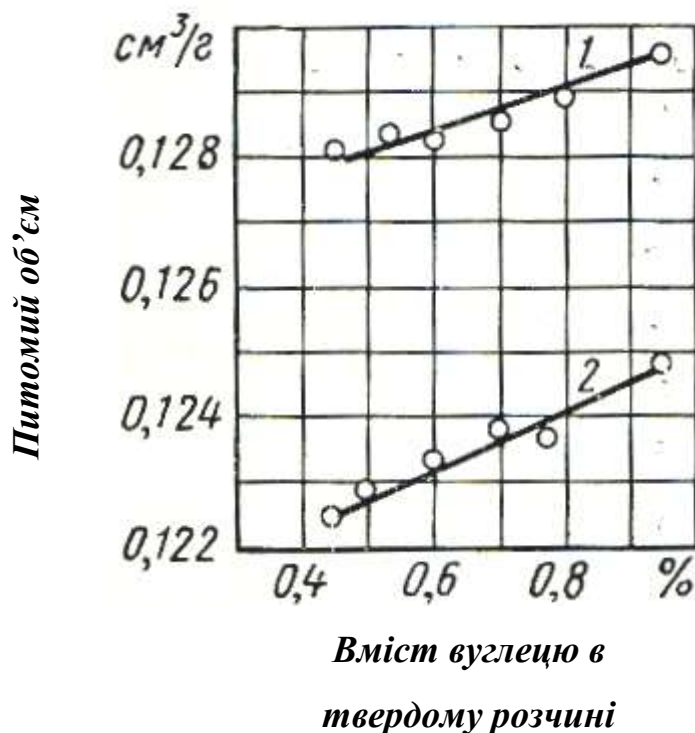


Рисунок 1.4 – Питомий об'єм мартенситу (1), аустеніту (2) у загартованій сталі при різному вмісті вуглецю в твердому розчині

Для сталі, в якій ступінь насичення твердого розчину знаходиться в прямому зв'язку зі ступенем нагрівання (для даної вихідної структури), питомий об'єм мартенситу залежить від температури нагрівання і від ступеня відпускання. Збіг об'єму і розмірів загартованого виробу з вихідним може бути тільки у випадку, коли в загартованій сталі мається змішана структура з таким співвідношенням об'ємів, при якій збільшення розміру від тетрагонального мартенситу компенсується наявністю деякої кількості залишкового аустеніту.

Фактична величина питомого об'єму загартованої сталі, у якій присутні обидві структури, залежить, отже, від співвідношення кількості аустеніту, що міститься в ній, і мартенситу. Ця величина різна для різних концентрацій твердого розчину.

Хоча в нормально загартованій сталі залишковий аустеніт завжди присутній, однак кількість його недостатня для компенсування об'ємних змін, зв'язаних з утворенням мартенситу, тому при гартуванні цих сталей майже завжди спостерігається збільшення розмірів. Це збільшення залежить головним чином від температури гартування, що визначає концентрацію твердого розчину і вміст залишкового аустеніту. Однак є і ряд інших чинників, від яких залежить зміна розмірів при гартуванні.

Зокрема, дуже помітний вплив на зміну розмірів робить швидкість охолодження. При збільшенні швидкості зменшується кількість залишкового аустеніту, і збільшуються залишкові напруження в сталі. Ці чинники сприяють збільшенню розмірів загартованої сталі, тому при одній і тій же концентрації твердого розчину гартування у воді створює в сталі більше збільшення розмірів, чим гартування в оливі.

Чим більше товщина кільця, тим більше в ньому залишкового аустеніту і тим при меншій концентрації твердого розчину спостерігається максимальне збільшення розмірів.

1.3.4 Підвищення якості і властивостей деталей підшипника при поверхневому зміцненні із використанням індукційного нагрівання

Найбільш ефективним і економічним способом підвищення характеристик міцності та довговічності деталей є поверхнєве гартування із використанням індукційного нагрівання.

На деталях підшипника, що піддають індукційному обробленню, знеуглецьований шар не утвориться внаслідок короткочасності процесу нагрівання. Після гартування із використанням індукційного нагрівання сталі типу ШХ15СГ

видно, що сталь має структуру приховано-кристалічного мартенситу з рівномірно розподіленими карбідами, що обумовлено відносно дрібним дійсним зерном аустеніту, підвищеним запасом пластичності, незважаючи на високі значення характеристик міцності.

Особливий інтерес представляє об'ємно-поверхневе гартування з використанням індукційного нагрівання, при якому за одну технологічну операцію досягається зміцнення поверхневого шару і серцевини. Цей метод знайшов використання в підшипниковій промисловості для деталей залізничних підшипників, виготовлених зі сталі ШХ15СГ.

Технологію об'ємно-поверхневого гартування з використанням індукційного нагрівання використовували на зразках і кільцях підшипників. При цьому оцінювали твердість, мікротвердість, мікроструктуру, товщину загартованого шару, вміст і склад карбідної фази, розподіл легувальних елементів у поверхнево-загартованому шарі, розподіл залишкових напружень.

Кільця зі сталі ШХ15СГ проходять термічне оброблення за наступним режимом: нагрівання в печі опору до температур $(830 \pm 10) ^\circ\text{C}$, витримування 60 хв, охолодження в оліві, відпускання при температурі $(200 \pm 10) ^\circ\text{C}$.

Після термічного оброблення кільця зі сталі ШХ15СГ мають твердість, однакову по всьому перерізу і рівномірну твердість (HRC від 59 до 61). Деяке зниження твердості кілець за рахунок підвищення температури відпускання передбачається технологічною документацією на залізничні підшипники з метою підвищення їх конструктивної міцності і стабілізації залишкового аустеніту.

Мікротвердість кілець практично не змінюється по їх перерізу і дорівнює біля Н 700. Структура однакова по всьому перерізу і складається з приховано- і дрібнокристалічного мартенситу і надлишкових карбідів.

У наскрізь загартованих кільцях у поверхневих шарах формуються напруження, що розтягують, які на відстані від поверхні 2 мм – 3 мм переходять у напруження, що стискають.

Наявність залишкових напружень, що стискають, є основним чинником, який сприяє підвищенню крихкої міцності опору втомі і контактної витривалості.

Вміст вуглецю і кількість залишкового аустеніту в загартованих кільцях ((0,5 – 0,55) % C; (13 – 16) % $A_{ост}$) не змінювався по їх перерізу. Після відпускання вміст розчиненого в мартенситі вуглецю зменшився до (0,15 – 0,30) %, а кількість залишкового аустеніту не змінювалась.

Стендові й експлуатаційні випробування показали, що цілком виключилися випадки виходу з ладу залізничних підшипників у процесі експлуатації по відколу бортів і розриву кілець.

1.3.5 Відпускання загартованої сталі ШХ15СГ

Частина кілець залізничних підшипників, зокрема внутрішні кільця вагонних підшипників, з метою більшої стабільності розмірів відпускається при більш високих температурах, чим інші підшипники. У зв'язку з цим для залізничних підшипників існує три режими відпускання:

- 1) (170 ± 10) °C для кілець з нормальною твердістю – HRC (60 – 63);
- 2) (190 ± 10) °C для кілець зі зниженою твердістю – HRC (59 – 62);
- 3) (200 ± 10) °C для внутрішніх кілець вагонних підшипників із твердістю HRC (58 – 60).

Загальна тривалість відпускання дорівнює 4г – 6 г, при цьому мінімальна тривалість витримування при температурі відпускання не менш 2,5 г – 3,0 г.

Не можна вважати оптимальним підвищення стабільності розмірів внутрішніх кілець унаслідок збільшення температури відпускання, що, як відомо, знижує контактно-втомну міцність кілець. Цей шлях був запропонований після того, як виявилися численні випадки натягу внутрішніх кілець унаслідок недостатньої стабільності залишкового аустеніту. Найпростіший шлях стабілізації аустеніту, яким є збільшення температури відпускання, зменшив кількість випадків ослаблення натягу внутрішніх кілець. Однак загальна

працездатність підшипників зменшилася. Тому варто вважати, що оптимальний режим термічного оброблення, який би забезпечував необхідну стабільність розмірів кілець без зниження їх стійкості, ще не знайдений.

Загартована сталь складається з мартенситу, тобто пересиченого твердого розчину вуглецю в α -залізі, і деякої кількості залишкового аустеніту. Обидві фази знаходяться в нестійкому стані, і лише мала рухливість атомів утруднює протікання стабілізаційних процесів. Підвищення температури додає велику рухливість атомам і викликає зміну структури у бік більш стійкого стану. Одночасно послабляється викривлення кристалічної ґратки мартенситу [4].

Таким чином, використовуючи ту чи іншу температуру відпускання, можна регулювати процес розпад твердого розчину і формування карбідів. Одночасно знімаються внутрішні напруження, тим у більшому ступені, чим вище температура нагрівання.

Для підвищення міцності й особливо ударної в'язкості сталі, рекомендується збільшувати витримування при низькотемпературному відпусканні до 2 г – 3 г. Твердість при цьому знижується незначно.

Для виробів, які сприймають динамічне навантаження і потребують збереження високої твердості, найкраще поєднання великої в'язкості і високої твердості досягається шляхом низькотемпературного відпускання. При зниженні твердості до HRC 60 температуру можна збільшувати до 180 °C – 190 °C. Необхідно при цьому відзначити дуже важливу стабілізаційну роль такого тривалого відпускання, яке дозволяє домогтися майже повної стабільності збільшеної кількості аустеніту, що залишився, без зниження твердості.

У зв'язку з тим, що збільшення витримування при низьких температурах відпускання сприятливо позначається як на стабільності розмірів, так і на загальному зміцненні за рахунок подальшого, хоча і невеликого, зменшення тетрагональності і зняття внутрішніх напружень, витримування при відпусканні варто збільшувати.

Рекомендується кільця зі сталі ШХ15СГ витримувати при відпусканні не менш 2 г – 3 г після прогрівання до заданої температури. У цьому випадку загальна тривалість відпускання повинна бути в інтервалі 4г – 5 г.

Операція відпускання є найважливішою ланкою термічного оброблення, яка визначає якість готового виробу, тому заданий режим відпускання повинен строго виконуватися і контролюватися.

1.3.6 Стабілізації розмірів загартованих виробів. Вплив залишкового аустеніту на сталь

Після гартування сталь має значні залишкові напруження. Ці напруження здатні деформувати виріб безпосередньо після гартування. Якщо ж величина напружень недостатня для деформування, але близька до неї, то зміна розміру чи форми відбудеться згодом.

Нестабільною є також структура загартованої сталі. Параметри тетрагональної кристалічної ґратки мартенситу залежить від вмісту вуглецю у твердому розчині. В міру зменшення тетрагональності, тобто наближення до кубічної ґратки, відбувається скорочення об'єму і лінійний розмірів. Лише після завершення цих процесів збільшується стійкість мартенситу і, отже, незмінність розмірів.

У сталі ШХ15СГ після гартування завжди присутній залишковий аустеніт. Як показали спостереження, цей залишковий аустеніт є нестійким і навіть при кімнатній температурі ізотермічно перетворюється в мартенсит. Кількість залишкового аустеніту і його стабільність залежать від складу твердого розчину й умов охолодження. У більшості випадків, оскільки перетворення залишкового аустеніту супроводжується збільшенням об'єму, розміри виробу також змінюються [2].

Величина і розподіл залишкових напружень у виробах після гартування можуть бути, як правило, різними. Вони виявляються у вигляді деформації

безпосередньо після гартування, після деякого проміжку часу, після якої-небудь технологічної операції, чи, нарешті, у процесі експлуатації.

Стабільність залишкового аустеніту в загартованій сталі насамперед залежить від його кількості. Чим більше залишкового аустеніту, тим він за інших рівних умов менш стабільний.

Раніше було розглянуто, що температура гартування, вихідна структура й інші чинники, змінюючи склад твердого розчину, впливають на кількість залишкового аустеніту. Розглянемо, як впливають на кількість залишкового аустеніту чинники, які не викликають зміну складу твердого розчину, зокрема умови охолодження.

Кількість залишкового аустеніту залежить від швидкості і від глибини охолодження. Вплив швидкості охолодження на розпад аустеніту зводиться до прискорення процесу розпаду аустеніту зі збільшенням швидкості охолодження нижче точки $M_{\text{п}}$. Ця закономірність характерна для сталі ШХ15СГ в інтервалі практично використаних температур і швидкостей охолодження [7].

Вирішальне значення для кількості залишкового аустеніту в сталі має температура, до якої охолоджена сталь при гартуванні, що впливає з особливостей процесу перетворення аустеніту в мартенсит. Це перетворення описується мартенситною кривою, де кожній температурі, до якої доведене охолодження при гартуванні, відповідає визначений ступінь розпаду аустеніту. Чим нижче ця температура, тим менше кількість залишкового аустеніту.

Внаслідок цього дуже важлива та температура, до якої було проведено початкове охолодження і витримування при цій температурі. Від цього залежить хід подальшого мартенситного перетворення, і отже, кількість залишкового аустеніту і його стабільність.

