

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

магістра

Освітньо-кваліфікаційний рівень

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і назва галузь знань

Напрямок підготовки (спеціальність): 132 «Матеріалознавство,
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

Шифр і назва напрямку підготовки (спеціальності)

на тему: **«Дослідження впливу властивостей сталі
8X4B9Ф2-Ш на експлуатаційні характеристики
високо точних підшипників»**

Шифр МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ

Виконав: *студент 2-го курсу,*
група МТВАм-22-1


Підпис

О.О. Гуменюк
Ініціали, прізвище

Керівник *к.т.н., доц. каф ТАМ.*


Підпис

С.Ф. Посонський
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ *д.т.н., проф.*

Підпис

О.В. Діха
Ініціали, прізвище

_____ 2023 р.

Хмельницький, 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інженерії, транспорту та аеріації*
Кафедра *аеріації, автомобілів та матеріалознавства*

Освітній рівень *магістр*

Спеціальність *132 «Матеріалознавство»*

Спеціалізація *«Відновлення та технічний сервіс автомобілів»*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ

_____ Диха О.В.
16 жовтня 2023 року

З А В Д А Н Н Я НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гуменюку Олександр Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Дослідження впливу властивостей сталі 8Х4В9Ф2-Ш на експлуатаційні характеристики високо точних підшипників.*

керівник роботи: *Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.*

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, звання

Затверджено наказом університету від _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру *16.12.2023 р.*

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів.*

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

1) *Аналіз матеріалів та характеристик високоточних підшипників.*

2) *Методика експериментальних досліджень.*

3) *Аналіз результатів досліджень експлуатаційних характеристик підшипників зі сталі 8Х4В9Ф2-Ш.*

4) *Висновки.*

5) *Рекомендації.*

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 16 жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	<i>Аналіз матеріалів та характеристик високоточних підшипників.</i>	30.10.23	вик
2	<i>Методика експериментальних досліджень.</i>	15.11.23	вик
3	<i>Аналіз результатів досліджень експлуатаційних характеристик підшипників зі сталі 8Х4В9Ф2-Ш.</i>	23.11.23	вик
4	<i>Висновки, рекомендації</i>	4.12.23	вик
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	6.12.23	вик
6	<i>Допуск до захисту</i>	12.12.23	вик
7	<i>Захист дипломної роботи</i>	23.12.23	

Студент


Підпис

Гуменюк О. О.
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

Посонський С. Ф.
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАм-22-1 Гуменюк Олександр Олександрович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему *«Дослідження впливу властивостей сталі 8Х4В9Ф2-Ш на експлуатаційні характеристики високо точних підшипників.»* складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 23 найменувань, розміщених на 3 сторінках, та 2 додатків розміщених на 19 сторінках. Роботу викладено на 99 сторінках, з них 91 сторінок основного тексту, на яких розміщено 72 рисунки і 7 таблиць.

Низький коефіцієнт тертя, велика швидкість обертання, висока гранична точність і жорсткість, а також тепловиділення – це лише деякі критерії, яким повинні відповідати нові опори, що використовуються в сучасному обладнанні. Стандартний промисловий шариковий або роликовий підшипник рідко відповідає всім цим вимогам, тому для таких випадків світові виробники випускають високоточні, так звані, прецизійні підшипники.

У конструкціях сучасних літальних апаратів широко застосовуються підшипники кочення. Ці підшипники працюють при підвищених навантаженнях і температурах і частково в умовах корозійно-активного середовища. Надійність і працездатність як окремих вузлів, так і всієї конструкції в цілому значною мірою залежать від досконалості використовуваних підшипників і правильного обліку умов їх роботи.




Експлуатаційна стійкість сталевих підшипників визначається властивостями матеріалу і особливостями його виготовлення. Негативними факторами, що впливають на працездатність підшипника, можуть бути такі фактори, як високі залишкові напруження, підвищений вміст домішок і водню, неоднорідна макро - і мікроструктура сталі, тощо. Кожен із цих факторів, а також їхня спільна дія можуть призвести до руйнування виробу при експлуатації.

Мета роботи: дослідження впливу властивостей та особливостей структури сталі 8Х4В9Ф2-Ш на експлуатаційні характеристики деталей підшипників авіаційного призначення та пошук можливих технологічних рішень для їх підвищення.

Ключові слова: ВИСОКО ТОЧНИЙ ПІДШИПНИК, СТАЛЬ 8Х4В9Ф2-Ш, СТРУКТУРА, ТРИЩИННИ, КРИХКІСТЬ, РЕСУРС.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОТОЧНИХ ПІДШИПНИКІВ	8
1.1 Вимоги до матеріалів підшипників	8
1.2 Шарикопідшипникові сталі	9
1.3 Термічна обробка сталі 8X4B9Ф2-Ш	11
1.4 Вплив залишкових напружень на експлуатаційну стійкість	14
1.4.1 Вплив залишкових напружень на міцність при циклічному навантаженні	15
1.4.2 Вплив залишкових макро напружень на опір пружної і пластичної деформаціям та в'язкому руйнуванню	16
1.5 Вплив вмісту водню на експлуатаційну стійкість	18
1.5.1 Джерела насичення воднем	18
1.5.2 Вплив загального водню та дифузійно-рухомого водню на експлуатаційну стійкість	19
1.6 Перспектива застосування металокерамічних матеріалів та інших матеріалів виготовлення деталей підшипників в авіабудуванні	25
1.6.1 Порівняльні характеристики матеріалів M50 та 8X4B9Ф2-Ш	25
1.6.2 Керамічні матеріали для підшипників кочення	27
1.6.3 Нержавіючі сталі з високим вмістом азоту для підшипників кочення	31
1.7 Аналіз причин ушкоджень підшипників кочення	35
Висновок по першому розділу	43
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	44
2.1 Об'єкт досліджень	44

МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Гуменюк		Дослідження впливу властивостей сталі 8X4B9Ф2-Ш на експлуатаційні характеристики високо точних підшипників
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		Літера
Затвер.		Диха		Аркуш
ХНУ МТВАм-22-1				

2.2	Методика та обладнання для проведення досліджень	45
	Висновок по другому розділу	56
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ		
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІДШИПНИКІВ ЗІ СТАЛІ		
	8Х4В9Ф2-Ш	57
3.1	Дослідження впливу залишкових напружень на експлуатаційну стійкість	57
3.2	Дослідження вмісту водню у підшипниках	60
3.3	Дослідження впливу дифузійно-рухомого водню (д.р.в.) на властивості сталі	61
3.3	Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника	64
3.3.1	Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 1 (вміст Н ₂ - 7,3 ppm)	64
3.3.2	Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 3 (вміст Н ₂ – 6,1 ppm)	66
3.3.3	Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 2 (вміст Н ₂ - 3,4 ppm) (шліф виконаний у поперечному напрямку)	68
3.3.4	Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 2 (вміст Н ₂ - 3,4 ppm) (шліф виконаний у поздовжньому напрямку)	71
3.4	Фрактографічні дослідження	72
3.4.1	Фрактографічні дослідження підшипника №3	72
3.4.2	Фрактографічні дослідження підшипника №2	77
3.4.3	Фрактографічні дослідження підшипника № 7	81
	Висновки по третьому розділу.	91
	ВИСНОВКИ	93
	РЕКОМЕНДАЦІЇ	95
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	96
	ДОДАТКИ	99

						МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Зна.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			5

2.2	Методика та обладнання для проведення досліджень	45
	Висновок по другому розділу	56
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ		
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІДШИПНИКІВ ЗІ СТАЛІ		
	8Х4В9Ф2-Ш	57
3.1	Дослідження впливу залишкових напружень на експлуатаційну стійкість	57
3.2	Дослідження вмісту водню у підшипниках	60
3.3	Дослідження впливу дифузійно-рухомого водню (д.р.в.) на властивості сталі	61
3.3	Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника	64
3.3.1	Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 1 (вміст Н ₂ -7,3 ppm)	64
3.3.2	Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 3 (вміст Н ₂ – 6,1 ppm)	66
3.3.3	Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 2 (вміст Н ₂ - 3,4 ppm) (шліф виконаний у поперечному напрямку)	68
3.3.4	Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 2 (вміст Н ₂ - 3,4 ppm) (шліф виконаний у поздовжньому напрямку)	71
3.4	Фрактографічні дослідження	72
3.4.1	Фрактографічні дослідження підшипника №3	72
3.4.2	Фрактографічні дослідження підшипника №2	77
3.4.3	Фрактографічні дослідження підшипника № 7	81
	Висновки по третьому розділу.	91
	ВИСНОВКИ	93
	РЕКОМЕНДАЦІЇ	95
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	96
	ДОДАТКИ	99

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Механічні системи з кожним роком висувають до підшипників кочення і ковзання більш високі вимоги. Низький коефіцієнт тертя, велика швидкість обертання, висока гранична точність і жорсткість, а також тепловиділення – це лише деякі критерії, яким повинні відповідати нові опори, що використовуються в сучасному обладнанні. Стандартний промисловий шариковий або роликовий підшипник рідко відповідає всім цим вимогам, тому для таких випадків світові виробники випускають високоточні, так звані, прецизійні підшипники. Ці деталі широко використовуються в газотурбінних двигунах, вакуумних насосах, гоночних автомобілях, у поліграфічних машинах, деревообробних та металорізальних верстатах, де на підшипник спирається шпиндельний вузол, та безлічі інших механізмів, котрі працюють з високою точністю і швидкістю. Одними з найбільших споживачів цих опор є аерокосмічна галузь та військово-промисловий комплекс.

У конструкціях сучасних літальних апаратів широко застосовуються підшипники кочення. Особливого значення вони мають при встановленні валів високого та низького тиску газотурбінного двигуна (ВМД). Підшипники кочення сприймають і радіальні, і осьові навантаження, що додаються до валу, і передають їх на корпус машини.

Ці підшипники працюють при підвищених навантаженнях і температурах і частково в умовах корозійно-активного середовища. Надійність і працездатність як окремих вузлів, так і всієї конструкції в цілому значною мірою залежать від досконалості використовуваних підшипників і правильного обліку умов їх роботи [1-3].

Експлуатаційна стійкість сталевих підшипників визначається властивостями матеріалу і особливостями його виготовлення. Негативними

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

факторами, що впливають на працездатність підшипника, можуть бути такі фактори, як високі залишкові напруження, підвищений вміст домішок і водню, неоднорідна макро - і мікроструктура сталі та ін [4]. Кожен із цих факторів, а також їхня спільна дія можуть призвести до руйнування виробу при експлуатації [5-8].

Підшипник, як правило, не допрацьовує до настання природної втоми металу, так як викришування підшипників з'являється раніше (внаслідок дефектів, що є в металі, і відступів у технології виготовлення), ніж підшипник вийшов би з ладу на підставі суто теоретичних передумов.

Мета роботи: дослідження впливу властивостей та особливостей структури сталі 8Х4В9Ф2-Ш на експлуатаційні характеристики деталей підшипників авіаційного призначення та пошук можливих технологічних рішень для їх підвищення.

Завдання роботи:

1. Аналіз причин ушкоджень підшипників кочення.
2. Дослідження впливу залишкових напружень на експлуатаційну стійкість.
3. Дослідження впливу вмісту водню на експлуатаційну стійкість.
4. Фрактографічні дослідження розкритих тріщин.
5. Дослідження мікроструктури підшипників кочення.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОТОЧНИХ ПІДШИПНИКІВ

1.1 Вимоги до матеріалів підшипників

Велика тривалість роботи підшипників і тривалі терміни зберігання їх на складах пред'являють дуже високі вимоги до розмірної стабільності підшипникової сталі. Структура загартованої та низьковідпущеної високовуглецевої підшипникової сталі містить нестабільні складові, що зазнають перетворення при температурах експлуатації та зберігання. Неминучим результатом цих перетворень є зміна питомого обсягу сталей та, як наслідок, зміна розмірів деталей [1-2].

У деталях підшипників, що працюють при підвищених температурах, поряд з об'ємними змінами можуть відбуватися пластичні деформації, спричинені спільною дією напружень та структурних змін і є додатковим джерелом зміни розмірів сталей. Несприятливим наслідком розмірних змін є:

- зменшення зазорів, що викликає "заклинювання" підшипників під час експлуатації;
- ослаблення посадкового натягу кілець, внаслідок чого може відбуватися їхнє провертання на валу;
- зміни діаметрів тіл кочення, що призводять до перевантаження окремих кульок та роликів;
- порушення точності обертання валів через неоднакову зміну розмірів опорних підшипників та ін.

До підшипника пред'являються певні вимоги забезпечення безперебійної роботи машини протягом встановленого терміну її служби. Залежно від умов роботи так, наприклад, довговічність підшипників для

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

авіадвигунів характеризується кількістю годинників, які повинні опрацювати підшипник для забезпечення заданого ресурсу двигуна [9].

Підшипники кочення повинні мати певний запас працездатності, який залежить від умов експлуатації, так і від матеріалу деталей підшипника кочення.

Важливою характеристикою працездатності підшипника кочення є статична та динамічна вантажопідйомність. Статична вантажопідйомність - це граничне навантаження, коли залишкові деформації в зоні контакту мають задане значення (як правило, близько 0,01 % від діаметра кульки або ролика). Динамічна вантажопідйомність визначається навантаженням, яке після заданого числа оборотів підшипника не викликає його виходу з ладу по руйнуванню втоми в області дії контактних напружень. І статична, і динамічна вантажопідйомності вимагають обробки деталей високу твердість.

Невідповідність вимогам може призвести до зниження експлуатаційної стійкості. Під експлуатаційною стійкістю розуміється здатність підшипника зберігати свої властивості у процесі експлуатації протягом певного терміну.

1.2 Шарикопідшипникові сталі

Насамперед, сталь для виготовлення підшипників кочення повинна мати високу твердість, для цього застосовують високовуглецеві сталі або низьковуглецеві сталі в цементованому стані [10]. Розглянемо класифікацію високовуглецевих сталей для виготовлення підшипників: - хромиста, хромиста з добавкою молібдену, хромо-марганцево-кремниста, хромомарганцева з добавкою молібдену сталі (для підшипників, що працюють у звичайних умовах) (ШХ15, ШХ2С); - корозійностійка, теплостійка сталі (для підшипників, що працюють в агресивних середовищах і при підвищених температурах) (95Х18-Ш, 11Х18М-ШД, ЕІ760, ЕІ347

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

(8X4B9Ф2), 8X4M4BФ1-Ш, 8DCV6C8, MDCV6C8.) [9-10]. Також широке застосування отримали низьковуглецеві цементовані сталі і меншою мірою - сплави з особливими фізичними властивостями. Для виготовлення підшипникових кілець невеликих перерізів і тіл кочення, як правило, використовують високовуглецеву хромисту сталь ШХ15 (0,95-1,05% С та 1,3-1,65% Cr), для підшипникових кілець великих перерізів - хромо-марганцево- кремнієву сталь ШХ15СГ (0,95-1,05 % С, 0,9-1,2 % Cr, 0,4-0,65 % Si та 1,3-1,65 % Mn), яка прожарюється на велику глибину. При загартуванні сталі ШХ15 часто фіксується підвищений вміст залишкового аустеніту ($\approx 10-15\%$), який за експлуатації може перетворитися на мартенсит і викликати небажане зміна обсягу. Сталь 95X18 має високу корозійну стійкість у різних органічних середовищах, в морській та прісній воді, в розчинах азотної та оцтової кислот, проте має погану стійкість у суміші азотної та сірчаної кислот.

Цементовані сталі 20X2H4A та 18ХГТ застосовують для виготовлення деталей підшипників кочення, які працюють при високих навантаженнях. Швидкорізальні сталі (наприклад, P9) або сталі E1347 застосовують для підшипників, що піддаються в процесі експлуатації значним нагріванням (до 400-500 ° C). Дана робота виконана стосовно деталей підшипників кочення з матеріалу 8X4B9Ф2-Ш II опори турбованого двигуна ВК-2500 і ТВ3-117. Розташування підшипника показано рисунку 1.1.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

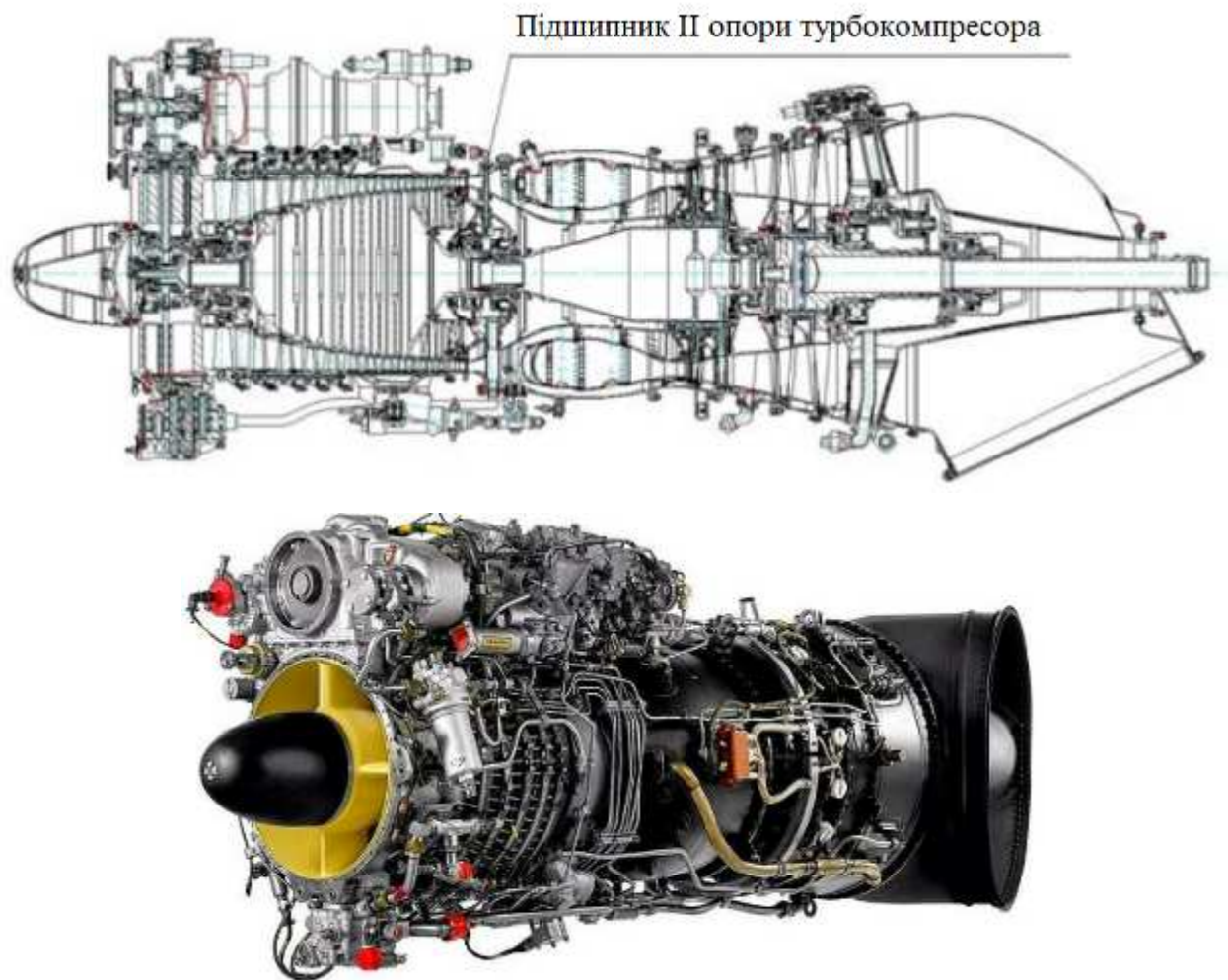


Рисунок 1.1 – Загальна схема і зовнішній вигляд двигуна ВК-2500

1.3 Термічна обробка сталі 8Х4В9Ф2-Ш

Сталь 8Х4В9Ф2-Ш застосовується виготовлення прецизійних підшипників кочення, які у агресивних середовищах. Хімічний склад сталі 8Х4В9Ф2-Ш представлено таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад сталі 8Х4В9Ф2-Ш у %

C	Cr	Fe	Mn	Mo	Ni	P	S	Si	V	W
0,7-0,8	4-4,6	зал.	≤0,40	≤0,30	≤0,35	≤0,03	≤0,03	≤0,40	1,4-1,7	8,5-9,5

Ця марка сталі відноситься до типу теплостійких підшипникових сталей. Теплостійкість створюється в результаті впливу двох причин:

- 1) спеціальним легуванням;
- 2) загартуванням з дуже високих температур 1200-1300 °С.

Для досягнення високої твердості та необхідної теплостійкості температура нагрівання та витримка при нагріванні повинні забезпечити достатнє насичення твердого розчину вуглецем та легуючими елементами. Однак межею, що обмежує температуру та витримку, є збереження дрібного зерна. Температура остаточного нагріву становить до (1280-1300) °С (для повного розчинення карбідів); відносно низький інтервал температур гарту, що становить порядку (15-20) °С; важливість попередження вигорання вуглецю та окислення при нагріванні.

При загартуванні як середовище охолодження слід використовувати мастило. При повільному охолодженні з високих температур (наприклад, на повітрі) можуть виділятися карбіди, що знижують ріжучі властивості.

Щоб зменшити загартовану деформацію, застосовують ступінчасте охолодження, що дає найкращі результати.

Існує два способи перетворення залишкового аустеніту на мартенсит - обробка холодом і відпуск. У першому способі мартенситна реакція продовжується навіть після охолодження до (-70 ÷ -80) °С (вміст залишкового аустеніту ≈10 %). Допускається глибше охолодження до температури рідкого азоту (-196 °С), проте це не призводить до зменшення кількості залишкового аустеніту. Крім перетворення аустеніту на мартенсит, при прямому зануренні в рідкий азот виникають додаткові ефекти - виділення з мартенситу карбідів, мікропластична деформація та ін. (Залишкового аустеніту зберігається ще ≈10 %). Для зменшення напружень та відпуски мартенситу після обробки холодом дається відпустка при температурі 560 °С (рисунок 1.2).

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Другий спосіб перетворення залишкового аустеніту на мартенсит полягає в нагріванні загартованої сталі до температури 560 °С, причому з аустеніту виділяються карбіди типу M_2C . Для розкладання залишкового аустеніту відпуск має бути багаторазовим (рисунок 1.3) [10].

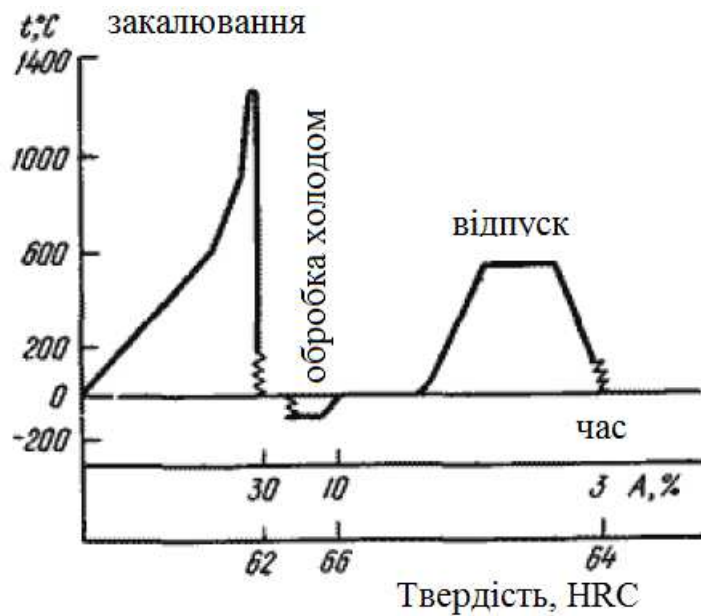


Рисунок 1.2 – Режим термічної обробки з обробкою холодом

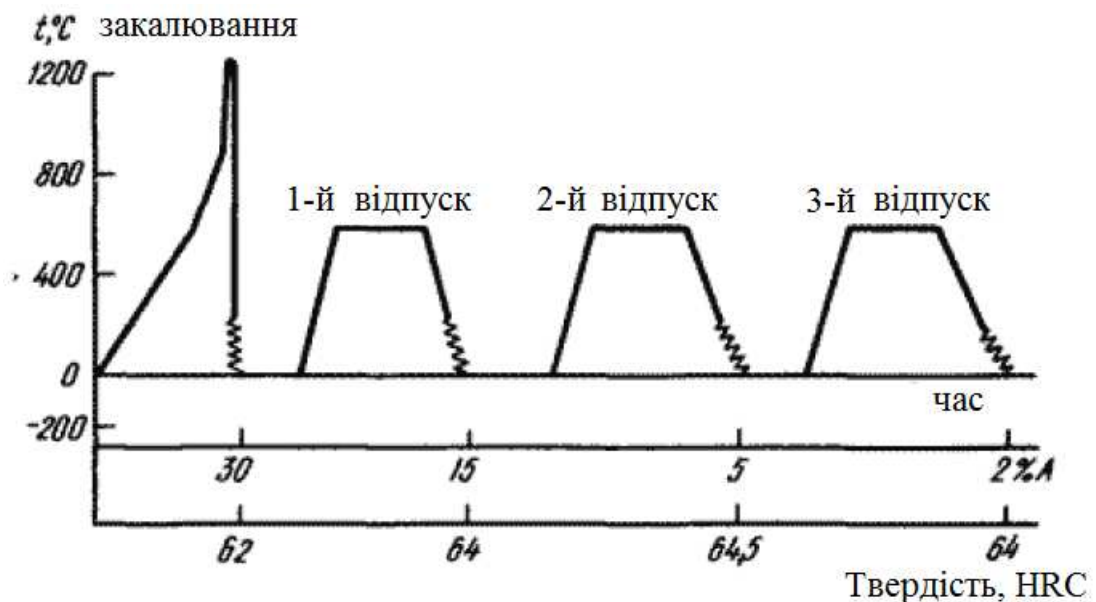


Рисунок 1.3 - Режим термічної обробки сталі 8Х4В9Ф2-Ш («багаторазовий відпуск»)

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Структура сталі 8Х4В9Ф2-Ш після відпалу є перліт і карбіди, а після загартування - мартенсит і надлишкові карбіди. Залежно від складу і термічної обробки як супутня фаза в загартованій і відпущеній сталі присутній також залишковий аустеніт.

На властивості сталі в реальних інструментах сильно впливають, крім того, сильні внутрішні напруження і стан поверхневого шару, структура якого може відрізнятися від одержуваної в шарах нижче.

Мартенсит - головна структурна складова, що забезпечує поряд з карбідами їх високі зносостійкість, опір пластичної деформації та твердість.

Залишковий аустеніт є небажаною структурною складовою. Він знижує твердість, зменшує теплопровідність.

Карбіди можна розділити на два види:

1) первинні карбіди, найбільші, що виділилися в результаті евтектичного перетворення ($L \rightarrow A + KI$) і роздроблені на окремі частинки куванням;

2) вторинні карбіди, що виділилися з аустеніту після закінчення кристалізації.

Первинні карбіди утворюються в процесі лиття і являють собою великі білі включення, вторинні карбіди утворюються в результаті термічної обробки і білі включення більш дрібних розмірів.

1.4 Вплив залишкових напружень на експлуатаційну стійкість

У фізиці твердого тіла напружень у металі чи сплаві розглядаються як наслідок спотворення кристалічних ґрат.

Технологічні чинники такі як методи та режими обробки, стан інструменту, склад змащувально-охолоджуючих рідин (ЗОР) та ін, мають значний вплив на величину і знак залишкових напружень. ЗОР і способи їх підведення в зону різання мають великий вплив на величину і знак макро

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

напружень, що виникають в поверхневих шарах деталей, оброблених різанням.

Застосування ЗОР вносить зміни до фізико-хімічних процесів, що протікають у зоні контакту ріжучого інструменту з оброблюваною поверхнею, що зумовлюють напружений стан поверхні. Очевидно, що ті самі середовища в залежності від методу та умов обробки мають різний вплив на величину і знак залишкових напружень. Застосування ЗОР сприяє зміні залишкових напружень як і позитивну, і у негативну боку проти обробкою без них. Вплив ЗОР на технологічні макро напруження більшою мірою залежить від кількості тепла, що виділяється в зоні різання, яке, у свою чергу, визначає розвиток процесів втрати міцності в поверхневому шарі і впливає на його напруженість.

1.4.1 Вплив залишкових напружень на міцність при циклічному навантаженні

Деякі дослідники вважають, що залишкові напруження не надають помітного впливу на міцність деталей, інші стверджують, що залишкові напруження можуть суттєво впливати на міцнісні та інші експлуатаційні характеристики, оскільки у ряді випадків вони є причиною виникнення технологічних дефектів і руйнування [11].

Дослідники встановили, що вплив залишкових напружень на характеристики міцності металів та їх сплавів при статичному, динамічному та циклічному навантаженні залежно від напруженого стану та умов роботи підшипників кочення може бути як значним, так і незначним [11]. Для того, щоб зрозуміти, як залишкові напруження впливають на характеристики міцності металів при навантаженні, потрібно розділяти вплив залишкових напружень як на опір пружної і пластичної деформації, так і на опір руйнуванню.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.4.2 Вплив залишкових макро напружень на опір пружної і пластичної деформаціям та в'язкому руйнуванню

Напруження, викликані робочим навантаженням, і залишкові напруження надають механічний вплив на метал. Принцип пружного накладання (алгебраїчна суперпозиція) складових будь-яких напружень у цій точці незалежно від джерела напруження працює у випадку, якщо матеріал у будь-якій точці деталі є пружним. При фактичних напруженнях нижче межі плинності, деформації, викликані дією зовнішнього навантаження, не залежить від наявності залишкових напружень. Якщо результуючий напружений стан у точці відповідає пластичному стану матеріалу, то величину залишкових напружень не можна складати алгебраїчно з напруженнями від зовнішнього навантаження. Залишкові напруження змінюються кількісно в умовах пластичного перебігу і відбувається їх перерозподіл: а саме, зменшується величина залишкових напружень, зберігаючи їх початковий знак, або змінюється їх знак на протилежний, або вони перетворюються на нуль. А. Коттрелл та ін. стверджують, що для зняття залишкових напружень досить незначної пластичної деформації (до 0,2 %) [11].