Зміна розмірів знаходиться в прямолінійній залежності від кількості залишкового аустеніту, якщо одночасно не відбувається зміна складу твердого розчину; тому криві зміни розмірів, як правило, зображуються дзеркальними відображеннями кривої зміни кількості залишкового аустеніту (рисунк 1.5, криві 1 і 2).

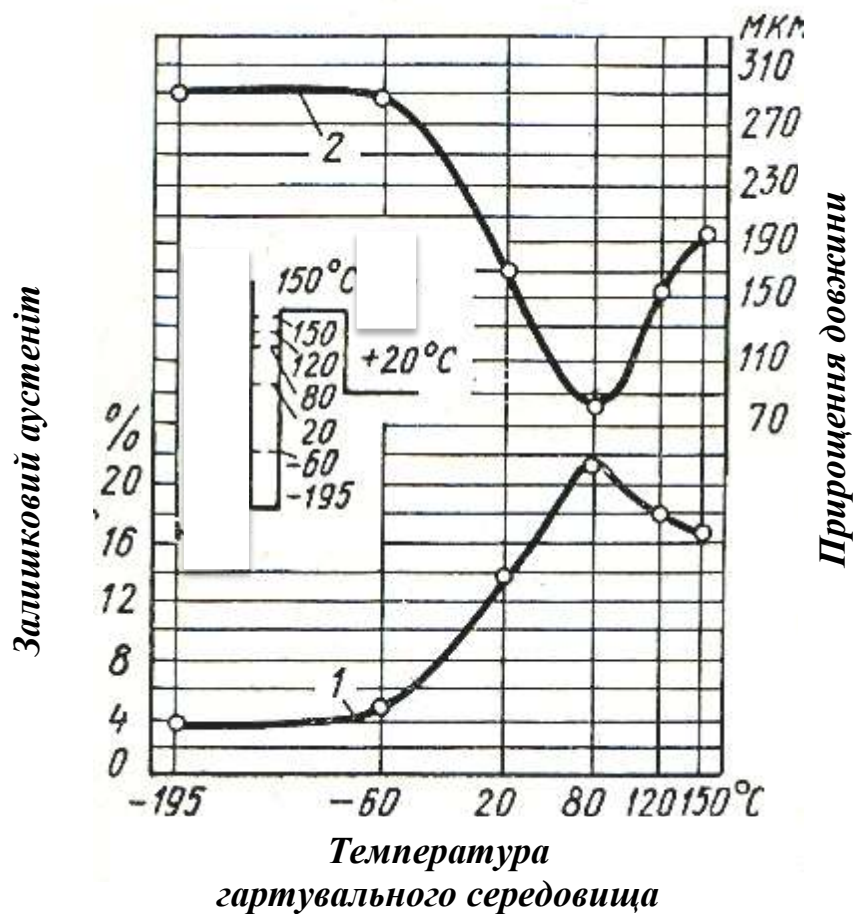


Рисунок 1.5 – Зміна кількості залишкового аустеніту (1) і довжини зразка (2) залежно від температури гартувального середовища

Результати визначення кількості залишкового аустеніту після гартування з різних температур у циліндричних зразках різного перерізу, виготовлених зі сталі ШХ15СГ наведені на рисунку 1.6. З цих даних випливає, що розміри перерізу значно впливають на вміст залишкового аустеніту. Це вплив тим більше, чим вище температура гартування.

При переході від циліндричних зразків до кілець і інших форм виробів варто зіставляти їх розміри відповідно до розходження у швидкості охолодження. Практично встановлено, що кількість залишкового аустеніту, отримана для роликів (рисунок 1.5), буде відповідати кільцям, товщина яких дорівнює приблизно 2/3 діаметра роликів.

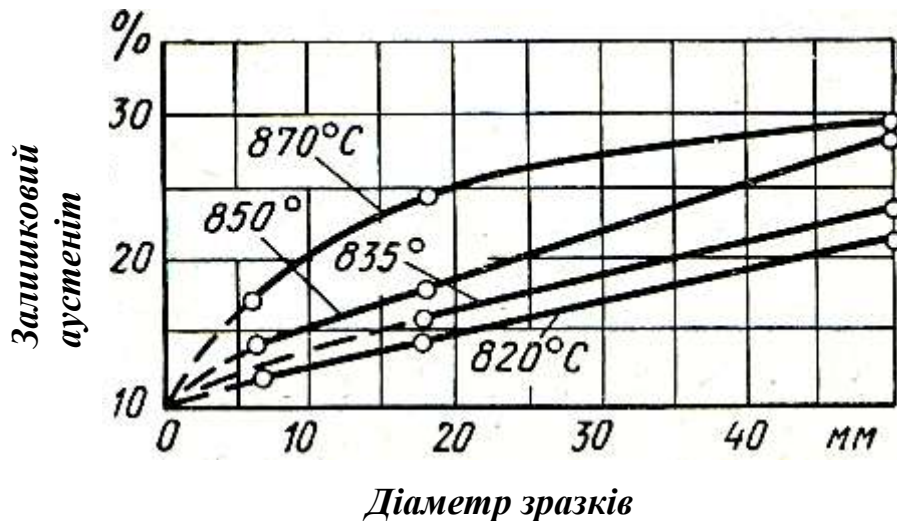


Рисунок 1.6 – Залежність кількості залишкового аустеніту від діаметра зразків

Поглиблення гартування масивних виробів, наприклад товстостінних кілець, необхідно ще і тому, що вони повільно остигають до температури оливи і часто виймаються із гартувального середовища, при значно більш високих температурах, ніж температура навколишнього повітря. Повільне охолодження їх до кімнатної температури ще більше знижує стабільність аустеніту. Таким чином, збільшення товщини виробів створює несприятливі умови для стабільності аустеніту.

Як вказувалося, стабільність визначається кількістю залишкового аустеніту, що може коливатися в широких границях залежно від температури гартування, вихідної структури, тобто тих параметрів, від яких залежить концентрація вуглецю у твердому розчині, а також від умов охолодження (швидкості охолодження, витримування перед відпусканням й інше).

Дуже сприятливо впливає на стабільність аустеніту відпускання виробів після закінчення глибокого охолодження при гартуванні.

Відпускання, отже, сильно затримує розпад аустеніту, загартованої сталі. У зв'язку з цим до стабілізуючої дії глибокого охолодження додаються можливості, які зв'язані з відпусканням, тобто можливості стабілізації при великій кількості залишкового аустеніту і, отже, при меншій глибині

охолодження після гартування. Ця обставина є, як правило, важливою, тому що призводить до зменшення залишкових напружень, зв'язаних із глибоким охолодженням, і допускає деяке збільшення залишкового аустеніту у виробках, що збільшує опір втомі, зносу і загальну міцність сталі.

Інакше кажучи, якщо сталь буде відпускатись, то можна підняти кінцеву температуру, до якої треба її охолоджувати, щоб аустеніт став практично стабільним.

Ступінь цієї стабілізуючої дії відпускання на частину аустеніту, що залишилася, тим більше, чим вище температура відпускання (рисунок 1.7), і чим більше його тривалість.

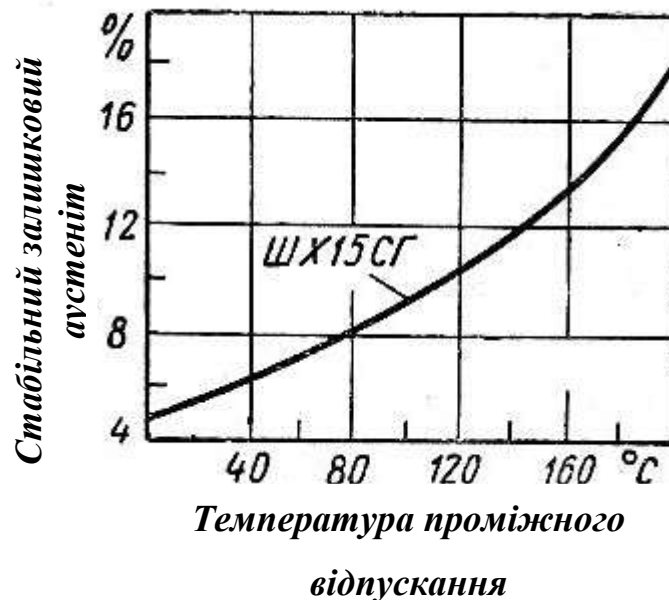


Рисунок 1.7 – Вплив температури проміжного відпускання сталі ШХ15СГ на стабільність залишкового аустеніту (витримування при відпусканні 1,5 г)

Тобто, при наявності відпускання немає потреби охолоджувати сталь при гартуванні до точки M_n , що завжди супроводжується розвитком залишкових напружень і навіть тріщин, а варто охолоджувати лише до тієї температури, при якій сталь після відпускання стає практично стабільною. У зв'язку з цим з метою більшої стабільності розмірів виробів, коли за тими чи іншими умовами

поглиблювання охолодження при гартуванні неможливо, впливає необхідність максимально збільшувати температуру чи витримування при відпусканні.

Отже, там, де повинна бути збережена дуже висока твердість, і температуру відпускання підвищувати не можна, для кращої стабільності може бути використане тільки більш глибоке охолодження при гартуванні. У кілець підшипників, особливо у внутрішніх, стабільність яких також дуже важлива і твердість яких не може бути менше HRC 60, значне підвищення температури відпускання практично також неможливо. Однак в інтервалі температур відпускання, при яких твердість не знижується нижче HRC 60, варто використовувати, можливо, більш високі температури. При добре налагодженому процесі гартування температури відпускання внутрішніх кілець можуть бути підвищені і повинні дорівнювати для сталі ШХ15СГ 180 °С – 185 °С [7].

Сталь ШХ15СГ взагалі є більш стабільною до граничної температури, до якої вона охолоджується при гартуванні. Перевірка стабільності сталі шляхом тривалого витримування при підвищених температурах також показала, що сталь ШХ15СГ є більш стабільною, як при оптимальному для сталі режимі гартування, так і при гартуванні на однаковий вміст залишкового аустеніту. Це важлива властивість сталі типу ШХ15СГ дозволяє успішно використовувати її для більш великих деталей, де кількість аустеніту, як правило, збільшується і його стабільність здобуває велике значення [6].

Стійкість аустеніту при підвищених температурах важлива для тих підшипників, які помітно нагріваються в роботі. Варто мати на увазі, що більшість наведених вище кількісних даних про стійкість аустеніту відносяться до кімнатної температури 20 °С. Якщо експлуатація підшипника в зв'язку з його нагріванням у роботі відбувається при більш високій температурі, то можливе більш прискорений ізотермічний розпад залишкового аустеніту.

Як було встановлено, стабільність розмірів при підвищених температурах визначається саме кількістю залишкового аустеніту і мало залежить від температури гартування і відпускання.

В усіх випадках відносна зміна розміру тим більше, чим більше в сталі залишкового аустеніту i , як правило, перевищує зміну розмірів, що допускаються для підшипників підвищеної точності.

Після глибокого охолодження вироби повинні бути відпущені чи піддані тепловому старінню для стабілізації мартенситу або зменшення напружень.

Таким чином, загальна стабільність загартованих виробів зі сталі ШХ15СГ досягається однократним охолодженням після гартування до температури, що лежить в інтервалі від $+ 20$ °С до мінус 30 °С, з наступним відпусканням чи тепловим старінням при 125 °С – 130 °С в інтервалі від 2 г до $2,5$ г, тим більш тривалим, чим більша необхідна точність виробу. Таким шляхом вироби приводяться до повної практично необхідної стабільності, що досягається стабілізацією мартенситу, залишкового аустеніту i значним ослабленням залишкових напружень загартованої сталі.

1.4 Вибір напрямку дослідження

Метою даної роботи було:

- 1) визначення кількості залишкового аустеніту в термічно оброблених кільцях залізничних підшипників зі сталі типу ШХ15СГ на аустенітометрі;
- 2) розробка методики визначення кількості залишкового аустеніту за допомогою рентгенівського кількісного фазового аналізу за дифрактограмами, які зняті за допомогою апарата ДРОН-3;
- 3) порівняння даних, які отримані за допомогою двох методів вимірювання залишкового аустеніту.

За технічними умовами відсоток вмісту залишкового аустеніту після термічного оброблення сталі ШХ15СГ (неповне гартування при температурі 810 °С – 840 °С і низьке відпускання при температурі 160 °С – 180 °С) не повинен перевищувати 20 %. При більшому відсотку вмісту залишкового аустеніту в процесі експлуатації може відбутися його розпад з утворенням мартенситу, що як відомо, має більший питомий об'єм, це може призвести до

виникнення залишкових напружень, утворення тріщин і зміни геометричних параметрів кілець. Тому задача визначення залишкового аустеніту в кільцях залізничних підшипників є важливою з погляду атестування їх за даним параметром.

Для виконання поставленої мети був проведений комплекс якісних та кількісних структурних досліджень зразків сталі ШХ15СГ за різними методиками.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Матеріал дослідження

Для відпрацювання методики визначення залишкового аустеніту і її опробування були виготовлені зразки.

Зразки однакові за розмірами, були вирізані з кілець зі сталі ШХ15СГ, що пройшли повне стандартне термічне оброблення. Хімічний склад сталі марки ШХ15СГ наведений в таблиці 1.1.

Процес отримання готових кілець завершувався чистовим шліфуванням.