В умовах експлуатації такі фактори, як старіння, дія низьких температур тощо знижують пластичність деяких матеріалів. Якщо пластичні деформації підшипників кочення обмежені (в умовах підвищеної крихкості, тривимірного поля напружень, за відсутності пластичності), залишкові напруження накладаються на будь-які інші напруження, які існують у матеріалі, і незалежно від джерела їх виникнення їхня дія не відрізняється від дій інших напружень.

У такому випадку залишкові напруження руйнують метал так само, як будь-які напруження, що виникають у відповідних матеріалах.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Експериментально встановлено, що циклічне навантаження прискорює можливі процеси релаксації напружень у металах та сплавах. Циклічне навантаження може викликати повну релаксацію залишкових макро напружень при температурах, при яких ступінь повернення, що термічно активується, незначна.

Якщо значення результуючого напруження від накладання залишкових і циклічних напружень наближається до межі плинності, то при циклічному навантаженні залишкові напруження будуть зняті і не вплинуть на втомну міцність. Навпаки, якщо результуюча напружень значно нижча межі плинності, то залишкові напруження зберуться і впливатимуть на втомну міцність.

При дії знакозмінних навантажень основне значення набуває характеру перерозподілу залишкових напружень, як в обсязі, так і по глибині поверхневого шару деталі. Причому величина та знак напружень на поверхні грає визначальну роль. При циклічному навантаженні, що розтягує, можливе ослаблення поверхневого шару матеріалу деталі, тому число циклів навантажень залежить перш за все від величини стискаючих залишкових напружень на поверхні зразка. Чим міцніший матеріал, а отже, твердіший і менш пластичний, тим повільніше накопичуватиметься пластична деформація в процесі втоми, а, отже, і повільніше відбуватиметься зняття залишкових напружень.

Зі збільшенням частоти навантаження час зняття залишкових напружень зменшується. Деякі дослідники дотримуються думки, що залишкові напруження багато в чому впливають на втомну міцність. Вважаючи, що з циклічному навантаженні значної макро пластичної течії немає, і оскільки залишкові напруження можуть перерозподілятися чи поступово зменшуватися, вони діятимуть протягом всього терміну служби деталі. Визначальним фактором у даному випадку вважають знак залишкових напружень у поверхні. Стискаючі залишкові напруження

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводять до підвищення втомної міцності, розтягуючі напруження - знижують втомну міцність. Це може бути пов'язано з ослабленням поверхневої зони матеріалу при циклічному розтягуванні і відносно повільним перерозподілом залишкових напружень.

1.5 Вплив вмісту водню на експлуатаційну стійкість

Одним із факторів, що може призвести до утворення тріщин, є підвищений вміст водню.

У технічній літературі [10, 12] описано шкідливий вплив водню для сталі - підвищений вміст водню веде до крихкості матеріалу. Захищена дія водню пов'язана з дифузією його до вогнищ майбутнього руйнування або до фронту тріщини, що росте, в зонах розтягуючих напружень. У зв'язку з цим для багатьох сталей введено обмеження вмісту водню. Так, наприклад, для конструкційних сталей, які застосовуються для виготовлення підшипників ковзання, вміст водню не повинен перевищувати 1,7 ppm (ДСТУ 3012-95: ISO 4383:2015 «Підшипники кочення та ковзання»). ppm - це мільйонна частка, є одиницею вимірювання концентрації та інших відносних величин, аналогічна за змістом відсотку або проміле, та являє собою одну мільйонну частку. Має позначення скороченням ppm від англійського Parts per million, читається як «пі-пі-ем», «тобто частин на мільйон».

1.5.1 Джерела насичення воднем

1. Насичення воднем при металургійних процесах. У процесі виплавки сталі водень може потрапляти в метал із пічної атмосфери, шихтових матеріалів та різних добавок, що вводяться у ванну. У складі сталевого брухту та чавуну міститься значна кількість водню, але в готовій рідкій сталі

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

його вміст визначатиметься технологічними особливостями плавки та майже не залежатиме від вмісту водню в металевій шихті.

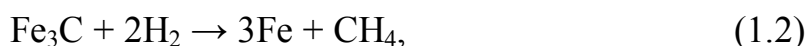
2. Насичення воднем сталі у водневмісних середовищах, при високих температурах і тисках. При тривалому знаходженні металу при підвищених температурах у водневмісному середовищі водень проникає в сталь і призводить до зниження її пластичності та тривалої міцності та часто до крихкого руйнування. При високих тисках і температурах процес надорожчання сталі можна поділити на три етапи:

- 1) поглинена сегрегація водню;
- 2) зневуглецювання;
- 3) розтріскування та набухання сталі.

У порівнянні з поглинанням водню чистим залізом механізм поглинання водню сталлю ускладнюється наявністю вуглецю в сталі, який взаємодіє з воднем за досить високої температури. Адсорбуючись поверхнею сталі, дисоційований водень середовища іонізується і проникає в нагріту вуглецеву сталь у вигляді протонів, причому він дифундує вглиб її в основному через кристалічну решітку фериту (аналогічно абсорбції водню чистим залізом), і сегрегується в колекторах, розташованих в основному. При підвищених температурах дифузія водню через кристали цементиту неминуче веде до реакції гідрування цементиту:



Так, перший етап насичення воднем (адсорбція) одразу переходить на другий етап (зневуглецювання). Молекулярний водень, що сегрегувався в мікропустотах, також може брати участь у реакції гідрування, причому з дещо більшою витратою енергії:



					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

3. Насичення воднем при термічній обробці. Даному типу насичення воднем сприяють присутність вологи (діє як каталізатор), відновлювальна атмосфера, наявність атомарного водню, що виникає при загартуванні у воду, швидке охолодження, що перешкоджає десорбції водню, що вже проник у сталь [13,14].

1.5.2 Вплив загального водню та дифузійно-рухомого водню на експлуатаційну стійкість

Водень є сильним чинником на характеристики надійності високоміцних сталей [15]. Проблема водневої крихкості щодо високоміцних корозійностійких сталей має два аспекти:

- працездатність у середовищі зовнішнього водню при різних температурних та силових впливах;
- працездатність за наявності сталі внутрішнього водню, розчиненого в металі при різних технологічних процесах (зварювання, виплавка, нанесення гальванічних покриттів та ін.).

Певна концентрація в усьому об'ємі металу або в локальних ділянках сприяє впливу крихкості.

Вплив водню визначається розподілом водню в металі, дифузійної рухливістю, способом доставки в зону перед руйнування та рядом інших параметрів.

Водень, що у металі, розподілений нерівномірно. По-перше, водень у сталях може перебувати як у молекулярному, газоподібному стані всередині досить протяжних дефектів (пори, тріщини, несплошності на межах розділу фаз), так і в атомарному (або іонізованому) стані в міжвузлях та на дефектах кристалічних ґрат. Крім того, деяка частина водню адсорбована на внутрішніх поверхнях макро порожнин та зовнішньої поверхні металу. По-друге, водень має неоднакову розчинність у різних фазових складових сталі

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

таких, як ферит, аустеніт, карбіди і т.д. По-третє, водень має неоднакову енергію зв'язку з різними типами дефектів кристалічної решітки (вакансії, дислокації, межі зерен і т.д.) і тому нерівномірно розподілений в межах однієї фазової складової. І, по-четверте, характер та розподіл мікро - та макро напруження в металі значною мірою змінює картину розподілу водню.

Граткова розчинність водню в залозі та його сплавах при нормальних температурах дуже мала і підвищується при нагріванні та зростанні зовнішнього тиску.

При аналізі поведінки водню в металі важливим є питання про те, в якому вигляді він розчинений і дифундує кристалічні грати.

Розчинений у металі атом водню, на думку більшості дослідників, іонізовано. В даний час найменш суперечливим і найбільш плідним є припущення про знаходження водню в твердих тілах у вигляді позитивних, частково екранованих електронами іонів водню.

Між різними станами водню, зокрема між газоподібним воднем у внутрішніх макро дефектах і воднем, розчиненим у гратах, встановлюється динамічна рівновага.

Існує зв'язок концентрації решіткового водню з концентрацією та тиском газоподібного водню. Тиск водню в порах залежно від температури, об'єму пір і концентрації решіткового водню може досягати 10^3 - 10^4 МПа, а рівень виникаючих при цьому локальних напружень може істотно перевищувати межу плинності, причому в ряді випадків і опір відриву. Концентрація водню та його тиск у порах підвищуються при зниженні температури, а при температурах понад 250 - 400 °С практично весь водень розчинений у решітці металу.

Високий внутрішній тиск може виникати при катодному насиченню воднем, так і при насиченні в середовищі газоподібного водню навіть невисокого тиску. Рівноважний тиск у порах, що мають велику позитивну кривизну поверхні, може бути на кілька порядків вище, ніж поблизу плоскої

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поверхні, що контактує з газоподібним середовищем. Високий внутрішній тиск у порах призводить до локальної пластичної деформації прилеглих областей матриці. Поблизу доби зростає щільність дислокацій, створюється значна кількість «свіжих» незакріплених дислокацій, про що свідчать дослідження внутрішнього тертя [16].

У сталях мартенситного класу розчинність водню в області температур утворення атмосфери є дуже високою і відповідає розчинності сильно наклепаного металу.

У технічній літературі при розгляді питання про вплив водню на рівень механічних властивостей прийнято уявлення про дифузійно-рухливий водень (д.р.в.) та дифузійно-нерухомий, залишковий водень. Цей поділ заснований на тому факті, що при нагріванні металу у вакуумі приблизно до 500 °С виділяється лише частина водню - д.р.в. При нагріваннях понад 800 °С (до розплавлення металу) відбувається додатково велике виділення залишкового водню.

У зв'язку з цим виникають питання, по-перше, про місцезнаходження водню, що виділяється за середніх і високих температур, і по-друге, про можливість зміни співвідношення між д.р.в. і залишковим воднем при різних технологічних операціях, таких як нагрівання, пластична деформація і т.д.

Поняття "дифузійно-рухливий водень" є умовним і включає як водень, здатний до дифузії при досить низьких температурах (решітковий водень і водень в дислокаційних атмосферах), так і газоподібний водень, між якими існує динамічна рівновага $H_2 \leftrightarrow 2H$, що забезпечує приплив водню в зону перед руйнування за різних проявів водневої крихкості.

Пластична деформація призводить до дроблення (руйнування) пасток для залишкового водню (сульфіди, карбіди) та сприяє його переходу в дифузійно-рухливий стан. Встановлення нової рівноваги потребує деякого часу, і більший ступінь переходу залишкового водню у д.р.в. забезпечує вилежування пластично деформованого металу.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведені результати досліджень, поряд із раніше отриманими даними щодо розподілу водню в інших сталях [16], показують, що локалізація водню в мартенситі є достатньо загальною закономірністю. Ця закономірність обумовлена високою концентрацією дислокацій у мартенситній матриці та більшою енергією взаємодії водню з цими дефектами кристалічної будови. У зв'язку з цим за нормальної температури ефективна розчинність водню в мартенситі виявляється значно вище, ніж у аустеніті, концентрація дислокацій у якому кілька порядків нижче.

Таким чином, для процесу водневої крихкості важливе значення має не тільки вихідний розподіл водню в металі, але і можливість дифузійних процесів, що доставляють водень у зону перед руйнування.

При нижчих температурах (нижче 200-400 °С) взаємодія водню з пастками різного типу призводить до різкого зниження коефіцієнта дифузії до підвищення енергії активації.

При аналізі взаємодії водню з дислокаціями слід відзначити можливість транспортування водню дислокаціями у процесі деформації металу [16-17], особливо у пластичній ділянці.

Розчинність водню зростає зі зростанням напружень, що розтягують, і падає при дії стискаючих.

З усього вищесказаного випливає, що водень має високу рухливість у металі. Його дифузійна рухливість досить велика навіть за нормальних температур. Крім того, водень в металі розподілений дуже нерівномірно і під дією різних факторів (градієнти концентрації і температур, різниця в розчинності водню в різних фазах і дефектах кристалічної будови грати, пластична та пружна деформація та ін.) може переміщатися в певні зони металу, створюючи в них підвищену - порівняно із середньою - концентрацію, і при деякому критичному вмісті водню та дії зовнішніх або внутрішніх напружень у локальних ділянках металу може статися розрив міжатомних зв'язків та розпочатися процес передчасного руйнування.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як показали фрактографічні дані, отримані І.П. Жегіною, на початкових стадіях водневої крихкості проявляється на поверхні зламу у вигляді переходу від великих ямок в'язкого руйнування до дрібних плоских ямок і фасеток сколу (квазісколу). Подальше збільшення інтенсивності водневого впливу призводить до переважно крихких фасеток сколу (квазісколу) з в'язкими дрібноімйними перемичками. Більш інтенсивна воднева крихкість сприяє зернограничному руйнуванню у поєднанні з тендітним сколом по тілу зерна [11].

Другий аспект водневої крихкості високоміцних корозійностійких сталей (крім працездатності у водневому середовищі) полягає у чутливості механічних властивостей цих сталей до водню, який розчинений у них за різних технологічних процесів.

Головним джерелом водню при виплавці або переплаві металу є волога, яка потрапляє в розплавлений метал з шихтою, шлаком або потоком повітря. Вода розкладається за високих температур з виділенням водню, який розчиняється у рідкій ванні металу.

Водень, розчинений у металі при виплавці, при наступних різних операціях нагріву (гаряча деформація, термообробка) може виділятися з металу, і оскільки дегазація відбувається з поверхні заготовлі, в центральній частині великих поковок і штампувань вміст д.п.в. може у кілька разів перевищувати його вміст у периферійних зонах. Чутливість до водневої крихкості значною мірою залежить від режиму термічної обробки. Максимальна схильність до водневої крихкості спостерігається на загартованому та низьковідпущеному мартенситі. Висока чутливість до водневої крихкості свіжозгартованого і низьковідпущеного мартенситу, мабуть, пов'язана з тим, що при цьому значна кількість водню знаходиться в низькоенергетичних пастках, утворюючи зокрема дислокаційні хмари Котрелла (тобто механізм пластичності залежить від кількості домішкових атомів, зокрема, водню).

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З підвищенням температури відпустки можливий перерозподіл водню, який може заповнювати більш глибокі пастки, концентруючись, наприклад, на межах сульфідних або карбідних фаз або розчиняючись у них. Вихід водню з цих пасток при навантаженні зразка під час випробувань дуже утруднений, на відміну загартованого стану металу, у якому водень заповнює, переважно, дрібні пастки і досить рухливим. При температурах нагрівання вище точки A_{c1} аустеніт, що утворюється, може при охолодженні або перейти в мартенсит, або зберегтися в структурі, не зазнавши мартенситного перетворення. В обох випадках схильність до водневої крихкості зростає. Якщо при охолодженні пройшло мартенситне перетворення, то нові порції мартенситу знаходяться у загартованому стані і забезпечують підвищення чутливості до дії д.р.в. Роль залишкового аустеніту менш однозначна.

Отже, існують певні фактори, що впливають на процес руйнування при підвищенні температури випробувань зразків з тріщиною втоми. До них відносяться збільшення швидкості дифузії, що призводить до зростання швидкості підведення водню в зону руйнування, підвищення швидкості дегазації вершини тріщини, що викликає зниження в ній концентрації д.р.в.

1.6 Перспектива застосування металокерамічних матеріалів та інших матеріалів виготовлення деталей підшипників в авіабудуванні

1.6.1 Порівняльні характеристики матеріалів M50 та 8X4B9Ф2-Ш

Дослідження компанії SCHAEFFLER GROUP було проведено порівняльні випробування матеріалів M50 та 8X4B9Ф2-Ш з метою порівняння працездатності підшипників.

Хімічний склад обох типів матеріалів наведено у таблиці 1.2.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Хімічний склад 8Х4В9Ф2-Ш та М50

Сталь	вміст елементів, % (по масі)											
	С	Mn	Cr	Si	P	S	Ni	Cu	Mo	W	V	Co
				не більше								
М50	0,80–0,85	0,15–0,35	4,00–4,25	0,25	0,015	0,008	0,1	0,01	4,0–4,5	≤0,25	0,9–1,1	≤0,25
8Х4В9Ф2-Ш	0,70–0,80	≤0,40	4,0–4,6	0,40	0,03	0,03	0,35	0	≤0,30	8,5–9,5	1,4–1,7	0

Після термообробки кілець на одному примірнику проводилася оцінка твердості та мікроструктури (рисунок 1.4). Твердість сталі 8Х4В9Ф2-Ш і М50 становила відповідно 63,0 - 63,5 НRC та 62,0 - 63,7 НRC.

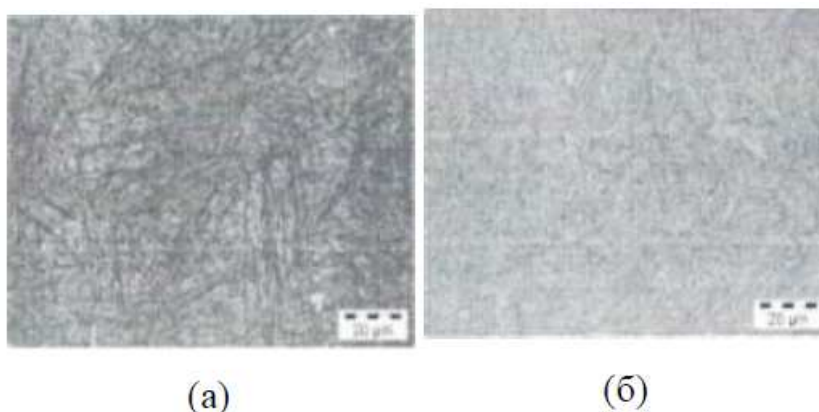


Рисунок 1.4 – Мікроструктура сталі:
(а) 8Х4В9Ф2-Ш; (б) М50

Наявність вольфраму в сталі 8Х4В9Ф2-Ш пояснює високу карбідну неоднорідність. Він утворює великі скупчення нерозчинних карбідів при нагріваннях (до температур плавлення). Дані карбіди є осередками викришування робочої поверхні підшипників кочення в процесі експлуатації. До того ж, великі сегрегації нерозчинних карбідів при виробництві напівфабрикатів із сталі 8Х4В9Ф2-Ш суттєво ускладнюють процес кування та виключають прокатку.

У ході проведення випробувань підшипники виходили з ладу через пошкодження куль та зовнішніх кілець. Час випробування підшипника з матеріалу 8Х4В9Ф2-Ш становило 67 год., з матеріалу М50 - 351 год.

За результатами дослідження [12] сталь марки М50 показувала себе як матеріал із високою довговічністю. Цей факт пояснюється однорідністю структури та відсутністю великих карбідних включень, які б негативно вплинули на контактну витривалість.

За результатами порівняння зі сталлю 8Х4В9Ф2-Ш сталь М50 демонструє кращу працездатність [12].

1.6.2 Керамічні матеріали для підшипників кочення

Останнім часом з'являються нові керамічні матеріали, які можуть бути використані виготовлення підшипників кочення [18].

Раніше було неможливо застосовувати підшипники кочення в конструкції опор роторів ВМД через напружені умови їх роботи в такій конструкції. Однак ситуація змінилася з появою композиційних керамічних матеріалів на основі карбіду кремнію, карбонітриду титану та ін, які мають низький коефіцієнт тертя.

До складу металокерамічних матеріалів входять металевий порошок з додаванням присадок, наприклад, нітридів, карбідів, металів та неметалів у різних співвідношеннях. Їх отримують спіканням при температурах близько (1000...2000) °С при тисках від вакууму до 7000 кгс/см² і більше. У їхньому складі відсутній дорогий вольфрам. На рівні мікроструктури керамічні матеріали можуть мати високу пористість (від 15 до 35 %). Механічні властивості одержуваних матеріалів та виготовлених їх деталей погіршуються зі збільшенням пористості. Отже, для забезпечення необхідних якостей керамічних матеріалів необхідно аналізувати вибір розмірів частинок структури елементів входять до складу присадок та їх пропорцій.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Слід зазначити, що особливу міцність і низький коефіцієнт тертя мають керамічні ролики і кульки. При виготовленні підшипників використовують кераміку, що відрізняється високою якістю (у складі нітриду кремнію, оксиду цирконію, карбїду кремнію, оксиду алюмінію).

Якщо порівняти традиційно використовувані матеріали для виготовлення підшипників (чавун, бронза, бабіти, капрон) і керамічні матеріали нового покоління, то останні мають більш високу твердість і коефіцієнт теплопередачі, коефіцієнт термічного розширення, близький до сталі, меншу питому вагу і нижчий коефіцієнт тертя (Таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 – Властивості матеріалів для виготовлення підшипників

Матеріал	Модуль пружності, МПа	Щільність, г/см ³	Коеф. Пуассона	Коефіцієнт лінійного розширення	Твердість (HRC)	Гранична робоча температура, °C
Сталь 9Х18Ш	30	7,8	0,28	$5,7 \cdot 10^6$	61	300
Карбїд кремнію	330	3,1	0,2	$4,4 \cdot 10^6$	90	1400
Оксид алюмінію	370	3,9	0,22	$9 \cdot 10^6$	92	1950
Нїтрид кремнію	320	3,2	0,26	$3,2 \cdot 10^6$	80	1400
Оксид цирконію	200	6,1	0,3	$11 \cdot 10^6$	76	1200
Сталь ВКС5	210	7,8	0,3	$12 \cdot 10^6$	61	-
Композити на основі карбонїтриду титану	490	5,5...8,5	-	$11...12 \cdot 10^6$	92	1050
Композити на основі карбїду кремнію	до 400	$\approx 3,0$	-	$3,6 \cdot 10^6$	94	1250

За своєю конструкцією керамічні підшипники повністю ідентичні сталевим аналогам, їхня відмінність полягає тільки в матеріалі. Вироби на їх основі мають такі властивості: розширений робочий температурний діапазон, що обмежується характеристиками матеріалів, що змащують. За температурними характеристиками керамічні підшипники перевищують у п'ять разів сталеві;

- висока вібростійкість;
- хімічна стійкість до різних агресивних середовищ;
- неохильність до корозії та стійкість до потрапляння вологи;
- безшумність у роботі;
- мінімальний коефіцієнт тертя та гладка поверхня, (безпечне використання при мінімальному мастилі або повному її відсутності);
- поступовий розвиток відмови підшипника;
- підвищена твердість. Твердість кераміки 75 HRC, а сталі - 60 HRC.

Також керамічні підшипники легші на 40% сталевих аналогів, що сприяє зниженню відцентрової сили при обертанні;

- можливість поєднання не тільки з керамічними деталями, а й зі сталевими;

- відсутність властивостей намагнічування, завдяки чому їх можна застосовувати за умов впливу сильного електромагнітного поля;

- діелектричні характеристики. Необхідні результати електропровідності можна отримати за допомогою використання різних пропорцій хімічних елементів.

Існують і недоліки керамічних матеріалів, один із них - крихкість матеріалу. У зв'язку з цим, при монтажі деталей важливим є забезпечення рівномірного розподілу зусилля по колу та максимальна збалансованість внутрішнього та зовнішнього тиску на кільця. Не допускаються сильні удари, оскільки вони можуть призвести до розтріскування елементів.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Класифікація керамічних підшипників ковзання та кочення та їх використання в механізмах різного призначення: цілком керамічні (робоча температура – до 1800°C; мають усі переваги перед сталевими аналогами);

- гібридні (з кераміки виготовляють лише кульки; вони полегшені, краще обертаються, характеризуються малим опором кочення та дозволяють знизити витрати енергії);

- підшипники, виготовлені з нітриду кремнію (при підвищених навантаженнях та високих швидкостях обертання; вимагають мінімум мастила та відрізняються підвищеною тривалістю використання)

- вироби на основі діоксиду цирконію (робоча температура – до 400°C; інертність до більшості матеріалів, відсутність магнітного ефекту та підвищена міцність).



Рисунок 1.5 – Гібридний підшипник

Керамічні підшипники оптимальні для використання, коли необхідно досягти підвищених оборотів, мінімізувати вагу, а також забезпечити експлуатацію агрегату в умовах високої температури та впливу агресивного середовища.

В результаті порівняння та аналізу досліджень властивостей та характеристик матеріалу можна запропонувати замінити сталеві кульки на

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

керамічні, що вже застосовується на безпілотних літальних апаратах. Таким чином, підшипник виходить гібридним.

1.6.3 Нержавіючі сталі з високим вмістом азоту для підшипників кочення

Як альтернативний матеріал для сталі 8X4B9Ф2-Ш може бути розглянута надчиста хромовуглецева сталь з наскрізним загартуванням (100Cr6), що містить приблизно 1 % вуглецю і 1,5 % хрому. Дана сталь, як правило, проходить загартування на мартенсит або бейніт, внаслідок чого її твердість становить від 58 до 65 HRC.

Підшипники такого матеріалу стабілізовані для робочих температур до 150 °С. Однак інші фактори, такі як матеріал сепаратора та ущільнень або мастило, можуть обмежити діапазон допустимих робочих температур.

Інформація про властивості матеріалів подана у таблиці 1.4.

Нержавіючі сталі з високим вмістом азоту (наприклад, NitroMax) мають такі характеристики (при порівнянні зі стандартною хромовуглецевою підшипниковою сталлю (100Cr6)):

- підвищена втомна міцність та зносостійкість в умовах недостатнього змащування ($k < 1$);
- підвищена стійкість до розтріскування;
- висока корозійна стійкість.

Підвищена міцність втоми і зносостійкість збільшують термін служби підшипників в будь-яких умовах змащування, особливо в умовах кінематичного мастильного голодування при дуже високих частотах обертання.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Таблиця 1.4 - Порівняння властивостей матеріалів для підшипників - сталь 100Cr6 та нітрид кремнію

Властивості матеріалів	Підшипниковий нітрид кремнію	Підшипникова сталь
Механічні властивості		
Щільність [г/см ³]	3,2	7,9
Твердість	1600 HV10	700 HV10
Модуль пружності [кН/мм ²]	310	210
Теплове розширення [10 ⁻⁶ /К]	3	12
Електроізоляційні властивості (при 1 МГц)		
Електричний опір [Ом]	10 ¹² (Ізолятор)	0,4 × 10 ⁻⁶ (Провідник)
Діелектрична міцність [кВ/мм]	15	-
Відносна діелектрична постійна	8	-

Більш висока стійкість до розтріскування знижує небезпеку появи тріщин на внутрішньому кільці через підвищені напруження, що розтягують, викликаних відцентровими силами при дуже високих частотах обертання.

Надчиста сталь з високим вмістом азоту збільшує термін служби підшипників в умовах гарного змащування ($k \geq 1$) (утворення масляної плівки на всій поверхні, що змащується). Але що важливіше, вона значно збільшує термін служби підшипників в умовах недостатнього змащування.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

При термообробці хромовуглецевої сталі виходять великі тендітні частинки карбіду хрому і хромомолібдену, які збіднюють навколишню сталеву матрицю хромом і молібденом, знижуючи опір точкової корозії. З іншого боку, у процесі загартування та відпускання сталі NitroMax утворюються частки нітриду хрому менших розмірів. Коли азот частково замінює вуглець у сталевому сплаві, набагато більша кількість хрому розчиняється у сталевій матриці. В результаті менші зони з збідненням хромом навколо нітридів, що отримуються, значно підвищують корозійну стійкість сталі NitroMax.

Підвищена міцність втоми сталі NitroMax обумовлена її однорідною мікроструктурою і рівномірним розподілом відкладень нітридів хрому з невеликою кількістю нерозчинених вторинних карбідів в мікроструктурі. Якість структури сталі NitroMax вигідно відрізняється від стандартної підшипникової сталі 100Cr6, що пояснює високі експлуатаційні характеристики. Висока ударна міцність, стабільність і твердість (>58HRC) досягаються в результаті остаточного загартування та відпуски при термообробці.

Іншою перевагою сталі NitroMax є нижчий коефіцієнт теплового розширення, ніж 100Cr6. Ця перевага у поєднанні з надзвичайно низьким коефіцієнтом теплового розширення керамічних тіл кочення знижує чутливість даних підшипників до температурної різниці між внутрішніми та зовнішніми кільцями. Набагато більш стабільний рівень переднатягу, навіть у екстремальних робочих умовах, дозволяє знизити втрати на тертя та робочі температури, а також збільшити термін служби пластичного мастила.

Як керамічний матеріал для тіл кочення можна використовувати нітрид кремнію, що складається з тонких довгастих частинок бета-нітриду кремнію, розташованих у кристалічній фазовій матриці. Матеріал має хороші характеристики, особливо для високошвидкісних підшипників:

- висока твердість;

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- високий модуль пружності;
- низька щільність;
- низький коефіцієнт теплового розширення;
- високий електричний опір;
- низька діелектрична постійна;
- нечутливість до магнітних полів.

Поєднання властивостей кілець зі сталі NitroMax і керамічних тіл кочення істотно покращує робочі характеристики підшипників, кілька разів збільшуючи термін їхньої служби порівняно із звичайними гібридними підшипниками [18].

У порівнянні з підшипником зі сталевими кульками, гібридний підшипник з керамічними кульками може працювати при значно більших частотах обертання без значного збільшення переднатягу за рахунок меншої маси кульок.