Для запобігання структурних змін, які можуть відбуватися при відрізанні зразків, використовувалася охолоджувальна рідина. Для видалення порушеного механічним обробленням шару, який утворився при відрізанні зразків, проводилося тонке шліфування, при якому знімався шар товщиною 0,5 мм.

2.2 Визначення залишкового аустеніту на установці УКА.МС-56 Фст-ПЕ

Структуроскоп магнітний аналіз відноситься до класу контрольних засобів неруйнівного контролю одиничного виробництва, відповідно до галузевої інструкції і призначений для контролю відповідності встановленим нормам вмісту залишкового аустеніту в кільцях залізничних підшипників зі сталі ШХ15СГ.

Робота установки заснована на вимірюванні намагніченості насичення, що характеризує вміст залишкового аустеніту.

Вимірювання величини, що характеризує намагніченість насичення, проводиться методом компенсування поля, яке діє на ферозонд (котушки намагнічування і частково кільця).

У котушку перетворювача, який намагнічує, із встановленим кільцем від джерела живлення через систему керування подається струм, який намагнічує, а потім включається струм розмагнічування. На ферозондовий індикатор

перетворювача впливає поле котушки з кільцем і поле, що створюється системою компенсування.

Компенсування здійснюється двома компенсаційними обмотками, у які поміщений ферозонд. Одна обмотка служить для компенсування зміни поля, що намагнічує, друга – для компенсування поля кільця з мінімальним вмістом залишкового аустеніту.

Сигнал з ферозондового індикатора надходить на смуговий підсилювач, що виділяє другу гармонічну складову сигналу і далі на синхронний детектор. На синхронний детектор подається також опірна напруга з генератора через канал формування опірної напруги.

Смуговий підсилювач, канал формування опірної напруги і синхронний детектор об'єднані в детектор амплітудно-фазової селекції.

Далі сигнал надходить на цифровий індикатор, до якого приєднаний інформаційний компаратор для відображення відхилень від установлених границь на світловому табло.

Усі переключення здійснюються автоматично системою керування.

При перевірці працездатності приладу використовуються імітатори. Імітатори конструктивно виконані у вигляді кільцевих зразків.

Імітатори постачаються індивідуально для одного чи групи приладів, маркіруються і заносяться в паспорт установки. Використовуються при включеній контрольній позиції.

Первинне підготування установки для контролю вмісту залишкового аустеніту в кільцях здійснюється вибором посилювання струму компенсування й автокомпенсування і струму розмагнічування.

Для налаштування необхідно мати кільця з різним вмістом залишкового аустеніту кожного типу.

Одне кільце повинне бути зі вмістом залишкового аустеніту близьким до нуля, наприклад, оброблене або холодом, або не термооброблене, друге – з максимальним вмістом, наприклад, недостатньо охолоджене перед відпусканням.

Налаштування проводиться в такій послідовності:

- з'єднати кабелями блоки установки;
- підключити прилад до мережі і включити тумблер “МЕРЕЖА”;
- натиснути кнопку каналу, що налаштується;
- роз'єднати ланцюг компенсування на клемі, натиснути кнопку “ПУСК”;
- після загоряння індикатора “АУСТЕНІТ” натиснути кнопку “ЗАТРИМКА”;
- при натиснутій кнопці “ ЗАТРИМКА” і при відсутності кільця у вимірювальній позиції зміною струму автокомпенсування установити мінімальні показання;
- з'єднати ланцюг компенсування;
- установити в перетворювач кільце з нульовим вмістом залишкового аустеніту;
- натиснути кнопку “ПУСК” після загоряння індикатора “АУСТЕНІТ”, натиснути кнопку “ ЗАТРИМКА”;
- при натиснутій кнопці зміна струму компенсування установити мінімальні показання ;
- установити в перетворювач кільце з максимальним показами залишкового аустеніту, і після натискання кнопок “ПУСК” і “ ЗАТРИМКА” установити зусиллям показання 80 – 90 одиниць;
- порівняти показання з включеним і виключеним додатковим навантаженням, що зменшує струм намагнічування. Показання не повинні змінюватись. При змінюванні показань здійснюється коректування компенсування шляхом зміни струмів.

Контроль відповідності вмісту залишкового аустеніту здійснюється в наступній послідовності:

- натиснути кнопку відповідного каналу;
- установити кільце у вимірювальній позиції перетворювача;
- натиснути кнопку “ПУСК”;
- визначити показання цифрового індикатора “АУСТЕНІТ”.

2.3 Визначення залишкового аустеніту на рентгенівському дифрактометри

2.3.1 Кількісний фазовий аналіз

Кількісний фазовий аналіз, тобто визначення об'ємного вмісту якої-небудь однієї чи усіх фаз у багатофазному зразку, засноване на тому, що інтенсивність ліній даної фази пропорційна об'ємній частці її в суміші, а також так називаної відбивальної здатності обраних кристалографічних площин. Кількісний аналіз припускає вимірювання інтегральної інтенсивності ліній з високим ступенем точності. Тому в даний час для кількісного аналізу використовуються головним чином рентгенівські дифрактометри [8].

Існує багато різновидів методів рентгенівського кількісного фазового аналізу. Однак у кожному з цих методів порівнюють інтенсивності так названих аналітичних ліній кожної фази – як правило, це лінії найбільшої інтенсивності, вільні від накладення інших ліній аналізованої чи іншої фаз багатофазного зразка. Без обліку екстинкції при зніманні масивних полікристалічних зразків у монохроматичному випромінюванні справедливе співвідношення (2.1):

$$Q = \frac{1 + \cos^2 2\theta}{\sin^2 \cos \theta} \rho S^2 l^{-2M} N^2 \lambda^2 B \quad (2.1)$$

де θ – кут відбиття;

ρ – множник повторюваності, це число еквівалентних площин, для яких квадратична форма $(hkl)^2$ має однакове значення. Значення ρ для кубічних полікристалів наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення ρ для кубічних полікристалів

Індекси	{hkl}	{hk0}	{hhl}	{hh0}	{hhh}	{h00}
---------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

ρ	48	24	24	12	8	6
--------	----	----	----	----	---	---

Для кристалів більш низької симетрії множник повторюваності має менше значення.

S^2 – структурний множник з обліком атомного враховує залежність інтенсивності рентгенівських променів від розташування атомів в елементарній комірці і вимірюється базисом ґратки, розраховується за формулою (2.2):

$$S = \left[\sum_{j=1}^N f_j e^{i(hu_j + kv_j + lw_j)} \right]^2, \quad (2.2)$$

де $N = 1/V$ – число елементарних комірок в одиниці об'єму речовини;

V – об'єм елементарної комірки;

B – множник поглинання, що враховує зміна інтенсивності в результаті поглинання рентгенівських променів у кристалі при даній геометрії знімання, який визначається за формулою (2.3):

$$B = \frac{1}{\mu} \frac{\sin(2U - \beta)}{\sin(2U - \beta) + \sin\beta}, \quad (2.3)$$

де β – кут між площиною зразка і напрямком первинного пучка рентгенівських променів;

Γ^{2M} – температурний множник, що враховує різницю фаз розсіяних променів, які виникають унаслідок теплових коливань.

Для кубічних кристалів:

$$M = \frac{6h^2}{mk_0} \left(\frac{1}{4} + \frac{\Phi(x)}{x} \right) \frac{\sin^2\theta}{\lambda}, \quad (2.4)$$

де h – постійна Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$ ерг/сек.;

A – атомна вага елемента;

k – постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ ерг/град;

θ – характеристична температура, що визначається за формулою (2.5):

$$\theta = \frac{h\nu}{k}, \quad (2.5)$$

де ν – максимальна частота теплових коливань атомів.

$$x = \frac{\theta}{T}, \quad (2.6)$$

де T – абсолютна температура, при якій проводились рентгенівські знімання;

$\theta(x)$ – так називана функція Дебая.

Для кубічних кристалів:

$$\frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{4a^2}, \quad (2.7)$$

За наведеними співвідношеннями розраховується відбивальна здатність Q_1 і Q_2 для обраних ліній порівняння. До вибирання аналітичних ліній, які належать до різних фаз, пред'являються такі вимоги:

- 1) вони повинні бути досить інтенсивними;
- 2) повинні розташовуватися на близьких кутах відображення;
- 3) не повинні накладатися одна на одну.

2.3.2 Методика знімання на рентгенівському дифрактометрі

Рентгенівська зйомка проводилася на дифрактометрі ДРОН-3 у випромінюванні хромового анода. Як селективно-поглинаючий фільтр для

відсіювання k_{β} -випромінювання використовувався фільтр із ванадію. Зйомка проводилася за стандартною схемою $\theta - 2\theta$ з фокусуванням по Брегу-Брентано шляхом запису на діаграмну стрічку. Зйомка всіх зразків проводилася при однакових умовах: напруга на рентгенівській трубці 30 кВ, анодний струм 20 мА. Розміри щілин після трубки (обмежуючої) і перед лічильником (що фокусує) вибиралися з таких міркувань, щоб площа опромінювання залишалася постійною під час повторної зйомки зразків чи при зміні зразків. Це забезпечувалося при ширині щілин 1,0 – 1,05.

2.3.3 Визначення кількості залишкового аустеніту

Традиційно для рентгенографічного визначення залишкового аустеніту вибирають лінії (110) мартенситу (α -фаза), що представляє собою пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі, і (111) залишкового аустеніту (γ -фаза). Це найбільш інтенсивні лінії аналізованих фаз. Недоліком такого вибору є деяке положення “хвостів” цих ліній, що при визначенні інтенсивності вимагає їх поділ. Якщо в структурі сталі лінії карбідних фаз не виявляються, і якщо вміст залишкового аустеніту такий, що лінія $(111)_{\gamma}$ слабкіша $(110)_{\alpha}$, то поділ сумарного профілю $(111)_{\gamma} + (110)_{\alpha}$ на окремі складові може бути виконаний досить коректно графічно. При наявності в структурі сталі цементиту Fe_3C на лінії $(111)_{\gamma} - (110)_{\alpha}$ накладаються найбільш інтенсивні лінії карбідної фази. Це ще більш ускладнюється, якщо мартенсит гартування виявляється тетрагональним. У цьому випадку лінія $(110)_{\alpha}$ розщеплюється на дві лінії: (110) і (011). Однак у досліджених зразках тетрагональність мартенситу не виявляється.

Для надійного поділу ліній $(111)_{\gamma} - (110)_{\alpha}$ реєстрування дифракційної картини проводять у досить широкому кутовому інтервалі. Так, у фільтрованому випромінюванні хромистого анода цей інтервал дорівнює $2\theta = (64-74)$ град.

Після того як були обрані аналітичні лінії, необхідно профотометрувати лінії порівняння на мікрофотометрі. При дифрактометрії необхідно зняти лінії порівняння (по точках чи на запис). За допомогою планіметра виміряти площі,

які обмежені мікрофотометричною чи дифрактометричною кривими для ліній порівняння.

Також для сталі можна прийняти, що щільність фаз приблизно однакова і тому значення об'ємної і вагової концентрацій збігаються. Тоді для ліній порівняння двох фаз на одній і тій же рентгенограмі чи дифрактограмі при постійному режимі справедливе співвідношення (3.8):

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{C_1 Q_1}{C_2 Q_2}, \quad (2.8)$$

$$C_1 + C_2 = 100\%, \quad (2.9)$$

де C_1 і C_2 – концентрації фаз у двухфазном зразку.

Далі за формулами розраховуємо відбивальну здатність для ліній порівняння. Якщо фази, які досліджуються, мають близькі характеристичні температури і фазовий аналіз проводиться за близько розташованими лініями порівняння, можна істотно спростити розрахунок, з огляду лише на T_p і множника:

$$Q = PS^2 N^2, \quad (2.10)$$

Таке спрощення цілком припустиме при визначенні залишкового аустеніту за лініями (111) γ -фази і (110) α -фази.

Після цього визначаємо вміст фаз у зразку, що досліджується. З прийнятими спрощеннями вираження приймає вид (2.11):

$$\frac{\rho_\gamma}{\rho_\alpha} = \frac{P_\gamma S_\gamma^2 C_\gamma}{C_\alpha S_\alpha^2} \frac{V_\alpha^2}{V_\gamma^2 (1 - C_\gamma)}, \quad (2.11)$$

Оскільки для аустеніту і фериту

$$S_{\alpha}V_{\gamma} = S_{\gamma}V_{\alpha}, \quad (2.12)$$

одержуємо просте робоче співвідношення (2.13):

$$C_{\gamma} = \frac{300\rho_{\gamma}/\rho_{\alpha}}{3\rho_{\gamma}/\rho_{\alpha} + 2}, \quad (2.13)$$

2.3.4. Типи похибок вимірювань

Будь-який результат вимірювань містить ряд похибок різного походження. Похибки підрозділяють на систематичні і випадкові. Систематичні похибки викликаються чинниками, що діють однакою чином при багаторазовому повторенні тих самих вимірювань, наприклад, неправильне оцінювання початку відліку приладу. Іншим прикладом систематичних похибок може служити похибка, що виникає через зміну зовнішніх умов, наприклад, температури, якщо відомий вплив цих змін на результати вимірювань.