Стандартні підшипники зі сталі NitroMax оснащуються вбудованим ущільненням з обох боків та заповнюються високоякісним пластичним мастилом. Безконтактні ущільнення практично усувають проблему передчасного виходу підшипників з ладу через потрапляння до них забруднень.

Вони ефективно утримують пластичне мастило, не впливаючи на швидкісні характеристики підшипників.

Вбудовані ущільнення можуть значно збільшити термін служби підшипника, утримуючи мастильний матеріал усередині та не допускаючи попадання в нього забруднюючих речовин із навколишнього середовища.

Нержавіючі сталі з високим вмістом азоту на даний час не отримали широкого застосування через свою високу вартість.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.7 Аналіз причин ушкоджень підшипників кочення

У двоконтурних газотурбінних двигунах підшипники опор роторів відносяться до найбільш навантажених деталей.

У конструкцію підшипників кочення входить зовнішнє та внутрішнє кільця, бігові доріжки по яких перекочуються тіла кочення, ролики або кульки, і сепаратор. Сепаратор забезпечує збереження напрямку руху тілами кочення та їх міжосьову відстань. Деталі підшипників кочення сприймають великі навантаження від масових динамічних, коливальних сил роторів. Характер навантаження, що додається всім деталям різний, але загальний термін роботи підшипника залежить від працездатності кожної з них. При погіршенні працездатності однієї з деталей відбувається погіршення якості роботи підшипника в загалом. Наприклад, при появі втомних ушкоджень на одній або двох бігових доріжках тіла кочення відчують підвищені ударні навантаження, які, у своє чергу, передаються на сепаратор [19]. А сепаратор зазнає ударних навантажень від тіл кочення, так як не всі з них одночасно перебувають у контакті між двома біговими доріжками і сприймають і передають навантаження від ротора чи роторів. Як правило, в контакті з двома біговими доріжками знаходиться від одного до чотирьох тіл кочення, в той час як інші вибирають робочий зазор і контактують тільки з однією біговою доріжкою. Коли кожен ролик або кулька знаходиться в контакті з двома біговими доріжками - він переміщає сепаратор. При контакті роликів лише з одного біговою доріжкою – сепаратор переміщує їх. Відповідно при кожному оберті сепаратора змінюється на протилежне напрям докладання сил до кожного його гнізда, і так як є робочі зазори, відбувається ударна взаємодія тіл кочення з перемичкою сепаратора. За один оберт сепаратора на кожну перемичку діє дві протилежні динамічні ударні сили. При кожному оберті кожна кулька або ролик переміщається при вході в зону передачі

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

навантаження від ротора до статора - в один бік, а при виході з цієї зони – в інший.

При роботі роликового підшипника має місце несинхронний, нерівномірний (коливальний) рух сепаратора і несинхронне обертання навколо своєї осі роликів. Несинхронний рух сепаратора та роликів призводить до виникнення між ними ударної взаємодії, що приводить до збільшення ударних навантажень між ними. Зі збільшенням частоти обертання підшипника величина ударних навантажень зростає.

Таким чином, при вході ролика в навантажену зону відбувається збільшення його швидкості, а потім вибирається зазор між роликом і перемичкою і зовнішня поверхня ролика, що має максимальну окружну швидкість, робить удар про перемичку сепаратора. У момент удару відбувається видавлювання шару мастила із зони контакту роликів та сепаратора. Спільна взаємодія на перемичку сепаратора ударних навантажень і сил тертя при перевищенні границі міцності матеріалу призводить до руйнування перемичок сепаратора та відмову підшипника загалом [20].

За результатами аналізу статистичних даних щодо відмови експлуатованих двигунів найменш надійними елементами конструкції вважаються між роторні підшипники (МРП), що сприймають статичні та динамічні навантаження від двох роторів.

Відмови між роторного підшипника суттєво знижують безпеку польотів літаків, у двигунах яких використовується схема із МРП. При експлуатації відмови МРП проявлялися у двох формах: - Поступове (протягом декількох годин) збільшення вібрації на всіх режимах двигуна на величину до 70 мм/с та більше; - різке збільшення вібрації вище допустимих меж протягом декількох хвилин. Причини різної швидкості процесу переходу підшипника в несправний стан лежать у його конструкції та різному характері проявів відмов окремих деталей.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

При першому варіанті переходу підшипника в несправний стан перевищення допустимих навантажень на підшипник призводить до утворення на бігових доріжках зовнішнього і внутрішнього кілець пітінгової корозії, що викликає точкові сколи, площа яких з часом збільшується. Внаслідок додаткового впливу динамічної складової навантаження на підшипник від ротора, через нерівномірний рух ролика по нерівностям, поступово ушкодження захоплюють всю поверхню бігових доріжок. Аналогічно розвивається і процес підвищеного зносу кілець підшипника при дисбалансі роторів, що перевищує допуск значення. Відбувається прискорене випрацювання матеріалу бігових доріжок в секторі впливу періодичного навантаження деталей підшипника силою дисбалансу.

У цих випадках розвиток відмови відходить з наростаючими в міру розвитку дефектів темпами, але час від його початку до повної втрати працездатності підшипника вимірюється, як мінімум, годинами.

При другому (швидкому) варіанті переходу підшипника у несправний стан через недостатнє охолодження сепаратора відбувається зменшення робочих зазорів між сепаратором та кільцем. При цьому сила тертя ковзання через збільшення сили тиску через температурне розширення деталей зростає, що тягне за собою подальше зростання температури сепаратора в зоні контакту з кільцем. Пропорційно температурі, що збільшується збільшення розмірів деталей, що наводить до затягування обертання сепаратора, та для його переміщення ролики тепер повинні долати зростання навантаження. Зростаюча сила опору сепаратора призводить до ще більшого збільшення сил тертя між роликами і сепаратором і додаткового виділення тепла в зоні їх контакту. Коли напруження від сил, прикладених роликами, перевищать межу міцності матеріалу перемичок сепаратора, то відбудеться руйнація хоча б однієї з них. Це призведе до припинення збереження напрямку руху ролика сепаратором. Втративши механічні зв'язки ролик, внаслідок застосування до нього рівнодіючої всіх сил позаду центру тяжіння

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нестійкий і прагне змінити напрямок руху, що призводить до перетину його траєкторії руху з буртиками бігових доріжок і заклинювання ролика. Набігаючи на заклинені ролики збільшують розміри пошкоджень. Завершальна стадія процесу носить лавиноподібний та швидкоплинний характер. При відмові сепаратора підшипник виходить з ладу протягом кількох хвилин. Однією з причин, що призводить або де-що додатково впливає на працездатність сепаратора і що призводить до розвитку пошкодження підшипника за вище викладеним сценарієм, може бути наявність резонансу сепаратора в робочому діапазоні частот обертання роторів двигуна.

У процесі роботи сепаратора має місце нерівномірне (коливальне) обертання сепаратора навколо осі підшипника з частотою коливань, що дорівнює добутку частоти обертання на кількість тіл качення [21].

Дослідженнями впливу ударного впливу тіл качення на динаміку сепаратора встановлено, що при дії гармонійно змінюється, що обурює сили пружний сепаратор, без урахування пружності інших деталей підшипника качення, тільки тоді працюватиме без резонансу, коли жорсткість сепаратора задовольнятиме нерівності:

$$C_{\varphi} < J_C \frac{\omega^2}{2}, \quad (1.3)$$

де C_{φ} - твердість сепаратора, J_C - момент інерції сепаратора ω - кругова частота обурювальної сили, що дорівнює добутку частоти обертання сепаратора на кількість тіл качення.

У реальних умовах експлуатації підшипників в опорах ВМД виявляються різні причини відмови МРП. Домінування однієї чи іншої з них залежить від комплексного прояву зовнішніх умов: доданих навантажень, охолодження вузла МРП, забезпечення умов його працездатності. Як

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приклад реального розвитку несправності можна привести відмову міжроторного підшипника, відбракованого при ремонті наземної установки газу перекачувальної станції (рис. 1.6, 1.7).

На бігових доріжках зовнішнього та внутрішнього кільця зображеного на фотографіях підшипника є численні ушкодження працюючих поверхонь. Сепаратор має задири на поверхні, що стикається з поверхнею зовнішнього кільця. На перемичках сепаратора, з боку прикладення сили роликів до перемичок, маються сліди перегріву і навіть оплавлення в зонах контакту з роликками. Дві перемички надламані (на фотографії видалені) та з вигином зміщені у бік обертання, що свідчить про прагнення роликів перемістити зтяжний сепаратор.



Рисунок 1.6 – Сепаратор міжроторного підшипника



Рисунок 1.7 – Внутрішнє кільце міжроторного підшипника

З наведених фото випливає, що за наявності великої кількості пошкоджених тіл кочення та бігових доріжок підшипник продовжував працювати, навіть по дефектним ділянкам поверхні бігових доріжок і тіл

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

кочення, а його відмова відбулась через порушення працездатності сепаратора.

Під час розгляду під мікроскопом місць зламу на двох віддалених перемичках сепаратора (рис. 1.8) можна відзначити, що деформація матеріалу була пластичною. Це свідчить про те, що руйнація відбулась при одноразовому навантаженні на перемички сепаратора, що перевищує межу міцності матеріалу. Сліди втомного руйнування, при якому навантажуючі сили наближаються до межі плинності матеріалу, на даних зразках відсутні.

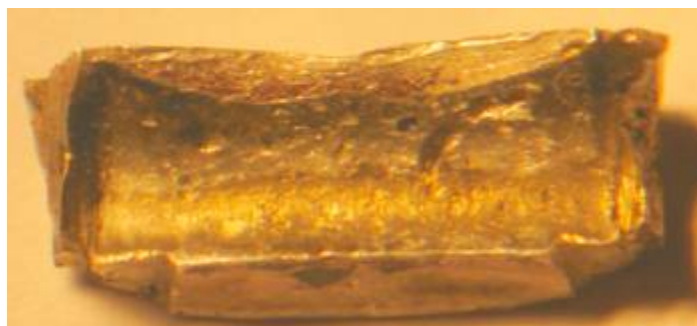


Рисунок 1.8 – Ушкоджена перемичка сепаратора МРП (Зворотній бік)

На сторонах перемичок, дотичних з роликми з боку програми сили роликів до сепаратора, видно сліди пригару мастила, раковини в матеріалі і навіть незначні оплавлення на окремих ділянках (рис. 1.9). Протилежні стоні перемичок, що знаходяться в контактi з роликми, мають сліди вироблення більш м'якого матеріалу сепаратора.

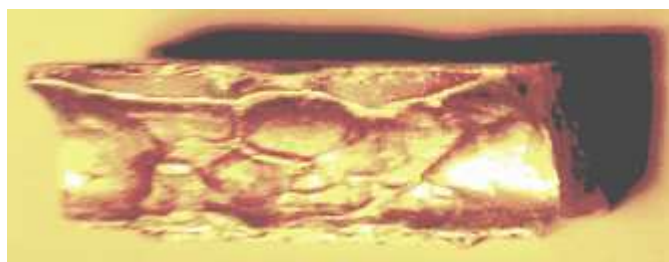


Рисунок 1.9 – Пошкоджена перемичка сепаратора МРП

При появі раковин на бігових доріжках через зменшення площі контакту між поверхнями роликів та бігових доріжок коефіцієнт тертя кочення зменшується. Внаслідок його зменшення з'являється прослизання

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роликів з переходом у граничне тертя і, отже, збільшується температура взаємодії деталей. У результаті загальна температура підшипникового вузла росте, що може являтися діагностичною ознакою несправного (або справного) стану деталей підшипника. На рис. 1.10 показаний сепаратор міжроторного підшипника двигуна, що відмовив.

Пригар і коксування мастила привели до повного заклинювання більшості роликів у сепараторі, що свідчить про температури в цій зоні, що перевищує робочу температуру мастила. На обидва сепаратора дві тріщини втомного походження. Вони починаються в зоні вибірок металу, є концентратором механічних напружень. Вони могли з'явитися при появі резонансних коливань сепаратора з високою амплітудою.



Рисунок 1.10 – Сепаратор відмовився у польоті МРП

При подальшому розвитку цих тріщин можливе повне пошкодження сепаратора та відмова підшипника. У даному прикладі критичним виявилось збільшення температури між тілами кочення (роликами) і сепаратором, що призвели до перевищення робочої температури масла, його коксування і до заклинювання роликів та підшипника в цілому. Якби закоксоване масло не виступило в ролі цементуючого складу, за допомогою якого ролики та сепаратор перетворилися на єдине ціле, тріщини сепаратора могли б прогресувати і підшипник було б пошкоджено.

На рис. 1.11 сфотографований сепаратор підшипника. Сепаратор не має пошкоджень, але сліди зносу його поверхневого покриття нерівномірні, що може свідчити про резонанс, що мав місце в коливаннях сепаратора з

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

високою амплітудою. Їх наслідком стає додаткове збільшення сил тертя між сепаратором і кільцями, що призводить до значного збільшення необхідних сил для переміщення сепаратора.



Рисунок 1.11 – Сепаратор МРП зі слідами нерівномірного зносу

В даному випадку величина цих сил менше руйнівної та підшипник буде працювати, доки не з'явиться додатковий фактор, який призведе до відмову сепаратора та підшипника в цілому.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки по першому розділу

Основні причини дострокового виходу підшипників з ладу можна розділити на три групи: порушення в процесі виробництва, в процесі монтажу та встановлення у вузол при складанні, та в процесі експлуатації виробу.

Надійна робота підшипників кочення залежатиме від хімічного складу, вмісту газів та сприятливої мікроструктури. Невиконання цих вимог може призвести до зниження міцності та фізико-механічних властивостей матеріалу.

Низька якість обробки поверхні, а також порушення під час монтажу призводять до зниження ресурсу підшипника.

Для надійної роботи підшипника необхідне застосування певного мастила у достатній кількості. Недостатня кількість або неправильний підбір протизношувальних та антиокислювальних добавок в маслі може призвести до втомного викришування металу та появи вибоїн.

За результатами візуального контролю спостерігалися такі дефекти: втомне викришування матеріалу, поперечні тріщини, внутрішні тріщини, сліди вдавлювання в основний матеріал стороннього предмета, підвищений вміст загального водню.

У ході металургійного дослідження були виявлені поперечні тріщини, що виходять з ділянок подібного втомного викришування. Тріщини, що розвиваються вглиб тіла матеріалу, свідчать про роботу підшипника кочення з пошкодженням, що розвивається (а саме - викришуванням), а також про вплив на матеріал підшипників високого напруження.

Перераховані вище дефекти можуть бути пов'язані з такими виробничими факторами, як залишкові напруження, підвищений вміст загального і дифузійно-рухомого водню в матеріалі підшипника, які розглядаються в наступних розділах.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Об'єкт досліджень

У цій роботі, як приклад, розглядаються високоточні підшипники кочення II опори турбіни компресора двигунів ТВЗ-117 та ВК-2500 (рис. 2.1) під умовними номерами 1-9 з різним ступенем експлуатаційного ушкодження.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд деталей підшипника опори турбіни

Підшипники кочення для застосування у серійному виробництві повинні мати ресурс 1750 годин. Цей ресурс підтверджений як для двигунів ТВЗ-117, так і для двигунів ВК-2500 випробуваннями та їх експлуатацією.