Випадкові похибки викликаються великою кількістю таких чинників, дія яких на кожну зміну різна і не може бути виділена і врахована заздалегідь. Випадкову похибку можна розглядати як сумарний ефект дії таких чинників. Наприклад, при багаторазових вимірюваннях однієї і тієї ж величини, зроблених із усією можливою старанністю, одержують різні числові значення, розкидані щодо дійсного значення величини.

2.4 Виготовлення шліфів

Для того, щоб зняти поверхневий шар, зразок спочатку шліфують на шліфувальному папері в послідовності зменшення його зернистості. Потім

переходять на полірувальний верстат, використовуючи для полірування зв'язок окису хрому у воді. Заключне полірування проводиться на полірувальному кругу, використовуючи для полірування воду.

2.5 Травлення зразків

Метою травлення є збільшення оптичного контрасту між різними структурними складовими.

Для травлення сталі ШХ15СГ використовували хімічне травлення – нанесення краплі реактиву на поверхню шліфа.

Проводилося травлення 4-х % спиртовим розчином азотної кислоти протягом 5 секунд.

3 УЗАГАЛЬНЕННЯ ТА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Результати визначення залишкового аустеніту в зразках кілець залізничних підшипників

У зразках, які досліджуються, виявляються інтенсивні лінії мартенситу, слабкі лінії аустеніту і дуже слабкі лінії цементиту.

На рис. 3.1 показана ділянка дифрактограми зразка в кутовому інтервалі $2\theta = 64^\circ - 74^\circ$. На рисунку 3.1 показаний сумарний дифракційний профіль, який включає в себе лінії $(111)_\gamma$ і $(110)_\alpha$, три лінії цементиту Fe_3C , а також результати поділ сумарного профілю на складові лінії. Якщо всю площу профілю кутів 2θ віднести до лінії $(111)_\gamma$, те вийде завищене значення вмісту аустеніту.

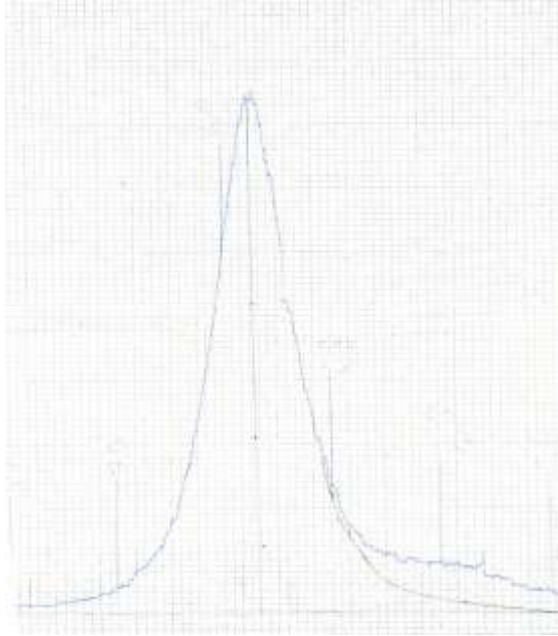
Видно, що лінії цементиту дуже слабкі. Це дозволяє зробити висновок, що вони знаходяться на границі рентгенографічного виявлення.

Найбільша інтенсивність ліній цементиту не означає, що вмістом карбідної фази варто зневажити.

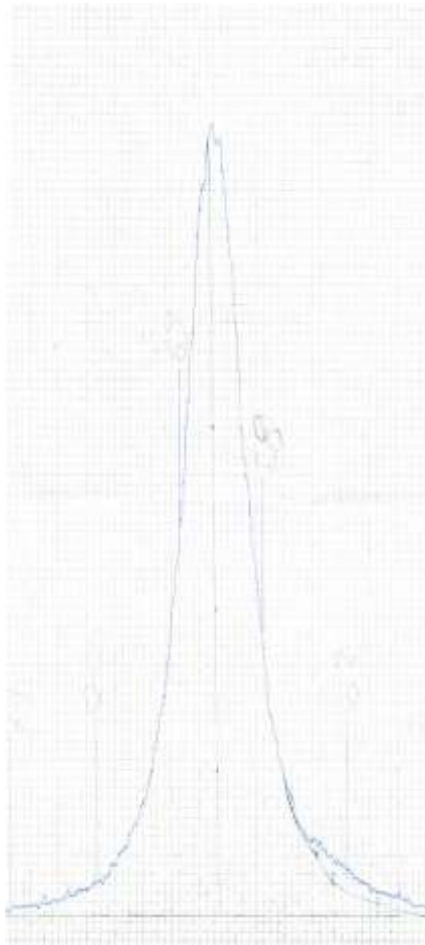
Добре відомий факт, що якщо лінії цементиту знаходяться на границі виявлення, як це спостерігається в нашому випадку, то об'ємний вміст його оцінюється в 10 %. Така низька чутливість рентгенографічного виявлення цементиту обумовлена як низько-симетричною ґраткою, так і малим значенням множника повторюваності. Слід зазначити, що чутливість рентгенівського фазового аналізу щодо такої фази, як залишковий аустеніт, яка описується кубічною ґраткою, на порядок вище порівняно з цементитом, і аустеніт може бути виявлений при вмісті його близько 1 %. Тому був прийнятий об'ємний вміст цементиту 10 % у припущенні, що після стандартного термічного оброблення його вміст від зразка до зразка змінюється мало (в інтервалі 1–2 %).

Таким чином, у роботі розглядалося два варіанти:

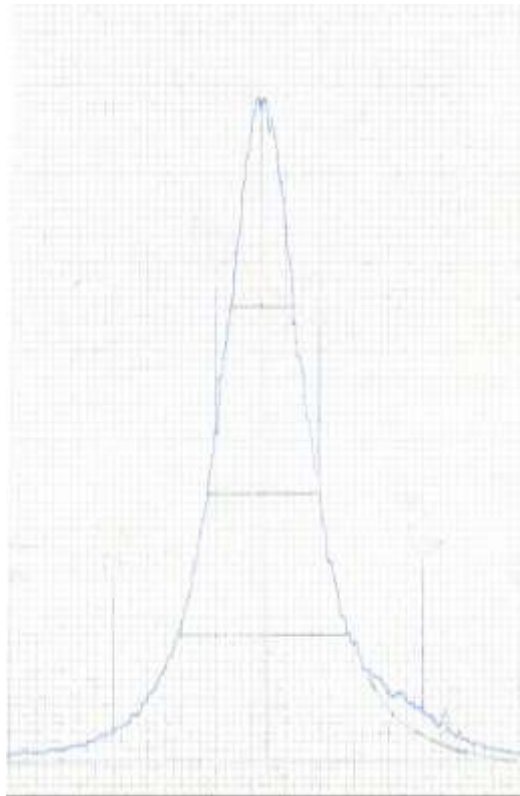
1) у припущенні двофазних зразків, тобто $V_M + V_A = 1$;



a)



b)



в)

Рисунок 3.1 – Ділянки дифрактограми в інтервалі $2\theta = 64-74^\circ$

2) у припущенні трифазних зразків, тобто $V_M + V_A = 0,9$ (при об'ємному вмісті цементиту 10 %).

Описані розходження в концентрації залишкового аустеніту, розраховані за лініями $(111)_\gamma - (110)_\alpha$ на які накладаються лінії карбідної фази, можуть бути обумовлені впливом карбідної фази.

При проведенні металографічного аналізу, на підтвердження вищесказаних слів, спостерігається чітко виражений дрібнодисперсний голчастий мартенсит, залишковий аустеніт і невелика кількість карбідів Fe_3C (рисунок 3.2).

Таким чином, середнє значення V_γ при обробці дифракційного профілю: згладжування, відділення лінії фону і визначення площі планіметром, кількість залишкового аустеніту дорівнює 12,7 %. А при визначенні залишкового аустеніту на аустенітометрі за графіком, де показання цифрового індикатора в одиницях переводяться у відсотки, дорівнює 15,9 % (рисунок 3.3). Дані вимірювання залишкового аустеніту наведені в таблиці 3.1.

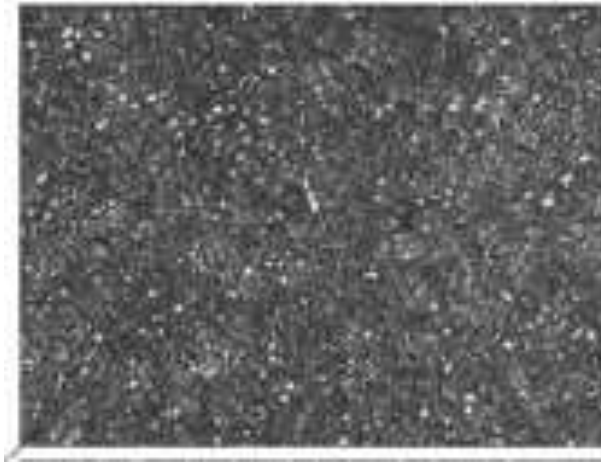


Рисунок 3.2 – Структура сталі 3Х15СГ
після стандартного термічного оброблення

Ця кількість залишкового аустеніту є максимально можливою, тому що при його визначенні приймалося, що $V_{\alpha} + V_{\gamma} = 100\%$. З огляду на, що вміст карбідів у зразках, які досліджуються, може бути оцінений нами на рівні 10 %, як це було обговорено вище, тобто за умови, що $V_{\alpha} + V_{\gamma} = 90\%$, кількість залишкового аустеніту насправді менше порівняно з наведеними середніми значеннями.

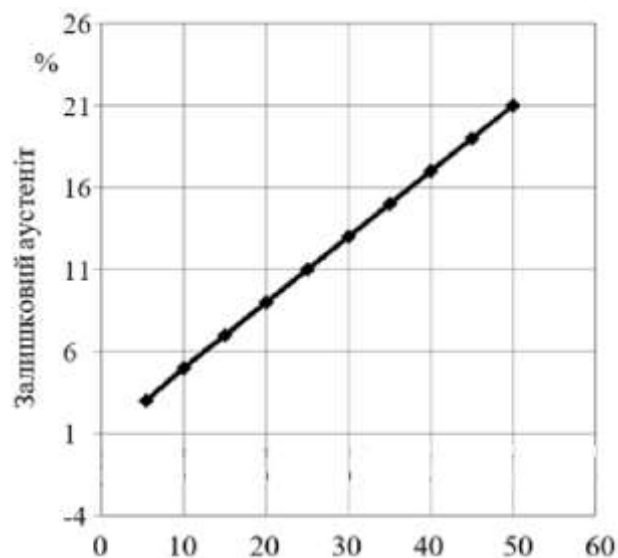


Рисунок 3.3 – Графік визначення залишкового аустеніту
за шкалою аустенітометра

Таблиця 3.1 – Результати визначення кількості залишкового аустеніту в зразках зовнішніх вагонних кілець залізничних підшипників

Номер зразка	Значення вимірювань Аост, %	
	Аустенітометр	ДРОН-3
1	15	12
2	17	10,5
3	17,5	15,5

Зіставлення між собою інтенсивності ліній, знятих при однакових умовах, дозволило також проаналізувати можливий вплив текстури, обумовлений обробленням заготовок для виготовлення підшипників (кування чи гаряче штампування). Хоча заготовки піддають високотемпературному відпалюванню при температурі 800 °С – 830 °С, однак текстура при цьому може цілком не усуватися. Рентгенографічно текстура виявляється в зміні співвідношення інтенсивності дифракційних ліній: залежно від типу текстури одні лінії можуть підсилюватися, інші – послаблюватися. Наявність текстури може істотно впливати на результати кількісного фазового аналізу й обумовлювати різні значення вмісту фази, яка аналізується за різними лініями порівняння. Однак у зразках, які досліджувалися рентгенографічно, текстура виявлена не була: співвідношення експериментальних значень інтегральної інтенсивності ліній в інтервалі похибки вимірювань дорівнює відношенню відбивальної здатності для цих ліній, тобто теоретичному відношенню. Це є достатньою умовою для висновку про відсутність текстури (чи її слабкому прояві) у досліджених зразках.

Найчастіше використовується процедура згладжування профілів за допомогою якої проводиться фільтрування значень, які вимірюються: значення, що випадають, (промахи) відкидаються, інші усереднюються за допомогою різних способів апроксимування, так що одержують гладку криву. Процедура згладжування дає дифракційний профіль з найкращим наближенням.

Наступна обов'язкова процедура при обробленні дифракційного профілю – це проведення ліній фону. Похибка визначення площі, обмеженої дифракційним

профілем і лінією фону, і похибка визначення відносного вмісту фаз, які аналізуються, залежить від того, як ретельно буде виконана ця процедура. При завищенні лінії фону площа під кривою може виявитися меншою стосовно істинного значення на 10–15 %.

І, нарешті, визначення самої площі під дифракційним профілем проводять за допомогою планіметра при графічному обробленні.

Виразити в аналітичному вигляді похибки, обумовлені кожним з перерахованих факторів, неможливо. Тому в даній роботі оцінювання сумарної похибки, яка обумовлює похибку кількісного фазового аналізу, проводилося шляхом повторних вимірювань того самого зразка.