Аналіз режимів роботи двигунів, а також перевірки розрахунків довговічності підшипника II опори турбіни компресора показали, що експлуатаційні режими роботи двигуна ТВЗ-117ВМА і ВК-2500 однакові за винятком надзвичайних режимів, потужності двигунів якому складають 2400 та 2700 к.с. відповідно.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахункове значення довговічності підшипника для двигуна ТВ3-117 становить 8270 годин, а для двигуна ВК-2500 становить 6420 годин.

2.2 Методика та обладнання для проведення досліджень

Для оцінки величини поверхневих залишкових напружень у матеріалі використовували метод Н.М. Давиденкова [11]. Метод заснований на повному звільненні зразка (ділянки поверхні деталі) та видаленні шарів металу з його поверхні для вимірювання деформацій, що виникли в результаті технологічної обробки деталі, без впливу експлуатаційних навантажень та навколишнього середовища.

При оцінці величини поверхневих залишкових напружень визначали такі характеристики: величину максимальних напружень стиснення в поверхневому шарі $\sigma_{\text{сmax}}$; глибину поширення стискаючих напружень a (при $\sigma=0$); величину максимальних підшарових напружень, що розтягують $\sigma_{\text{рmax}}$.

Металографічний аналіз сталі проводили із використанням оптичного мікроскопа Olympus BX53. Оптичний мікроскоп Olympus BX53 (рис. 2.2) забезпечує отримання реалістичних чітких зображень за допомогою світло діоду підвищеної яскравості, що еквівалентний 100 - ватній галогенній лампі. Світло діодні освітлювачі серії BX53 мають високий індекс кольору, що імітує властивості кольорів галогенної лампи, створюючи, при цьому, знайомі і реальні кольори. Вбудований регулятор інтенсивності світла (Light Intensity Manager) регулює інтенсивність світло діодного джерела світла в залежності від розташування у просторі об'єктива під час спостережень у світлих полях, що суттєво допомагає заощадити час користувача.

Особливості Olympus BX53:

- Висока яскравість світло діодного підсвічувача дозволяє проведення дискусійних досліджень вчених за участю 26 осіб, при встановленні додаткових оптичних головок;

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Система True Color BX53 чітко ідентифікує барвники, що часто використовуються в різних сферах природничих наук. Маючи постійну температуру кольору, що імітує еталонну галогенну лампу, BX53 заощаджує час, не вимагаючи від дослідників регулювання фільтрів кольорів. Користувач отримує ідеальну передачу кольору з довговічним яскравим світлом діодним джерелом світла на будь-яких рівнях освітлення;

- Вбудований в BX53 Light Intensity Manager суттєво спрощує спостереження, за рахунок самостійного регулювання рівня яскравості світла діодів, коли користувач змінює зменшення або збільшення. Користувач може вказувати і зберігати попередньо встановлені рівні яскравості за своїм бажанням і у будь-який час для кожної мети, що забезпечує ідеальне налаштування для конкретної програми;

- BX53 — напівавтоматичний мікроскоп, що самостійно настроюється, з модульними блоками, що дозволяють застосовувати різні методи контрастування, такі як темне поле, світле поле, поляризоване світло, ДІК (диференціальний інтерференційний контраст);

- Для додаткового комфорту додаткове обладнання для BX53 забезпечить зручне розташування для знімків камери та зміни об'єктиву, без необхідності зміни положення рук оператора.



Рисунок 2.2 – Мікроскоп Olympus BX53

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Зразки для металографічного аналізу виготовляли за допомогою механічного шліфування та полірування з подальшим травленням у 4% спиртовому розчині HNO_3 . Дослідження тонкої структури сталі при великому збільшенні проводили з використанням електронного скануючого мікроскопа TESCAN VEGA 5130 LM (рис. 2.3) при прискорюючій напрузі 120 кВ. Фольги для дослідження виготовляли методом струминного полірування на апараті «Тенірол-5» у розчині 20 % азотної кислоти HNO_3 та 80% метанолу CH_3OH при температурі $-25\text{ }^\circ\text{C}$ напрузі 15-20 В.

TESCAN VEGA це електронний скануючий мікроскоп (СЕМ) 4 покоління з вольфрамовим термоемісійним катодом за рахунок якого отримують СЕМ - зображення та проводять аналіз елементного складу в реальному часі і в одному вікні програмного забезпечення TESCAN Essence™, що дозволяє значно спростити процес отримання даних про морфологію поверхні та про її локальний склад, що дозволяє проводити регулярний контроль якості матеріалів, аналіз відмов та інших лабораторних досліджень.



Рисунок 2.3 – Електронний скануючий мікроскоп TESCAN VEGA 5130 LM

Стійка електронного мікроскопа керується модернізованою електронікою, що забезпечує миттєвий перехід від 1 режиму отримання

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

зображень (при збільшеннях) до 2 режиму: дослідження елементного складу дослідних зразків без механічної зміни апертур або механічного юстування будь-яких елементів усередині колони. Один клік забезпечує перемикач між налаштуваннями, що зберігають всі налаштування параметрів мікроскопа.

Режим Wide Field Optics™ забезпечує точну навігацію до дослідної області та надає користувачу можливість огляду всіх зразків у реальному часі. Wide Field Optics™ забезпечує високу ширину поля зору та глибину фокусу без використання фото навігації. Поряд із дослідженням фактичної топографії поверхні зразка (може бути декілька) даний режим може здійснювати інтуїтивну навігацію за всією поверхнею. СЕМ-огляд дослідного зразка у реальному часі сумісний з тримачем із нахилом і може підтримувати функцію корекції кута нахилу. Ця функція дозволяє виконувати навігацію за нахиленими зразками. Наприклад, така функція використовується при роботі з детектором EBSD.

Керування TESCAN VEGA здійснюється з програмним забезпеченням TESCAN Essence™, що має велику кількість інструментів для зручності і швидкості аналітичної роботи, таких як скасування останньої команди, набори перед установок, функція швидкого пошуку. Крім того, віртуальна 3D-модель колізій Essence Collision model досить точно відображає внутрішній простір камери і відтворює в реальному часі розташування, розміри і переміщення столика зі зразками та, при необхідності, обладнання, що встановлене всередині. Віртуальна 3D-модель колізій також включає сторонні пристрої такі як столики для нагрівання або столики для розтягування / стиснення зразків (in-situ).

Дослідження зламів розкритих тріщин проводили за допомогою бінокулярних мікроскопів стереоскопічних МБС-10 (рис. 2.4, табл. 2.1), а також растрового електронного мікроскопа TESCAN VEGA 5130 LM (рис. 2.3).

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Мікроскоп МБС-10 застосовують для спостереження як тонких плівкових і прозорих об'єктів, так і об'ємних предметів, а також препарувальних робіт. Спостереження виконують як при природному освітленні, так і при штучному.



Рисунок 2.4 – Мікроскоп МБС-10

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики мікроскопу МБС-10

Збільшення, крат, в межах	3,3 – 100,8
Лінійне поле зору, мм, в межах	39 - 2,4
Робоча відстань, мм, не менше	95
Джерело світла Галогенна лампа РН8-20-1	12 В/20Вт
Габаритні розміри приладу у робочому положенні (без урахування підлокітників, окулярів, освітлювача), мм, не більше:	
Довжина	238
Ширина	164
Висота	459
Маса приладу, кг, не більше	8
Маса приладу в упаковці, кг, не більше	11

Вимірювання твердості проводили на приладі Dura Vision 300 (рис. 2.5) відповідно до ДСТУ ISO 6508-1:2013 Металеві матеріали. Визначення

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, Е, F, G, Н, К, N, Т) (ISO 6508-1:2005, IDT) та ДСТУ ISO 6507-2:2008 Металеві матеріали. Визначення твердості за Віккерсом. Частина 2. Повірка та калібрування приладів для вимірювання твердості (ISO 6507-2:2005, IDT).

Вимірювання мікротвердості проводили на твердомірі DuroScan 20 (рис. 2.6) при навантаженні 100 гр. Вимірювання мікротвердості вдавлюванням алмазних кінцевиків.

Універсальний твердомір Dura Vision 300 (рис. 2.5) призначений для вимірювання твердості за Брінелем, Роквеллом, Віккерсом, Супер-Роквелом, з електронним вертикальним переміщенням в діапазоні навантажень від 3 до 3000 кгс. Вимірюють твердість сплавів, металів, вуглецю та пластику. Знайшов широке використання, як твердомір для сталей. Твердомір складається з нерухомого робочого столу та вертикального моторизованого переміщення турелі, ідеально підходить для роботи з масивними і габаритними зразками, що у поєднанні з цільною чавунною рамою створює необхідну розмірну точність і стабільність вимірювань. Моторизована турель на сім позицій дозволяє застосовувати усі необхідні методи вимірювань на одній платформі, не змінюючи кінцевими і об'єктиви вручну, та забезпечує справжню універсальність. Стационарний DuraVision-300 твердомір є ідеальним для роботи на будь якому виробництві приладом.



Рисунок 2.5 – Універсальний твердомір Dura Vision 300

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Твердомір Dura Scan-20 (рис. 2.6) – це сучасний прилад з широким робочим діапазоном навантажень від 0,25 гс до 62,5 кгс та моторизованим предметним столиком. Твердомір має литу алюмінієву конструкцію з гранітною основою, що забезпечують необхідну розмірну стабільність та точність. Вимірювання проводяться за шкалами Брінелля, Кнупа та Віккерса нано, мікро та макро діапазонах суто в автоматичному режимі. Серійні вимірювання мікротвердості можуть виконуватись одночасно на 12 зразках. При цьому, також, доступні такі функції як: вимірювання твердості поверхні з можливістю побудови 3-D карти та автоматичне визначення краю зразка. Вертикальне переміщення револьвера дає можливість автоматичного фокусування на зразку лише простим дотиком до поверхні кінцевиком з мінімальним навантаженням, що зберігає як зразок, так і об'єктив від можливих пошкоджень. На моторизовану турель з шістьма позиціями можна встановити до п'яти абсолютно різних об'єктивів, що допомагає при роботі з широкою номенклатурою матеріалів та об'єктів. Сучасні електронні компоненти PLS забезпечують високу надійність та можливість швидкої їх заміни. Також дані твердоміри відповідають усім сучасним вимогам щодо безпеки, а також оснащені системою аварійної зупинки.



Рисунок 2.6 – Універсальний твердомір Dura Scan-20

Визначення вмісту дифузійно-рухомого та загального водню в матеріалі зовнішньої обойми підшипників проводилося методом вакуум-

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

нагріву на аналізаторі водню АВ-1 (рис. 2.7, табл. 2.2) з мас-спектрометричним закінченням за ДСТУ 8920:2019. Сталі та сплави. Методи визначення газів. Дифузійно-рухливий водень визначався при температурі 520 °С до повної екстракції із зразка, температура визначення зв'язаного водню становила 880°С.

Спеціалізований високочутливий магнітний мас-спектрометр (аналізатор АВ-1), налаштований на реєстрацію водню, з екстракційно-завантажувальним вузлом для застосування високотемпературної вакуумної екстракції водню із зразків різних сплавів та металів.



Рисунок 2.7 – Аналізатор водню АВ-1

Зйомка дифракційних спектрів для рентгенівського фазового аналізу (РФА) зроблена на багатофункціональному дифрактометрі EMPYREAN (рис. 2.8) фірми PanAnalytical. Розшифрування дифрактограм для РФА проводилося за допомогою спеціалізованої програми HighScore+ та бази даних PDF-2 2014 року.

Дифрактометр EMPYREAN – це нова модель компанії PANalytical, що являє собою багатофункціональний прилад, призначений для вирішення широкого кола матеріалознавчих досліджень. Виконання експериментів у режимі змінної розмірності як точкового так і двовимірного, включаючи

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

режим комп'ютерної томографії (об'ємну реконструкцію) забезпечує лінійка напівпровідникових детекторів.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики аналізатору водню АВ-1

Аналіз	Автоматичний, без участі оператора, передбачено захисні блокування
Завантаження	Ручне
Мат. обробка	З використанням програмного забезпечення системи цифрової реєстрації
Пуск:	Автоматичний
Передача даних:	USB (з виведенням на ПК)
Тривалість аналізу:	Від 10 хвилин
Пусковий час до початку аналізу:	60 хвилин
Потужність:	Не більше 1 кВт
Обмеження за часом безперервної роботи:	Ні
Живлення:	220/380В +10% / - 15%, 50 Гц
Габаритні розміри, мм, не більше:	
- Екстракційного вузла:	440 x 500 x 470
- Устр. реєструючого:	270 x 325 x 338
- Системи вакуумної:	398 x 672 x 470
Напрацювання на відмову:	Не менше 3000 год.
Загальна маса:	Не більше 95 кг
Для роботи приладу необхідно:	Трифазна мережа; рідкий азот – 1 л/змiна.

Перебудувати конфігурацію дифрактометра дозволяє технологія PreFIX при чому без виконання юстирувальних робіт. Широкий набір столиків для зразків, оптичних елементів, реакційних та термокамер створює з Emurean універсальну платформу, що дає можливість в рамках одного приладу реалізувати велику кількість експериментальних методик.

Основні програми, що можуть бути реалізовані на платформі Emurean:

- кількісний фазовий аналіз;

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

- якісний фазовий аналіз зразків із нерівною або плоскою поверхнею, зразків у скляних капілярах та тонких плівок;
- вимірювання в режимі проходження зразків і фольгі, розміщених між фольгами;



Рисунок 2.8 – Дифрактометр EMPYREAN

- рентгеноструктурний аналіз зразків із нерівною або плоскою поверхнею, зразків у скляних капілярах та тонких плівок;
- експерименти з рефлектометрії на матеріалах підкладки та тонких плівках;
- картування пластин ростових;
- картування зворотного простору для шарів (у тому числі епітаксійних) на монокристалічних підкладках, вимірювання кривих гойдання в режимі дифрактометрії високої роздільної здатності;
- вимірювання залишкових напружень на об'єктах неправильної форми, плоских зразках, та тонких плівках
- аналіз текстури з переважною орієнтацією кристалітів на будь-яких матеріалах;
- вимірювання дифракції у геометрії in-plane на тонких плівках;
- аналіз in-situ перетворень кристалічної структури в умовах змінного навколишнього середовища
- використання методу Pair Distribution Function (метод радіального розподілу електронної густини) для визначення локальної структури;

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

- комп'ютерна томографія на твердих невеликих тілах;
- аналіз нано композитів, нано порошоків, та дисперсій методом мало кутового розсіювання;
- високошвидкісна дифракція рентгенівська для автоматизованого аналізу значної кількості зразків;
- аналіз малих включень у твердих об'єктах з реєстрацією двовимірної дифракційної картини;
- дослідження кристалізації в режимі роботи on-line.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Висновки по другому розділу

Для оцінки величини поверхневих залишкових напружень у матеріалі використовували метод Н.М. Давиденкова.