Отримані результати свідчать про значну схильність залишкового аустеніту до розпаду при гартуванні. Це у свою чергу може бути пояснене тим, що при термічному обробленні використовується гартування (нагрівання під гартування 810 °С – 820 °С, що нижче температури A_{cm} для сталі ШХ15СГ, яка дорівнює 910 °С). Для забезпечення більш високої стабільності аустеніту, запобігання його швидкого розпаду і більшого відхилення відносного вмісту, необхідно було б підвищити температуру нагрівання під гартування для того, щоб в аустеніті розчинився весь вуглець, присутній у сталі в кількості 1 %. Але таке повне розчинення не спостерігається, це свідчить те, що після гартування рентгенографічно виявляються лінії цементиту Fe_3C . Разом з тим для організації надійного неруйнівного контроль залізничних підшипників, за критерієм вмісту залишкового аустеніту необхідно мати зразки з великим його вмістом, наприклад, до 20–25 %.

У більшості випадків розходження у вмісті залишкового аустеніту не перевищує 0,5–2,5 % об'ємного відсотка, у деяких випадках спостерігається розкид значень об'ємного вмісту залишкового аустеніту. Це може бути обумовлено додатковим розпадом залишкового аустеніту, що відбувається при відрізанні зразків з кільця. Це у свою чергу означає, що для виключення додаткових структурних змін, особлива старанність необхідна при підготованні зразків для рентгенографічного дослідження.

Слід також зазначити, що кількість залишкового аустеніту в зразках, які досліджуються, коливається в інтервалі 10–17 об'ємних відсотків при визначенні на дифрактометрі, і 15–24 % – на аустенітометрі. Це цілком узгоджується з наявними даними, що для прийнятого термічного оброблення розпад переохолодженого аустеніту дорівнює значення 90 %, тобто в структурі сталі залишається близько 10 % залишкового аустеніту, що в основному і спостерігається.

3.2 Оцінка похибки визначення залишкового аустеніту на дифрактометрі

Для оцінки зазначеної похибки був поставлений наступний експеримент. Проводилися зйомка того самого зразка в дискретному автоматичному режимі при однакових умовах: напруга на рентгенівській трубці, сила анодного струму, площа опромінювання при експозиції.

Криві розподілу відбитої інтенсивності для профілів (110) α -фази і (111) γ -фази будували в однаковому масштабі по осі абцис і ординат. Такі вимірювання повторювалися три рази без перестановки зразка у тримачу гоніометра. Оброблення їх – згладження, проведення лінії фону, проводилося вручну. Визначення площі, обмеженої профілем і лінією фону, проводилося планіметром. Попередня оцінка похибки приладу проводилася шляхом декількох вимірювань “еталонної” (відомої) площі, наприклад квадрата на міліметровому папері розміром $10 \times 10 \text{ см}^2$. Відносна похибка визначення “еталонної” площі не перевищувала 0,5 %.

Такі вимірювання можна назвати рівномірними й обробляти їх за правилами багаторазових рівномірних вимірювань: знаходження середнього арифметичного, середньоквадратичної похибки середнього й окремого вимірювання, і, нарешті, довірчого інтервалу.

Таким чином, результат визначення залишкового аустеніту в зразках може бути представлений у такий спосіб: $C_{\gamma} = 10,5-13 \%$. Такий результат цілком підходить для організації неруйнівного контролю якості термічного оброблення.

3.3 Оцінка похибки визначення залишкового аустеніту на аустенітометрі

При визначенні залишкового аустеніту на аустенітометрі похибка може бути викликана різною намагніченістю зразків, вирізаних як з одного кільця, так і з різних кілець. Також на показання впливає протягом якого часу після термічного оброблення кільця були віддані на контроль. І найбільшу похибку у показаннях аустенітометр буде давати в тому випадку, коли його при включенні недостатньо прогріли.

Розходження у показаннях аустенітометра, при підготовці до роботи за допомогою імітаторів з нульовим і максимальним вмістом залишкового аустеніту, не повинні перевищувати 2–3 одиниці.

3.4 Порівняння даних, отриманих при визначенні залишкового аустеніту на аустенітометрі та дифрактометрі

Порівнюючи вміст залишкового аустеніту, який вимірювався на аустенітометрі й апараті ДРОН-3 (табл. 3.1), видно, що розходження дорівнює від 2 % до 6,5 %. Причому показання дифрактометра нижче показань аустенітометра, що дозволяє стверджувати, що визначення залишкового аустеніту на апараті ДРОН-3 є більш коректним і точним. Але показання аустенітометра не перевищують норм вмісту залишкового аустеніту (20 %), у зв'язку з чим можна стверджувати, що аустенітометр можна використовувати на виробництві, як більш зручний прилад для визначення залишкового аустеніту. Але необхідно один раз на рік проводити рентгенівський кількісний аналіз для атестування на такий параметр як залишковий аустеніт.

4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ І ОЦІНКА ВИПУСКНОЇ РОБОТИ

Об'єктом дипломного дослідження є кільця роликів залізничних підшипників зі сталі ШХ15СГ, які пройшли гартування і відпускання.

Метою дипломного дослідження є узагальнення теоретичних положень і визначення економічної доцільності розробки методики, яка дозволяє визначати концентрацію залишкового аустеніту в кільцях роликів залізничних підшипників

Для досягнення означеної мети поставлені та вирішені наступні задачі:

- 1) Визначення фонду основної заробітної плати виконавців дослідження;
- 2) Здійснення комплексної оцінки витрат на матеріали, електрику, господарський інвентар, воду, опалення;
- 3) Розрахунок вартості задіяного устаткування та амортизаційних відрахувань;
- 4) Розрахунок економічного потенціалу дослідження;
- 5) Розрахунок показників учбово-дослідницької та загальнонаукової ефективності дипломної роботи.

4.1 Розрахунок заробітної плати

Заробітна плата – це частина національного доходу, яка виділяється для особистого споживання працюючих відповідно до якості і кількості їхньої праці. Термін виконання роботи – 2 місяці. У дипломному дослідженні приймають участь: керівник та виконавець. Розрахунок основного фонду заробітної плати при проведенні дипломного дослідження наведений у табл. 4.1.

4.2 Розрахунок витрат на матеріали

У склад матеріальних витрат відносять: вартість сировини та матеріалів, покупних виробів та полу фабрикатів, вартість робіт та послуг виробничого

характеру, які виконують сторонні організації, вартість енергії усіх видів, яка витрачається на технологічні потреби організації, пов'язані з виконанням даної бакалаврської роботи та інші витрати.

Таблиця 4.1 – Витрати по заробітній платі

Найменування посади	Оклад, грн./місяць	Пояснення	Сума, грн.
Керівник	10982	Час на консультування бакалаврської роботи 22 години	1510,03
Додаткова заробітна плата		70 % (за стаж, за доцента, за кандидата наук)	1057,02
Усього нараховано			2567,05
Податки			
Податок з ф/о		22%	613,91
Профспілка		1%	27,91
Військовий збір		1,5%	4,86
Всього			68,68
Всього			2635,73

Вартість матеріальних ресурсів за елементом «Матеріальні витрати» визначається виходячи з цін на їх придбання без врахування податку на додану вартість, комісійних винагород постачальницьким і зовнішньоекономічним організаціям, вартість послуг товарних бірж, в т.ч. брокерських [2]. У вартість матеріалів включаються витрати, які пов'язані зі транспортуванням матеріальних ресурсів, у тому числі вантажно-розвантажувальних робіт, які здійснюються власними силами організації.

Витрати на матеріали приведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
Папір для креслення	шт.	10	3,5	35,0
Папір А4	кіпа	1	200	200,0
Олівець	шт.	2	2	4,0
Ручка	шт.	2	4	8
Гумка	шт.	1	10	10,0
Зразок сталі ШХ15СГ	кг	10	22,31	223,1
Всього				480,1
Всього з урахуванням ТЗВ				528,11

Кількість матеріалів, які витрачаються на виконання бакалаврської роботи, (P_i) встановлюються виходячи з кількості досліджень, які були проведені на протязі усієї експериментальної частини дипломної роботи та необхідної витрати сировинних компонентів на одне дослідження.

Розрахунок вартості матеріалів здійснюється за формулою:

$$S_M = P_i \cdot C_i \cdot 1,1, \quad (4.1)$$

де P_i - витрати i -го компонента на весь обсяг експериментальних робіт;

C_i – вартість i -го компоненту, грн/од;

1.1 – коефіцієнт, який враховує транспортні витрати.

4.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Розрахунок витрат на використане в процесі роботи устаткування приведено у табл. 4.3. Розрахунок інших витрат на електроенергію приведено у табл. 4.4.

Таблиця 4.3 - Використане устаткування

Найменування устаткування	Потужність, КВт	Час роботи, год.	Витрати електро- енергії, КВт
Камерна піч	5	1	5
Мікроскоп металографічний МІМ-7	0,17	2	0,34
Твердомір ПМТ-3	0,02	2	0,04
Комп'ютер	0.6	317	190,2
Всього			195,58

Таблиця 4.4 – Інші витрати на електроенергію

Показник	Порядок розрахунку
Витрати на електроенергію, споживану устаткуванням, грн.	$V_{e.уст.} = P_{сум} \cdot K \cdot Ц$ <p>де $P_{сум}$ - сумарна потужність устаткування, КВт;</p> <p>K – коефіцієнт використання (0,8);</p> <p>$Ц$ – ціна за 1 КВт</p> $V_{e.уст.} = 195,58 \cdot 0.8 \cdot 1,68 = 262,86$
Витрати на електроенергію для освітлення, грн.	$V_{e.осв.} = S \cdot Q \cdot K \cdot T \cdot Ц / 1000$ <p>де S - освітлювальна площа, м²;</p> <p>Q - питома витрата електроенергії (15 Вт/ м²);</p> <p>K - коефіцієнт, що враховує одночасне горіння ламп (0,8);</p> <p>T – час горіння год.(70);</p> <p>$Ц$ – вартість 1 КВт</p> $V_{e.осв.} = \frac{30 \cdot 15 \cdot 0.8 \cdot 70 \cdot 1,68}{1000} 42,34$
Загальні витрати на електроенергію, грн.	$V_{заг} = V_{e.уст.} + V_{e.осв.}$ $V_{заг} = 262,86 + 42,34 = 305.2$

4.4 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Амортизацією називають процес відшкодування зносу основних фондів. Амортизаційні відрахування – грошове вираження амортизації для одиниці устаткування в даній роботі за час виконання роботи визначають за формулою:

$$A_{\text{заг}} = \frac{B_{\text{в}}}{T} \cdot \frac{M}{12}, \quad (4.2)$$

де $B_{\text{в}}$ - балансова вартість устаткування, грн;

T – мінімальний термін корисного використання;

M – кількість місяців роботи.

Вартість основних фондів та розрахунок амортизаційних відрахувань наведені у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Вартість основних фондів та розрахунок амортизаційних відрахувань

Найменування устаткування	Одиниці виміру	Кількість	Термін кор. вик-ня	Вартість одиниці, грн.	Час роботи, міс.	Сума амортизації, грн.
Камерна піч	шт.	1	5	26000	0,006	2,71
Мікроскоп металографічний МІМ-7	шт.	1	5	7000	0,012	1,46
Твердомір ПМТ-3	шт.	1	5	12000	0,012	2.5
Комп'ютер	шт.	1	2	5000	1,981	412,77
Приміщення	м ²	30	20	45000	2	375,00
Всього				95000		794,44

4.5 Витрати на господарський інвентар

Кошторис витрат на господарський інвентар приведений у таблиці 4.6.

Амортизаційний відрахування на господарський інвентар визначаються по формулі:

$$V_{\text{госп.інв.}} = \frac{C_{\text{од}}}{T} \cdot \frac{M}{12}, \quad (4.3)$$

де $C_{\text{од}}$ - балансова вартість інвентарю, грн;

M – кількість місяців роботи.

T – мінімальний термін корисного використання.

Таблиця 5.6 - Витрати на господарський інвентар

Найменування устаткування	Кількість	Вартість одиниці, грн.	Термін кор. виконання	Час роботи, міс.	Сума амортизації, грн.
Стіл	1	1586	4	2	66,08
Стілець	1	1065	4	2	44,38
Шафа	1	3185	4	2	132,71
Всього		5836			243,17

4.6 Розрахунок витрат по елементу «Інші витрати»

До даного елемента відносяться:

- Витрати на службові командировки;
- Витрати на оплату робіт (послуг) консультативного та інформаційного характеру;
- Витрати на оплату робіт, пов'язаних з сертифікацією продукції;
- Інші витрати.

Таблиця 4.7 – Витрати на оплату консультантів

Найменування посади	Оклад, грн./місяць	Пояснення	Сума, грн.
Консультант з економіки	10982	0.5 години	34,32
Консультант з охорони праці	10982	0.5 години	34,32
Всього			68,64

Кошторис розрахованих у дипломній роботі витрат на дослідження приведений у табл. 4.8

Таблиця 4.8 – Кошторис витрат на проведення дипломного дослідження

Витрати	Сума
Основна заробітна плата	1510,03
Додаткова заробітна плата	1057,03
Соціальні податки	683,68
Витрати на матеріали	528,11
Витрати на електроенергію	305,2
Амортизаційні відрахування на устаткування	794,44
Амортизаційні відрахування на господарський інвентар	243,17
Інші витрати	68,64
Накладні витрати (20% від фонду заробітної плати)	513,412
Всього (собівартість дипломної роботи) $C_{д.р.}$	5703,71

Витрати по дипломному дослідженню обчислюються по формулі:

$$V_{д.р.} = (K_{уст} \cdot E_n + C_{д.р.}) \cdot K, \quad (4.4)$$

де $K_{уст}$ – капітальні витрати на устаткування та господарський інвентар грн;

E_n - нормативний коефіцієнт економічної ефективності (0,15);

$C_{д.р.}$ - собівартість дипломної роботи, грн;

K – коефіцієнт, що враховує планові накопичення (1,05).

$$V_{\text{д.р.}} = (100836 \cdot 0,15 + 5703,71) \cdot 1,05 = 21870,56$$

Загальні передвиробничі витрати залежать від частки участі підприємств у розробці. У середньому частка пошукових та прикладних досліджень складає 40%

$$V_{\text{підпр}} = \frac{V_{\text{д.р.}}}{0,4}$$

$$V_{\text{підпр}} = \frac{21870,56}{0,4} = 54676,41$$

4.7 Розрахунок економічного потенціалу дипломної роботи

Економічний потенціал дипломного дослідження визначається по формулі:

$$E_{\text{п}} = V_{\text{підпр}} \cdot p \cdot t / 12, \quad (4.5)$$

де P - кількість дослідників, які працюють над даною темою (2);

t - тривалість даного дослідження в місяцях (2).

$$E_{\text{п}} = \frac{54676,41 \cdot 2 \cdot 2}{12} = 18225,47$$

5 ОХОРОНА ПРАЦІ Й НАВКОЛИЩНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1 Загальні питання охорони праці

Законодавство про охорону праці складається з закону України “Про охорону праці”, Кодексу законів про працю України, Закону України "Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності" та прийнятих відповідно до них нормативно-правових актів.

Тема бакалаврської дипломної роботи присвячена визначенню кількості залишкового аустеніту у важконавантажених підшипниках.

Дана магістерська робота проводиться в металографічній лабораторії кафедри технології металів і матеріалознавства ім. О. М. Петриченко ХНАДУ.

Питання охорони праці й навколишнього середовища розглянуті для забезпечення здорових і безпечних умов праці дослідника на робочому місці при роботі з дослідницьким та комп'ютерним обладнанням.

5.2 Виробнича санітарія

При проведенні бакалаврської науково-дослідної роботи в металографічній лабораторії кафедри можливі небезпечні та шкідливі виробничі фактори, перелік яких наведено у табл. 5.1.

5.2.1 Метеорологічні параметри робочої зони

Робота за комп'ютером виконується сидячи, не вимагає фізичних навантажень та перенесення важких предметів. Енерговитрати не перевищують норм для легких видів роботи, то робота відповідно по категорії важкості – легка фізична Іа, оптимальні параметри мікроклімату для неї наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.1 – Перелік шкідливих і небезпечних факторів у виробничому приміщенні металографічної лабораторії кафедри

№	Найменування факторів	Джерела їх виникнення	Параметр, що нормується та позначення	Нормативний документ
1	2	3	4	
1	Підвищений рівень шуму та вібрації	Форвакуумний пластинчато-роторний насос	Рівень звуку L_A , дБ(А), віброшвидкість V , м/с; віброприскорення a , м/с ² ;	ДСН 3.3.6.037-99[22]; ДСН 3.3.6.039-99
2	Несприятливі параметри мікроклімату	Незадовільна робота опалення або вентиляції	Температура (t °С), вологість (ϕ , %), швидкість руху повітря V , (м/с)	ДСН 3.3.6.042-99
3	Підвищене значення електричної напруги	Електронний мікроскоп (ПЕМ-100-01), магнітний структуроскоп (УКА.МС-Фст-ПЕ), дифрактометр ДРОН-3	U, В – напруга, I, А - сила струму	ДСТУ Б В.2.5-82:2016
4	Електромагнітне (в тому числі рентгенівське) випромінювання	Електронний мікроскоп (ПЕМ-100), магнітний структуроскоп (УКА.МС-Фст-ПЕ), системний блок комп'ютера, мережа живлення	E, (В/м), H, (А/м), ЛД, бер/рік –ліміт дози $D_{екв}$, мкР/год	ДСанПіН 3.3.2.007-98; НРБУ97/Д 2000
5	Незадовільний рівень освітленості	Освітлювальні прилади	D_n , %, E_{min} , лк	ДБН В. 2.5-28:2018

Таблиця 5.2 – Оптимальні параметри мікроклімату для категорії Іа

Категорія робіт	Період року	Температура °С	Відносна вологість, %, не більше	Швидкість руху повітря, м/с, не більше
Легка Іа	Теплий	22-25	40-60	0,1
	Холодний	21-24	40-60	0,1

Для підтримання необхідного мікроклімату у приміщенні, де виконувалась магістерська робота, необхідно проводити природну та штучну вентиляцію. У холодну пору року - опалення від системи центральної тепломережі, згідно ДБН В.2.5-67:2013.

Робота з розчинами травників металів проводиться з використанням витяжного зонта (витяжної шафи) та з обов'язковим використанням засобів індивідуального захисту (респіратори, спеціальний одяг, окуляри, щитки та інш.).

5.2.2 Виробниче освітлення

Освітлення в приміщення залежить від виду джерела, воно може бути: природним, штучним та суміщеним, відповідно до ДБН В.2.5-28:2018.

При роботі за комп'ютером є постійна й значна напруга функцій зорового аналізатора, що обумовлено необхідністю знаходження символів, знаків при наявності відблисків на екрані, рядковій структурі екрана, мерехтіння зображення, недостатньою чіткістю об'єктів розходження, тому таку роботу відносять до III розряду зорової праці та під розряду "Г", для якого застосовують лише суміщене освітлення. Воно здійснюється через вікна та за допомогою загального рівномірного штучного освітлення, яке нормується КПО, $D_{\min}^{н сум}, \%$. В темний період доби - тільки загального рівномірного штучного освітлення, воно нормується мінімальною освітленістю E_{\min} , нормативні дані наведені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Характеристики виробничого освітлення

Характеристика зорових робіт	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд, підрозряд зорової роботи	Характеристика типу фону	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Нормативне значення параметрів освітлення	
					Суміщене $D_{\min}^{н сум}, \%$	Штучне, лк
Високої точності	0,3 - 0,5	III, Г	Світлий	Великий	1,2	400

Реалізація D_n , % здійснена при будівництві споруди у цілому шляхом розрахунку площі світлових прорізів.

Для реалізації нормованого освітлення в лабораторії в якості джерел світла використовуються люмінесцентні лампи типу: ЛД 80–4, які є найбільш економічними, з високою світловіддачею і спектром світла, близьким до природного.

5.2.3 Шум та вібрація

Шум та вібрація у робочому приміщенні несприятливо впливають на слуховий аналізатор та організм людини. Діяльність з інтенсивним використанням комп'ютера, характеризується впливом на працюючого рівнів шуму та вібрації. Їх джерелами є вентилятори, які розташовані в системному блоці комп'ютера і робота принтера. При цьому підвищений рівень цих факторів створює швидку втомлюваність та зниження розумової працездатності.

У приміщенні, де виконується бакалаврська робота, рівень звуку не перевищує 65 дБА. Норми вібраційного навантаження на працівника, що встановлені для категорій вібрації - 3 тип "в" комфорт, згідно ДСН 3.3.6.039-99.

Для зниження рівня шуму та вібрації необхідне використання спеціальних поглинаючих шум перегородок, застосування меблів, які сприяють зменшенню шуму і вібрації, установка апаратів і приладів на спеціальні амортизуючі підкладки.

5.2.4 Електромагнітне та рентгенівське випромінювання

Електромагнітне випромінювання (ЕМВ) – взаємопов'язані коливання електричного та магнітних полів, що утворюють електромагнітне поле. Нормованими параметрами є напруженості електричного поля \bar{E} (В/м) і магнітного поля \bar{H} (А/м) або магнітної індукції \bar{B} (Тл).

Принципи захисту від впливу електромагнітних випромінювань при роботі за комп'ютером: тривалість роботи за комп'ютером не повинна перевищувати 4 годин на день, з перервами від роботи через кожну годину тривалістю 10 хв - 15 хв; для потреби особливої концентрації уваги під час виконання робіт суміжні робочі місця необхідно відділяти одне від одного перегородками висотою 1,5 м, на один комп'ютер виділяється не менше 6 м²; з метою діагностики і лікування стану здоров'я, які пов'язані з електромагнітними випромінюваннями, працюючий повинен проходити періодичний медичний огляд.

При проведенні окремих досліджень мікроструктури в рентгенівській лабораторії з використанням електронного мікроскопу ПЕМ-100-01 та дифрактометру ДРОН-3 на виконавця робіт діє рентгенівське випромінювання. Для людей, постійно працюючих в лабораторії, існує ліміт дози, котрий складає 3 бер/рік. Забезпечення вказаного ліміту дози досягнуто в приміщенні лабораторії захисними кожухами та захисним склом згідно НРБУ – 97/Д 2000.

5.3 Електробезпека у робочому приміщенні

Приміщення лабораторії за безпекою враження електричним струмом згідно з вимогами ПУЕ-2017 відноситься до класу приміщення з підвищеною безпекою, тому що у приміщенні існує можливість одночасного доторкання людини до з'єднань з землею металевих конструкцій будинку (труби водопроводу), з однієї сторони, і до металевих корпусів електрообладнання - з іншої.

Обладнання рентгенівської лабораторії працює від трьохфазної чотирьох провідної мережі змінного струму напругою 380 В/220 В, промисловою частотою 50 Гц.

Для забезпечення електробезпеки працівників застосовують у цьому випадку застосовують схемно-конструктивні, конструктивні, експлуатаційні та організаційні заходи захисту - занулення та заземлення.

Із схемно-конструктивних заходів захисту в основному застосовують занулення, а в установці ДРОН-3 та електронному мікроскопі ПЕМ-100-01, де в окремих частинах застосовують напругу 1200 В, також і захисне заземлення.

Захисне заземлення – це навмисне електричне з'єднання з землею неструмоведучих частин електроустановок. Занулення – це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих неструмоведучих частин електроустановок.

Конструктивні заходи: відноситься до електроустановок до 1000 В закритого використання, всі рубильники встановлені в закритих корпусах, всі струмоведучі частини розміщені в закритих блоках.

Експлуатаційні та організаційні заходи: перед вмиканням електроприладу необхідно візуально перевірити електрошнур на наявність механічних пошкоджень; не працювати з електроприладом вологими руками; використовувати його за інструкцією, необхідна наявність апаратури захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Персональні комп'ютери і периферійні пристрої повинні підключатися до електромережі тільки за допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. До самостійних дослідницьких робіт на використовуваному обладнанні допускається особи, які мають II або вищу групу допуску роботи з електрообладнанням залежно від напруги, що застосовується в обладнанні.

5.4 Пожежна безпека

Приміщення лабораторії за вибухопожежною і пожежною небезпекою згідно ДСТУ Б.В 1.1-36:2016 відносяться до категорії «В», тому що є тільки тверді горючі речовини і матеріали.

Пожежна безпека на вимоги ДБН В.1.1.7:2016 забезпечується системами запобігання пожежі, пожежного захисту, організаційно-технічними заходами.

Система запобігання пожежі містить у собі: контроль і профілактику ізоляції, захисне заземлення й занулення, захист будинку від блискавки згідно ДСТУ Б Б.2.5-38:2008.

У приміщенні системою протипожежного захисту передбачені: застосування засобів пожежогасіння, вогнегасників типу ВВ-2, характеристика приміщення приведена в табл. 5.4. Крім того застосовується пожежна сигналізація та евакуаційні виходи.

Таблиця 5.4 – Характеристика приміщення

Приміщення	Площа приміщення	Ступінь по вогнестійкості	Первинні засоби захисту від пожежі	Кількість первинних засобів від пожежі, од
Лабораторія	40 м ²	II	Вогнегасники вуглекислотні ВВ-2	2

Організаційними заходами в приміщенні кафедри передбачено проведення інструктажів з пожежної безпеки, розроблений план евакуації при виникненні пожежі.

5.5 Охорона навколишнього природного середовища

Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» регулює відношення в області охорони, використання та відтворення природних ресурсів, регулює вплив господарської діяльності на довкілля. На кафедрі ТМ і М ХНАДУ утворюються відходи паперу, несправного та застарілого електрообладнання, люмінесцентні ламп та ін.

Зменшення шкідливості впливу на навколишнє середовище вирішується за кількома напрямками: суворе дотримання нормативів гранично допустимих викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище та удосконалення очищення викидів і відходів, підвищення ефективності роботи очисних споруд.

ВИСНОВКИ

Проаналізувавши отримані експериментальні результати визначення кількості залишкового аустеніту у важконавантажених підшипниках, можна зробити наступні висновки.

1 Відповідно до поставленої задачі відпрацьована рентгенодифрактометрична методика визначення кількості залишкового аустеніту в зразках зовнішніх вагонних кілець роликів залізничних підшипників зі сталі типу ШХ15СГ. Зроблений вибір дифракційних ліній для проведення безеталонного розрахунку методу кількісного фазового аналізу.