Металографічний аналіз сталі проводили із використанням оптичного мікроскопа Olympus BX53.

Дослідження тонкої структури сталі при великому збільшенні проводили з використанням електронного скануючого мікроскопа TESCAN VEGA 5130 LM.

Дослідження зламів розкритих тріщин проводили за допомогою біноккулярних мікроскопів стереоскопічних МБС-10, а також растрового електронного мікроскопа TESCAN VEGA 5130 LM.

Вимірювання твердості проводили на приладі Dura Vision 300 (рис. 2.4) відповідно до ДСТУ ISO 6508-1:2013 Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, Е, F, G, Н, К, N, Т) (ISO 6508-1:2005, IDT) та ДСТУ ISO 6507-2:2008 Металеві матеріали. Визначення твердості за Віккерсом. Частина 2. Повірка та калібрування приладів для вимірювання твердості (ISO 6507-2:2005, IDT).

Визначення вмісту дифузійно-рухомого та загального водню в матеріалі зовнішньої обойми підшипників проводилося методом вакуум-нагріву на аналізаторі водню АВ-1 з мас-спектрометричним закінченням за ДСТУ 8920:2019. Сталі та сплави. Методи визначення газів.

Зйомка дифракційних спектрів для рентгенівського фазового аналізу (РФА) зроблена на багатофункціональному дифрактометрі EMPYREAN

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІДШИПНИКІВ ЗІ СТАЛІ 8Х4В9Ф2-Ш

3.1 Дослідження впливу залишкових напружень на експлуатаційну стійкість

Метод дослідження заснований на повному звільненні зразка (ділянки поверхні деталі) та видаленні шарів металу з його поверхні для вимірювання деформацій, що виникли в результаті технологічної обробки деталі, без впливу експлуатаційних навантажень та навколишнього середовища [11].

Місце вирізки дослідних зразків визначалося характером експлуатаційних ушкоджень на зовнішній обоймі підшипника кочення. Важливо, щоб вирізка зразків не вносила зміни до поверхневого напруженого стану, яке підлягає дослідженню, тому її слід здійснювати електроерозійним методом дротяним електродом на «м'яких» режимах. Зразок перед травленням показано на рисунку 3.1.

Для видалення шару металу застосовували універсальний електроліт для травлення сталей та сплавів на основі титану, нікелю та алюмінію при автоматичному керуванні режимом травлення.



Рисунок 3.1 – Зразок перед травленням

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

Відділення зразка від деталі може призвести до порушення рівноваги напруженого стану, внаслідок чого виникає деформація (прогин) зразка та (або) зміна його довжини, за величиною яких можна встановити величину напружень, що релаксували, що передбачено в розрахунковій програмі.

Якщо прогин у бік досліджуваної поверхні, то таблиці вихідних даних програми прогин від вирізки вказується зі знаком мінус (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Схема визначення знака прогину

Аналіз величин і знаків залишкових напружень (рисунок 3.3, 3.4) дозволяє оцінити дисбаланс залишкових напружень в поверхневих шарах матеріалу. Навіть незначний їхній дисбаланс може призвести до виникнення поверхневих дефектів. Так, якщо $\Delta_2 \approx \Delta_1$, то тріщина відсутня; якщо $\Delta_2 > \Delta_1$ або $\Delta_2 < \Delta_1$, то можливе утворення тріщини [22].

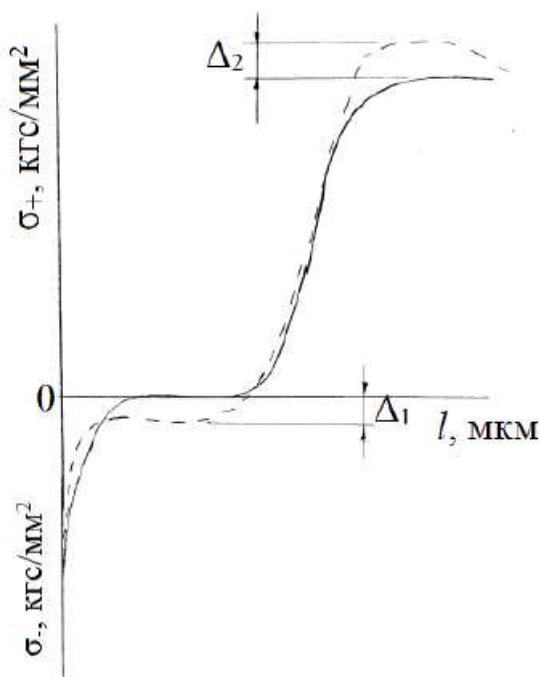


Рисунок 3.3 – Вид епюри залишкових напружень у поверхневому шарі матеріалу обойми бездефектного (суцільна лінія) та дефектного (пунктирна лінія) підшипників

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

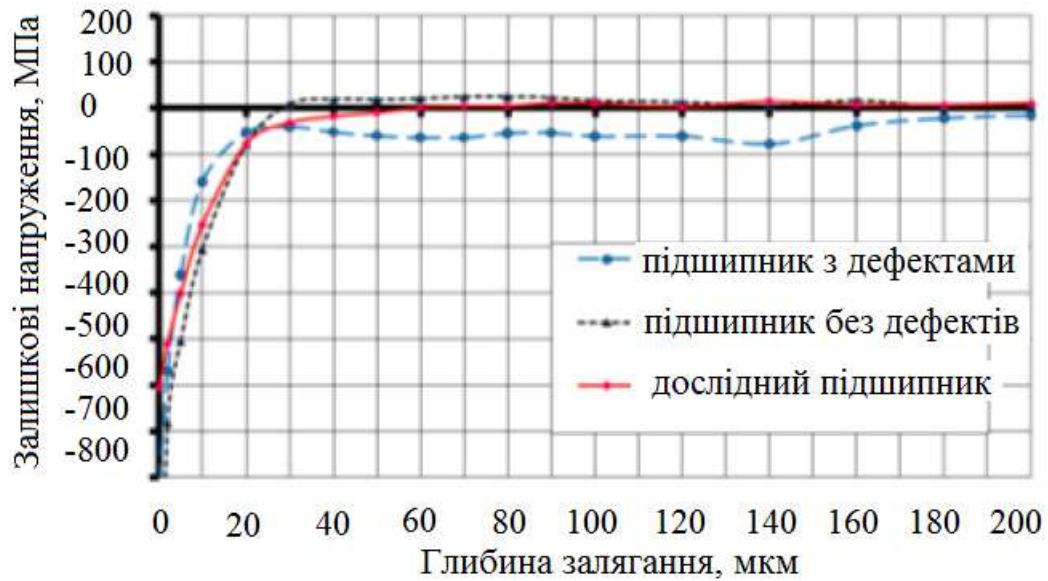


Рисунок 3.4 – Зміна величини поверхневих залишкових напружень у матеріалі підшипника залежно від глибини залягання

Механізм виникнення поверхневих дефектів може бути пов'язаний із зміною величини поверхневих залишкових напружень за допомогою зміни складу та субструктури поверхневого шару. У свою чергу, склад і субструктура поверхневого шару будуть визначатися, насамперед, вмістом у ньому неконтрольованих домішок впровадження, а також щільністю та співвідношенням числа крайових та гвинтових дислокацій.

Об'єднуючи ці чинники, зокрема, можна припустити, що наявність дифузійно-рухомого водню і механізму пластичності Котрелла, що діє, позначатиметься на перерозподілі значень залишкових напружень, і, як наслідок, на виникненні поверхневих дефектів в деталях підшипника [23].

Зважаючи на це припущення слід врахувати, що, з погляду експлуатаційної стійкості, роль термічної обробки деталей підшипника (у тому числі спеціальної) у технологічному процесі, багато в чому, буде визначальною.

3.2 Дослідження вмісту водню у підшипниках

Одним із факторів, що може призвести до утворення тріщин, є підвищений вміст водню.

Для контролю вмісту водню в матеріалі зовнішньої обойми підшипників з двигуна №1 та №3 було проведено аналіз.

За результатами аналізу вміст водню в матеріалі зовнішньої обойми досліджуваних підшипників з двигуна № 1 (напрацювання 274 годин) та № 3 (напрацювання 207 годин) становить, відповідно, 7,3 ppm та 6,1 ppm.

Додатково був проведений аналіз на вміст водню в матеріалі зовнішньої обойми підшипника з двигуна, у якого напрацювання підшипника склала 1309 годин, тріщини на біговій доріжці зовнішньої обойми підшипника відсутні. Зміст водню у матеріалі зовнішньої обойми становило 1,35 ppm.

Для більшості сталей, виготовлених із застосуванням процесу електрошлакового переплаву (ЕШП, у маркуванні сталей з індексом «-Ш»), допустимий вміст водню при дотриманні технології не повинен перевищувати 4 ppm. Отримані результати аналізу вмісту водню в матеріалі зовнішньої обойми підшипників дозволяють припустити, що при виготовленні обойм замість сталі 8Х4В9Ф2-Ш була використана сталь ЕІ347 відкритої виплавки.

Обговорення результатів. Утворення тріщин на біговій доріжці зовнішньої обойми досліджуваних підшипників пов'язане з крихкою матеріалу зовнішньої обойми внаслідок підвищеного вмісту водню в сталі.

Підвищений вміст водню в матеріалі зовнішньої обойми підшипників з двигуна № 1 і № 3 може бути пов'язане з виготовленням обойм із сталі ЕІ347 замість 8Х4В9Ф2-Ш.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

3.3 Дослідження впливу дифузійно-рухомого водню (д.р.в.) на властивості сталі

Як об'єкти для дослідження використовували частини кілець підшипників із сталі 8Х4В9Ф2-Ш (рисунок 3.5).

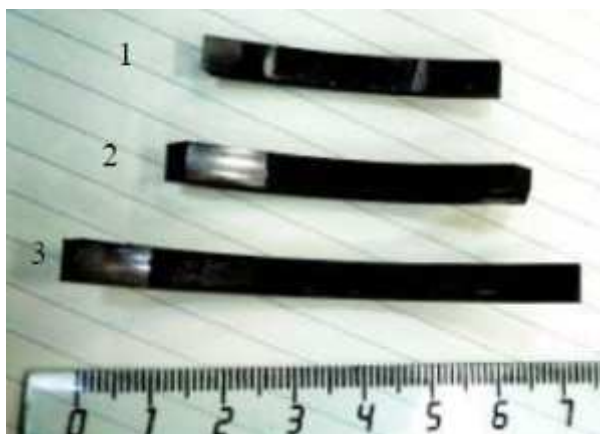


Рисунок 3.5 – Частини кілець підшипників кочення із сталі 8Х4В9Ф2-Ш

Для оцінки ступеня зміцнення після повного циклу термічної обробки було проведено алюмінієвий аналіз. Результати наведено у таблиці 3.1.

При відносному перерахунку зі шкали Віккерса в шкалу Роквелла твердість зразків зі сталі становить 63-65 HRC, що відповідає вимогам.

Однією з можливих причин виходу з ладу підшипника кочення є високий вміст підшипника д.р.в. Для визначення кількості у сталі виготовляли косий шліф доріжкою кочення, тобто. у місцях максимальної концентрації напружень. (Рисунок 3.6).

Для виявлення мікроструктури використали 4% розчин азотної кислоти HNO_3 у спирті.

Після виявлення мікроструктури косого шліфу було отримано, що мікроструктурі містяться мартенсит і карбіди, прийнятні для цієї сталі. Також

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроструктура досліджена у світлому та темному полі зі збільшенням 500 крат (рисунок 3.7 і 3.8).

Таблиця 3.1 – Результати дюрометричного аналізу зразків із сталі 8Х4В9Ф2-Ш

№ зразка	№ виміру	Твердість HV1
1	1	828
	2	842
	3	849
	4	856
2	1	840
	2	828
	3	824
	4	830
3	1	847
	2	847
	3	838
	4	829



Рисунок 3.6 – Зразок з точеною поверхнею для підготовки косого шліфу

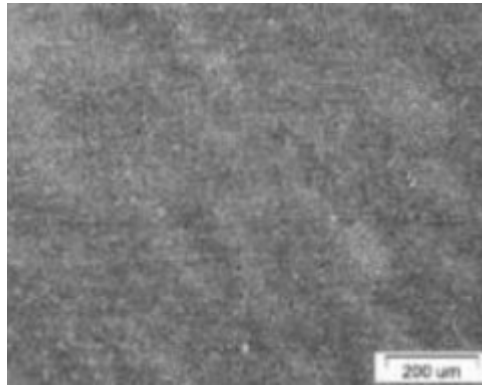


Рисунок 3.7 – Мікроструктура косоного шліфу із сталі 8X4B9Ф2-III (x100)

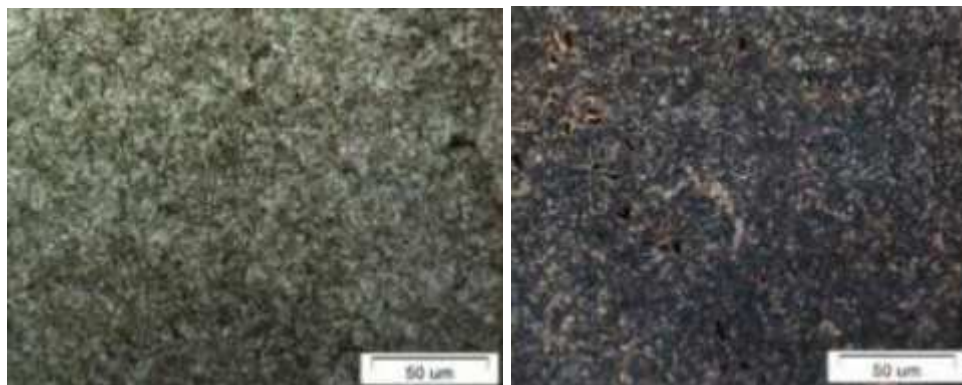


Рисунок 2.8 – Мікроструктура косоного шліфу сталі 8X4B9Ф2-III (x500):

(а) у світлопольному режимі; (б) у темнопольному режимі

Отримано, що оптичним методом не вдалося виявити вплив д.р.в. структуру стали після повного циклу термічної обробки.

Потім випробування на вміст д.р.в. провели на аналізаторі. Для цього від кожної частини кільця відрізали зразки розміром $\varnothing 4 \times 7$ мм. Результати досліджень показали, що в одному з кілець знаходиться підвищений вміст д.р.в. (Таблиця 3.2).