2 Розроблена методика була використана для визначення вмісту залишкового аустеніту в зразках серійних кілець. Вміст аустеніту коливається в інтервалі 9–15,5 %, що цілком відповідає діаграмам розпаду переохолодженого аустеніту при режимах термічного оброблення, які прийняті для сталі типу ШХ15СГ.

3 При вимірюванні залишкового аустеніту на аустенітометрі вміст дорівнює 12–18 %, що також відповідає нормам.

4 Порівнявши значення вмісту залишкового аустеніту, отримані на аустенітометрі та на апараті ДРОН-3, можна зробити висновок про можливість використання приладу вимірювання кількості залишкового аустеніту (аустенітометра), робота якого заснована на вимірюванні величини намагніченості насичення кілець. Даний метод має наступні переваги для використання на підприємстві: виключення додаткових витрат на виготовлення спеціальних зразків; є методом неруйнівного контролю; простота в роботі; виключає спеціальну підготовку працівників ВТК на приладі; оперативність методу.

5 З огляду на те що режими термічного оброблення кілець залізничних підшипників відпрацьовані та стабільно виконуються і контролюються на підприємстві, можна гарантувати, що процентний вміст аустеніту не перевищує норми 20 %.

Результати досліджень можуть бути використані на виробництві та у науково-дослідних роботах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Полікарпов, І. Ф., та ін. (2015). Спеціальні сталі та сплави з особливими властивостями (підручник). Одеса: ОНПУ.
- 2 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.
- 3 Кухар, В. І., та ін. (2008). Технологія конструкційних матеріалів (підручник). Вища школа.
- 4 Кузьменко, О. В., Куцова, В. З., Носко, О. А. (2013). Металознавство (підручник). НМетАУ.
- 5 Вандишев, Б. В., Панасюк, І. В. (2015). Термічна обробка металів (навч. посіб.). НТУУ «КПІ».
- 6 Ashby, M. F., Shercliff, H., Cebon, D. (2014). *Materials: Engineering, Science, Processing and Design* (3rd ed.). Elsevier.
- 7 Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.). Wiley.
- 8 Hassan, F., Al-Marzouki, F. (2014). *Advanced Materials: Mechanical, Electronic, and Optical Properties*. CRC Press.
- 9 Sellers, D. J. (2014). *The Metallurgy of Steel: History and Principles*. Springer.
- 10 Totten, G. E., Xie, L., Funatani, K. (Eds.). (2017). *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International.
- 11 Reed, R. C., Reed, A. C. (2019). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press.
- 12 Tsyganenko, O. M., & Kuts, V. O. (2012). *Welding and Joining of Advanced Materials* (monograph). Sumy State University.
- 13 Ткачук, А. К., Бобрик, О. Б. (2010). Композиційні матеріали (навч. посіб.). НМетАУ.
- 14 Meyers, M. A., Chawla, K. K. (2009). *Mechanical Behavior of Materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.

15 Мудрий С. І. Рентгеноструктурний аналіз у матеріалознавстві. Навч.-метод. посіб. [для вищ. навч. закл.] / С. І. Мудрий, Ю. О. Кулик, А. С. Якимович // Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. – 226 с.

16 Канарчук В.Є., Шевченко В.І. Методи дослідження металів: навч. посіб. Київ : НТУ, 2001. 98 с.

17 Гнатуш, В. І., та ін. (2015). Основи теорії планування та аналізу експерименту (навч. посіб.). Львівська політехніка.

18 Дуднік, О. М., Заполовський, А. М. (2013). Математичне моделювання та обробка експериментальних даних (навч. посіб.). КНУБА.

19 Holman, J. P. (2015). *Experimental Methods for Engineers* (7th ed.). McGraw-Hill.

20 Gottwald, J. (2015). *Modern Metallography Techniques*. CRC Press.

21 Vasiliev, A. D., et al. (2014). *Methods of Studying the Structure and Properties of Metals and Alloys* (Textbook). Kharkiv National University.

22 Заплатинський, В. М., та ін. (2013). Основи охорони праці (підручник). КНТУ.

23 Атлас, М. М., та ін. (2015). Охорона праці в галузі (навч. посіб.). Національний авіаційний університет.

25 Сьомов, І. М. (2011). Промислова екологія (навч. посіб.). НМетАУ.

26 Faller, M. J., et al. (2015). *Industrial Noise Control and Acoustics*. Wiley.

27 Законодавство України про охорону праці (Збірник нормативно-правових актів). (2015). Юрінком Інтер.

28 ДСТУ ISO 45001:2018 (Охорона здоров'я та безпека праці). (Передував OHSAS 18001:2007). Стандарт. (Українська/Англійська) Примітка: ДСТУ 2018, але заснований на міжнародній практиці 2007 р.

29 Березуцький, В. В., Захаров, В. М. (2012). Пожежна безпека об'єктів (підручник). КНТУ.

30 Occupational Exposure Limits for Chemical Agents in the Workplace. (2015). International Labour Organization (ILO).

ДОДАТОК А
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Міністерство освіти та науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет

Кафедра технології металів і матеріалознавства імені О.М. Петриченка

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ
магістра

**«ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ЗАЛИШКОВОГО АУСТЕНІТУ
У ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ПІДШИПНИКАХ»**

Завідувач кафедри д-р техн. наук, проф.



Діана ГЛУШКОВА

Нормоконтролер канд. техн. наук, доцент



Юрій ДУДУКАЛОВ

Керівник, доцент



Тетяна ПРОТАСЕНКО

Студент гр. МС-61-24



Ігор Залєвадський

Харків – 2025



Механічний факультет

Кафедра технології металів і матеріалознавства імені О.М. Петриченка
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Визначення кількості залишкового аустеніту у важконавантажених підшипниках

Завідувач кафедри д-р техн. наук, проф.
Нормоконтролер канд. техн. наук, доцент
Керівник, доцент
Студент гр. МС-61-24

Діана ГЛУШКОВА
Юрій ДУДУКАЛОВ
Тетяна ПРОТАСЕНКО
Ігор ЗАЛЄВАДСЬКИЙ

Харків - 2025

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Як відомо, у процесі експлуатації залізничні роликові підшипники сприймають динамічні та контактні навантаження. Тому термічне оброблення таких підшипників повинно створювати в них високий рівень контактно-втомної міцності, твердості та зносостікості.

Для кілець залізничних підшипників з діаметром 230-400 мм при товщині стінок 15-35 мм, використовують сталь ШХ15СГ, яка відноситься до заевтектійних сталей. Твердість такої сталі залежить від концентрації залишкового аустеніту, яка тим більше, чим більше кількість карбідів, які переходять у твердий розчин при нагріванні під гартування. За технічними умовами кількість залишкового аустеніту після термічного оброблення не повинна перевищувати 25 %. При більшій концентрації залишкового аустеніту в процесі експлуатації підшипників можливий його розпад з утворенням мартенситу, який має більший питомий об'єм порівняно з аустенітом, що може призводити до виникнення залишкових напружень і утворенню тріщин, особливо при неоднорідному розподілу залишкового аустеніту в об'ємі виробу. Тому задача визначення вмісту залишкового аустеніту в кільцях залізничних підшипників є важливою.

ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ



Метою даної роботи є отримання даних про концентрацію залишкового аустеніту в кільцях важконавантажених роликів залізничних підшипників зі сталі ШХ15СГ за різними методиками.

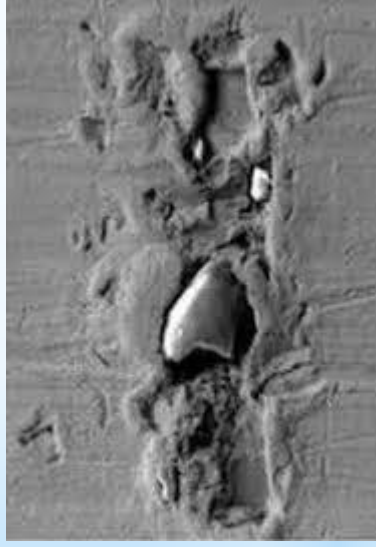
Для вирішення цього завдання проводився комплекс якісних та кількісних структурних досліджень зразків сталі ШХ15СГ за різними методиками та порівняння даних, які отримані за допомогою двох методів вимірювання залишкового аустеніту.

Розроблена безеталонна методика дозволяє визначити кількість залишкового аустеніту в зразках.

МАТЕРІАЛ ДОСЛІДЖЕНЬ

Таблиця 1 - Хімічний склад сталі марки ШХ15СГ

Марка сталі	Хімічний склад, %					
	C	Cr	Mn	Si	S	P
ШХ15СГ	0,95-1,05	1,30-1,65	0,9-1,2	0,4-0,65	≤ 0,02	≤ 0,027



До сталей марки ШХ15СГ пред'являються вимоги в співвідношенні чистоти за неметалевими включеннями, поверхневими дефектами, щільністю, макроструктурою, карбідною неоднорідністю.

Це пов'язано з тим, що під дією високих зосереджених у малому об'ємі знакоперемінних навантажень більшість дефектів макроструктури і великих неметалевих включень є концентраторами напружень і осередків зародження втомних тріщин при експлуатації підшипників.

Методика визначення залишкового аустеніту

1. Визначення залишкового аустеніту на установці УКА.МС-56

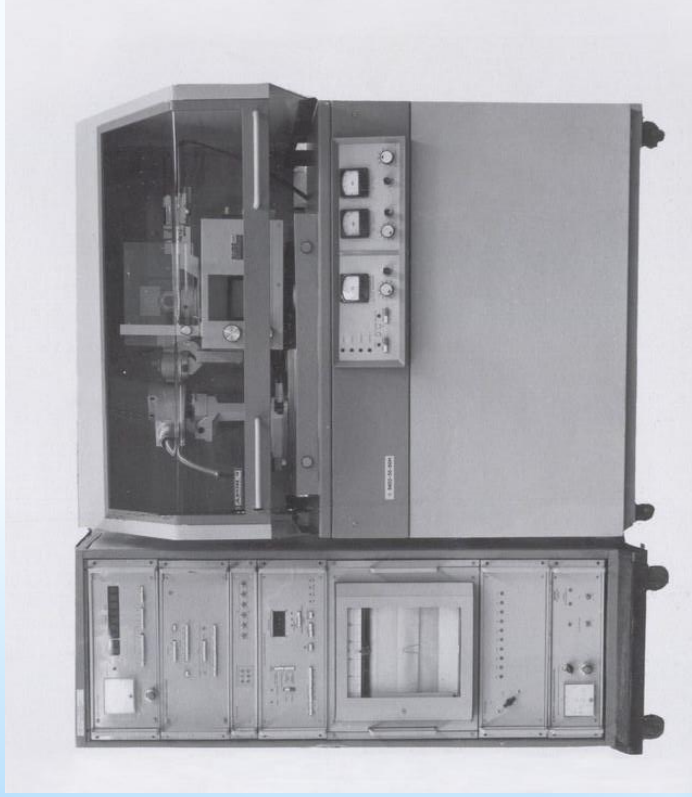


Структороскоп магнітний відноситься до класу контрольних засобів неруйнівного контролю одного виробництва, відповідно до галузевої інструкції і призначений для контролю відповідності встановленим нормам вмісту залишкового аустеніту в кільцях залізничних підшипників зі сталі ШХ15СГ.

Робота установки заснована на вимірюванні намагніченості насичення, що характеризує вміст залишкового аустеніту.

Вимірювання величини, яка характеризує намагніченість насичення, проводиться методом компенсування поля, яке діє на ферозонд (котушки намагнічування і частково кільця).

2. Визначення залишкового аустеніту на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3

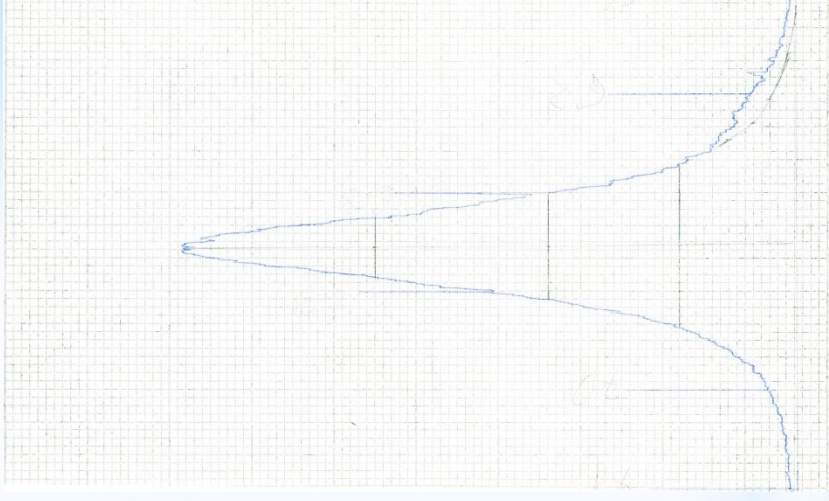
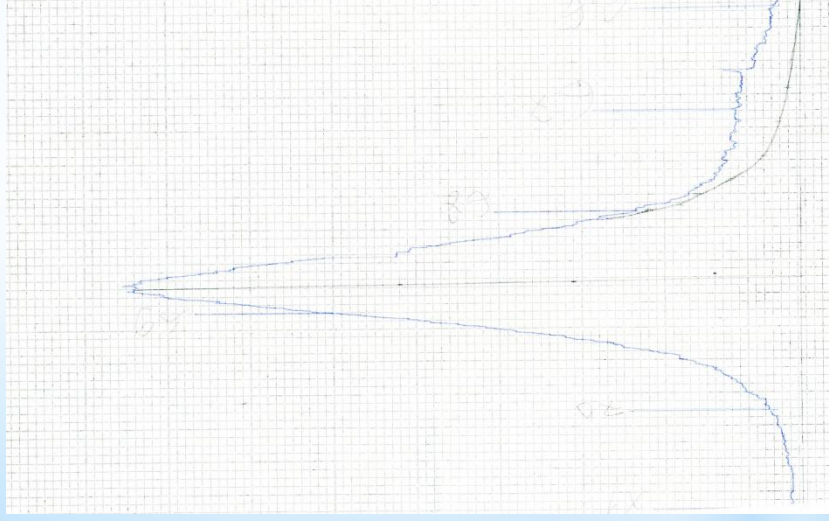


Кількісний фазовий аналіз, тобто визначення об'ємного вмісту якої-небудь однієї чи усіх фаз у багатофазному зразку, засноване на тому, що інтенсивність лінії даної фази пропорційна об'ємній частці її в суміші, а також так називаної відбивальної здатності обраних кристалографічних площин.

Кількісний аналіз припускає вимірювання інтегральної інтенсивності ліній з високим ступенем точності. Тому в даний час для кількісного аналізу використовуються головним чином рентгенівські дифрактометри.

Рентгенівська зймка проводилася на дифрактометрі ДРОН-3 у випромінюванні хромового анода. Як селективно-поглинаючий фільтр для відсівання K_{β} -випромінювання використовувався фільтр із ванадію. Знімання проводилося за стандартною схемою $\theta - 2\theta$ с фокусуванням по Бреґу - Брентано шляхом запису на діаграмну стрічку.

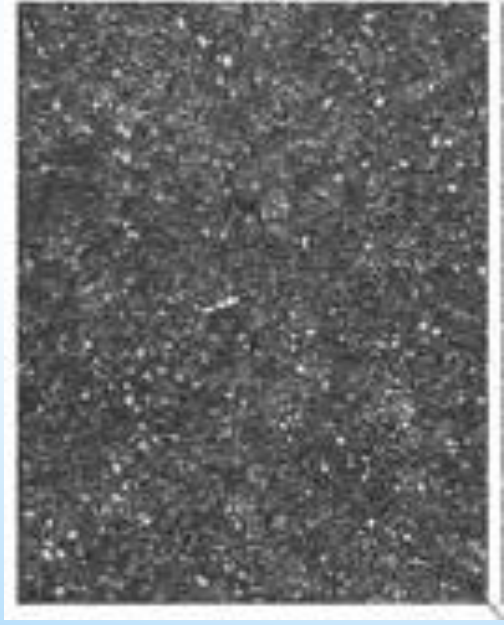
Результати визначення кількості залишкового аустеніту в зразках кілець залізничних підшипників



Ділянка дифрактограми в інтервалі $2\theta = 64-74^\circ$, яка включає в себе дифракційні профілі аустеніту $(111)_\gamma$, мартеніту $(110)_\alpha$, і лінії цементиту Fe_3C .

У зразках, які досліджуються, виявляються інтенсивні лінії мартеніту, слабкі лінії аустеніту і дуже слабкі лінії цементиту.

Структура сталі ШХ15СГ після стандартного термічного оброблення



Кільця зі сталі типу ШХ15СГ проходять термічне оброблення за наступним режимом: попередній відпал сталі ШХ15СГ проводять для зняття внутрішніх напруг, поліпшення оброблюваності та підготовки до загартування, зазвичай в діапазоні 800 ± 10 °С з наступним повільним охолодженням в печі до 650 °С. Отримують структуру зернистого перліту зі зниженою твердістю (НВ 179-207).

При гартуванні нагрівання проводять в печі до температур 830 ± 10 °С, після витримування охолодження в оливі, відпускання при температурі 200 ± 10 °С. При цьому зберігається висока твердість (61-65 HRC).

При проведенні металографічного аналізу спостерігається чітко виражений дрібнодисперсний голчастий мартенсит, залишковий аустеніт і велика кількість карбідів (Fe_3C).

Залишковий аустеніт є дефектом підшипникової сталі. З кількістю залишкового аустеніту пов'язана розмірна стабільність готових підшипників у процесі експлуатації. Вихідна структура зернистого перліту забезпечує мінімальну кількість залишкового аустеніту. Структура сталі настільки дрібна, що розрізнити зерна аустеніту важко.

Дані вимірювання залишкового аустеніту

Таблиця 2 - Результати визначення кількості залишкового аустеніту в сталі ШХ15СГ зовнішніх вагонних кілець залізничних підшипників

Номер зразка	Значення вимірювань $A_{\text{зал}}, \%$	
	Аустенітометр	ДРОН-3
1	15	12
2	17	10,5
3	17,5	15,5

Перетворення 1% аустеніту на мартенсит призводить до зміни розмірів сталі на $1 \cdot 10^{-4}$, що становить 10 мкм на кожні 100 мм розміру. Існує критична кількість залишкового аустеніту, нижче за який стабільність розмірів сталі в межах $1 \cdot 10^{-5}$ при мінусовій і кімнатній температурах зберігається. Наприклад, критична кількість аустеніту, що зберігає стабільність розмірів сталі ШХ15 протягом 3-5 років в межах $1 \cdot 10^{-6}$, становить після гартування при 840 і 880 °С і відпустці 100 °С відповідно 5 і 10%, після відпустки 150 °С - відповідно 10 і 19%.

Порівняння даних, отриманих при визначанні залишкового аустеніту на аустенітометрі та дифрактометрі



Порівнюючи вміст залишкового аустеніту, який вимірювався на аустенітометрі й апараті ДРОН-3 (табл. 2), видно, що розходження дорівнює від 2 % до 6,5 %. Причому показання дифрактометра нижче показань аустенітометра, що дозволяє стверджувати, що визначення залишкового аустеніту на апараті ДРОН-3 є більш коректним і точним.

Але показання аустенітометра не перевищують норм вмісту залишкового аустеніту (20 %), у зв'язку з чим можна стверджувати, що аустенітометр можна використовувати на виробництві, як більш зручний прилад для визначення залишкового аустеніту. При цьому необхідно один раз на рік проводити рентгенівський кількісний аналіз для атестування на такий параметр як залишковий аустеніт.

ВИСНОВКИ

Проаналізувавши отримані експериментальні результати дослідження визначання кількості залишкового аустеніту у важконавантажених підшипниках, можна зробити наступні висновки:

1. Відповідно до поставленої задачі відпрацьована рентгенодифрактометрична методика визначення кількості залишкового аустеніту в зразках зовнішніх вагонних кілець роликів залізничних підшипників зі сталі ШХ15СГ. Зроблен вибір дифракційних ліній для проведення безеталонного розраховування методу кількісного фазового аналізу.

2. Розроблена методика була використана для визначення вмісту залишкового аустеніту в зразках серійних кілець. Вміст аустеніту коливається в інтервалі 9-15,5 %, що цілком відповідає діаграмам розпаду переохолодженого аустеніту при режимах термічного оброблення, які прийняті для сталі ШХ15СГ.

3. При вимірюванні кількості залишкового аустеніту на аустенітометрі його вміст дорівнює 12-18 %, що також відповідає нормам (допускається залишковий аустеніт в межах 10-20%, іноді більше при деяких режимах загартування).

4. Порівнявши значення вмісту залишкового аустеніту, отримані на аустенітометрі та на апараті ДРОН-3, можна зробити висновок про можливість використання приладу вимірювання кількості залишкового аустеніту (аустенітометра), робота якого заснована на вимірюванні величини намагніченості насичування кілець. Даний метод має наступні переваги для використання на підприємстві: виключення додаткових витрат на виготовлення спеціальних зразків; є методом неруйнівного контролю; простота в роботі; виключає спеціальну підготовку працівників ВТК на приладі; оперативність методу.
5. З огляду на те що режими термічного оброблення кілець за лізничних підшипників відпрацьовані та стабільно виконуються і контролюються на підприємстві, можна гарантувати, що процентний вміст аустеніту не перевищує норми 20 %.



Дякую за увагу

Вітаємо АНДРІЙ СУМІНОВ,

Ми завершили аналіз документа на плагіат:
**ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ЗАЛИШКОВОГО АУСТЕНІТУ У
ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ПІДШИПНИКАХ**
Автор: Залєвадський

Отримані коефіцієнти подібності:

Коефіцієнт подібності 1: **3.20%**
Коефіцієнт цитування: **0.44%**

Заміна букв: **19**
прогалини: **0**
Мікропробіли: **5**
Інтервали: **0**

Пошук контенту ШІ
Індикатор Контенту ШІ: —

Щоб відкрити інтерактивний звіт, натисніть [сюди](#)

Якщо у Вас виникли запитання, зв'яжіться з нами за адресою:
ukraine@strikeplagiarism.com

Strikeplagiarism.com

Будь ласка, не відповідайте на це повідомлення. Додаткова інформація доступна на веб-сайті
<https://panel.strikeplagiarism.com>

Офіс Plagiat.pl Sp. z o.o., власник системи StrikePlagiarism.com, зареєстрований за адресою: м. Варшава,
вул. Гданська 2/67, 01-633, ІПН: 5262874777, Період: 140124469, внесений до Національного судового
реєстру Річного суду міста Варшави під номером KRS 0000236

Ви отримали цей електронний лист, оскільки створили обліковий запис на сайті <https://panel.strikeplagiarism.com>. Якщо це не ви пройшли реєстрацію, будь ласка, зв'яжіться з нами.

РЕЦЕНЗИЯ

на кваліфікаційну роботу магістра
«Визначення кількості залишкового аустеніту
у важконавантажених підшипниках», що виконана
студентом групи МС-61-24
механічного факультету ХНАДУ
Залєвадським Ігорем Вікторовичем

Тема магістерської роботи є актуальною та сучасною, присвячена отриманню даних про можливість використання на виробництві різних методів визначення кількості залишкового аустеніту в кільцях важконавантажених залізничних підшипників, виготовлених зі сталі ШХ15СГ.

Студентом Залєвадським І.В. була проаналізована досить значна кількість літературних джерел інформації по даній тематиці, проведений комплекс якісних та кількісних структурних досліджень зразків сталі ШХ15СГ після кінцевого термічного оброблення за різними методиками. Розроблена безеталонна методика, яка дозволяє визначати кількість залишкового аустеніту в підшипниковій сталі.

В якості недоліків слід відзначити відсутність проведення механічних досліджень сталі.

При виконанні дипломної роботи було використано сучасний пакет прикладних програм, зокрема системи Excel, за допомогою якого побудовані графіки.

Дана науково-дослідна робота є цілком завершеним дослідженням та відповідає усім вимогам щодо дипломних робіт рівня магістра. Вона виконана на досить високому науково-експериментальному рівні та заслуговує позитивної оцінки.

Рецензент кваліфікаційної роботи,
доцент кафедри Матеріалознавства,
НТУ «ХПІ», канд. техн. наук

Олена РЕБРОВА

“ 7 ” 12 2025 р.



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ВІДГУК

керівника кваліфікаційної роботи магістра
виконаної здобувачем денної форми навчання
механічного факультету групи МС-61-24
Залевадським Ігорем Вікторовичем

на тему: «ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ЗАЛИШКОВОГО АУСТЕНІТУ

У ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ПІДШИПНИКАХ»

Дипломна робота студента Залевадського Ігоря Вікторовича присвячена актуальній темі – визначенню вмісту залишкового аустеніту в кільцях важконавантажених залізничних роликів підшипників, застосовуючи різні методи.

Науковий інтерес робіт пов'язаний з можливістю зіставлення різних методів визначення кількості залишкового аустеніту в сталі ШХ15СГ, призначеної, для виготовлення залізничних підшипників, що працюють у широкому діапазоні температур і швидкостей.

Для виконання поставленої мети дослідження був проведений комплекс якісних та кількісних структурних досліджень зразків сталі типу ШХ15СГ за різними методиками. Оцінювання наявності залишкового аустеніту в структурі сталі здійснювалось за допомогою аустенітометра та рентгенівського кількісного фазового аналізу.

Структура роботи відповідає вимогам, які до неї пред'являються, а змістовна частина розглядає представлену тему докладно і всебічно.

При виконанні дипломної роботи студент Залевадський І.В. продемонстрував відповідальне відношення до всіх етапів як теоретичної так і практичної спрямованості.

У цілому робота студента Залевадського І. В. виконана на необхідному теоретичному та методичному рівнях, повністю відповідає вимогам, які до неї пред'являються, заслуговує позитивну оцінку.

Керівник дипломної роботи, доц.

« _____ » _____ 2025 р.



Тетяна ПРОТАСЕНКО