Результати досліджень показали суттєвий розкид змісту д.п.в. у сталі, причому у зразку № 3 виявлено значення, що значно перевищують допустимі межі (Таблиця 2.6). Такий підвищений вміст д.п. могло призвести до утворення тріщин та виходу з ладу підшипника кочення.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Таблиця 3.2 – Вміст водню у зразках із сталі 8Х4В9Ф2-Ш

№ зразка	Масовий вміст водню, %	Об'ємний вміст водню, см ³ /100г
1	0,000019	0,21
2	0,000016	0,175
3	0,000054	0,60

3.3 Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника

3.3.1 Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 1 (вміст Н₂ -7,3 ppm)

Структура зовнішньої обойми підшипника № 1 складається з мартенситу і дуже великих карбідів, які розподілені нерівномірно (рисунок 3.9, 3.10).

У структурі зовнішньої обойми видно, що на протилежному боці обойми (неробочій частині, яка не стикається з тілами кочення), наклеп відсутній (рис. 3.11).

У структурі зовнішньої обойми спостерігаємо первинні карбіди, роздроблені в процесі кування. Їх розмір становив трохи більше 3,3 мкм, що припустимо за ТУ 14-1-2244-2005.

У структурі відсутній залишковий аустеніт, так як була проведена обробка холодом (у структурі міститься невелика кількість залишкового аустеніту, кількість якого не буде впливати на властивості сталі в цілому, тому говоритимемо про те, що залишковий аустеніт відсутній).

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64



Рисунок 3.9 – Мікроструктура зовнішньої обойми підшипника №1 (x500)

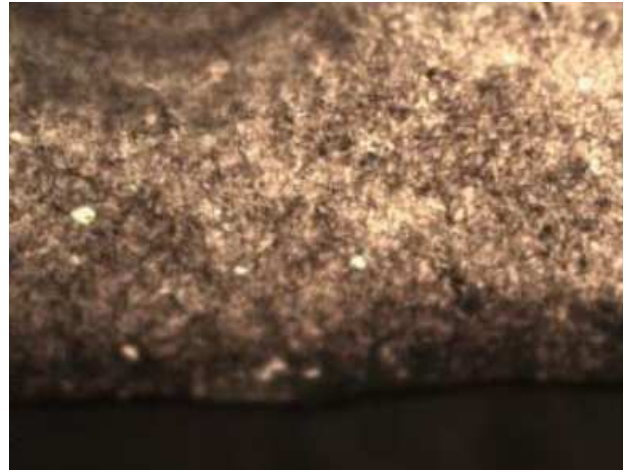


Рисунок 3.10 – Мікроструктура зовнішньої обойми підшипника № 1 (x500)

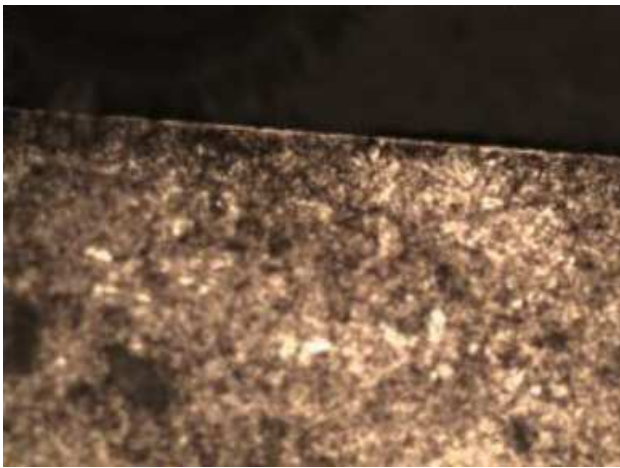


Рисунок 3.11 – Мікроструктура зовнішньої обойми (з боку неробочої поверхні) підшипника № 1 (x500)



Рисунок 3.12 – Мікроструктура зовнішньої обойми підшипника № 1 (x1000)



Рисунок 3.13 – Мікроструктура кульки підшипника №1 (x1000)

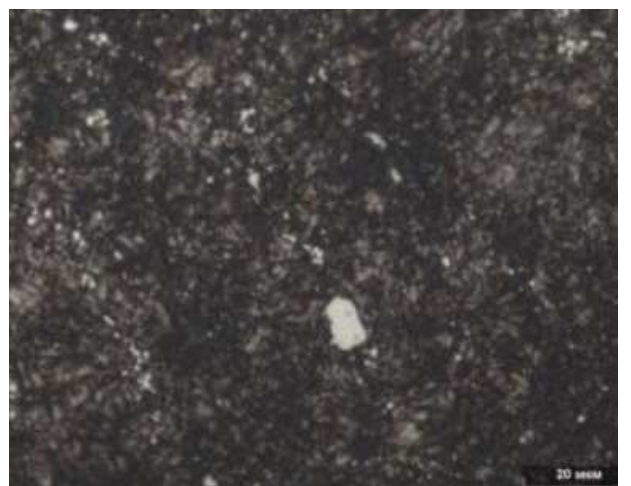


Рисунок 3.14 – Мікроструктура кульки підшипника №1 (x1000)

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

У структурі кульки підшипника №1 первинних карбідів практично відсутні. Спостерігається розсип вторинних карбідів, які шикуються в ланцюжки, тобто існує ймовірність, що вони розташовуються по межах зерна. Причому густина розподілу вторинних карбідів нерівномірна.

Видно невеликий вміст первинних карбідів, їх розмір становить приблизно 8 мкм, але їх кількість набагато менша, ніж у структурі зовнішньої обойми.

На зовнішній обоймі залишкового аустеніту немає, а структурі кульки є невеликий вміст залишкового аустеніту.

Первинні карбіди, що мають незграбну форму, не допускаються, тому що вони є концентраторами напружень.

3.3.2 Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 3 (зміст Н₂ – 6,1 ppm)

На рисунку 3.15 видно наклеп на робочій поверхні зовнішньої обойми, оскільки зовнішня обойма піддавалася тепловому впливу.

На протилежному боці обойми (неробочої частини) (рисунок 3.16) відсутній наклеп, оскільки ця частина не бере участі у взаємодії з тілами кочення (кульками).

У центральній частині зовнішньої обойми (рис. 3.17) видно нерівномірний розподіл карбідів.

У структурі зовнішньої обойми (рисунок 3.18) первинні карбіди не деформовані, оскільки мають округлу форму. Вторинні карбіди концентруються навколо первинних. Видно великий вміст залишкового аустеніту.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

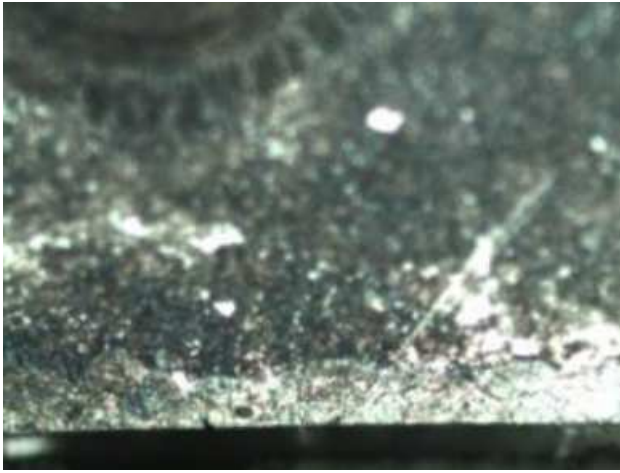


Рисунок 3.15 – Мікроструктура зовнішньої обойми (робочої поверхні) підшипника №3 (x500)

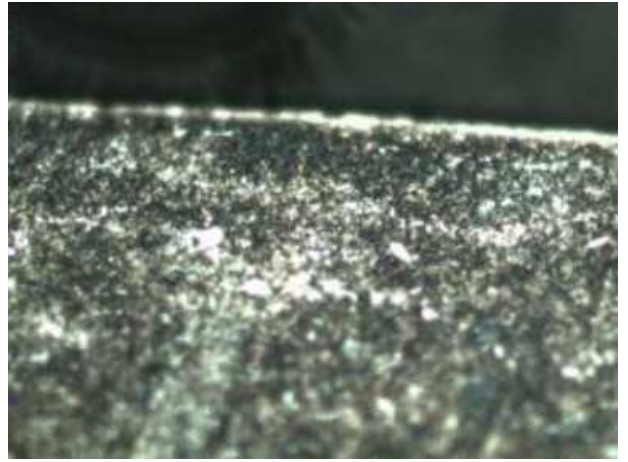


Рисунок 3.16 – Мікроструктура зовнішньої обойми (з боку неробочої поверхні) підшипника № 3 (x500)

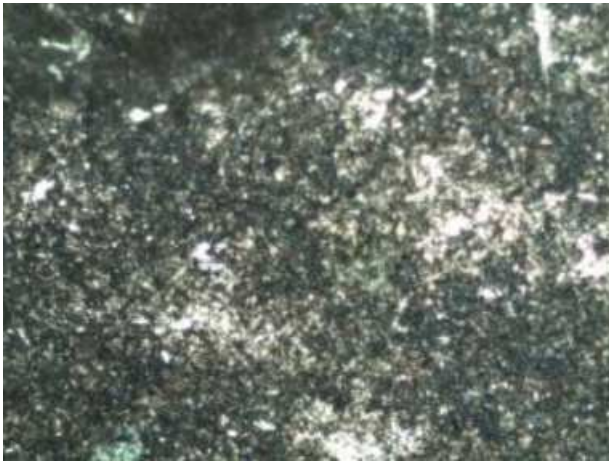


Рисунок 3.17 – Мікроструктура зовнішньої обойми (центральної частини) підшипника № 3 (x500)

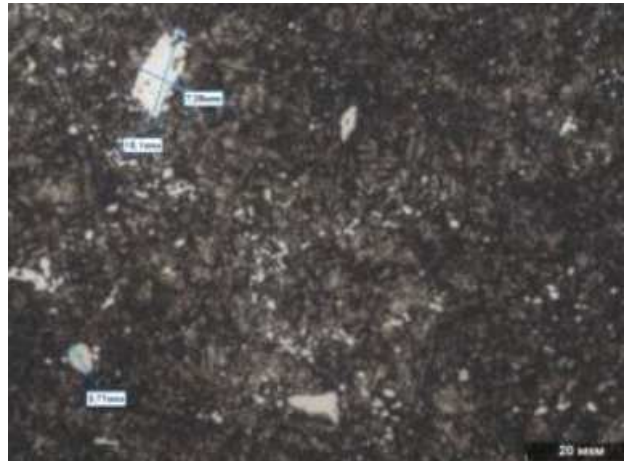


Рисунок 3.18 – Мікроструктура зовнішньої обойми підшипника № 3 (x1000)

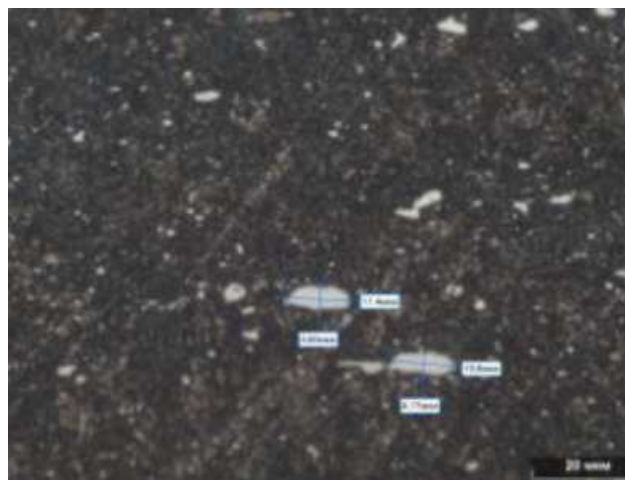


Рисунок 3.19 – Мікроструктура кульки підшипника №3 (x1000)

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

У структурі кульки підшипника № 3 (рисунок 3.19) добре видно, що первинні карбіди деформовані, внаслідок чого також спостерігаємо рядкове розташування карбідів.

3.3.3 Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 2 (зміст H_2 - 3,4 ppm) (шліф виконаний у поперечному напрямку)

На рисунку 3.22 добре видно наклеп, який утворився в результаті теплового впливу, який у свою чергу виник через тертя між поверхнями (в процесі зіткнення кульок і робочої поверхні зовнішньої обойми). Оскільки твердість поверхні досить висока (62 HRC), то поверхня буде схильна до крихкості, а не до деформування.

У структурі зовнішньої обойми (центральної частини) (рис. 3.24) карбіди розподілені нерівномірно. За високих температур стався процес коагуляції карбідів.

На протилежному боці обойми (Рисунок 3.26) (неробочої частини, яка не стикається з тілами кочення) відсутні наклеп.

На рисунку 3.20 видно карбідну неоднорідність у вигляді рядкового розташування (карбідна ліквация). За шкалою карбідну ліквацию можна віднести до 3-4 балів, що допустимо технічними вимогами. Карбідна ліквация може утворитися при недостатньому проковуванні. Внаслідок карбідної ліквации зменшується стійкість інструменту та зростає його крихкість. Досить важко домогтися структури, у якій буде відсутня карбідна неоднорідність, оскільки первинні карбіди утворюються під час виробництва (кування) сталі.

На кромці поверхні присутній тонкий знеуглецьований шар, оскільки видно чітку межу між білим шаром і металів (неплавний перехід) (рисунок 3.20). Наявність знеуглецьованого шару може говорити про те, що підшипник працював із прослизанням.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

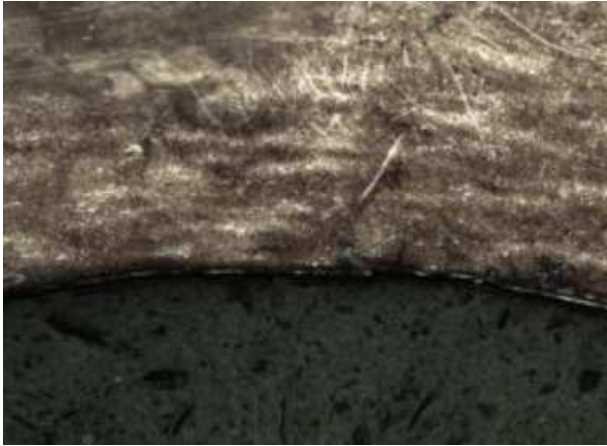


Рисунок 3.20 – Мікроструктура зовнішньої обойми підшипника №2 (x50)

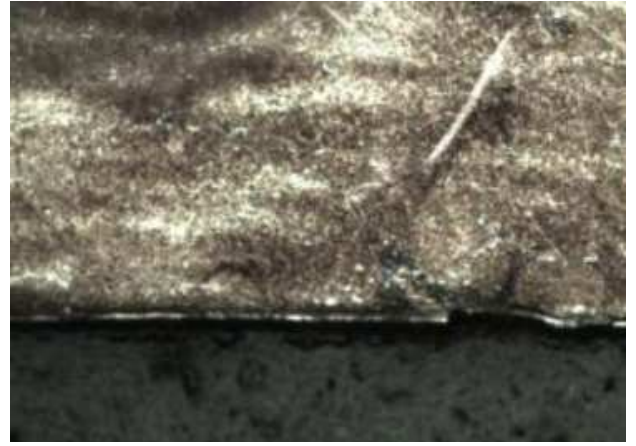


Рисунок 3.21 – Мікроструктура зовнішньої обойми підшипника №2 (x100)

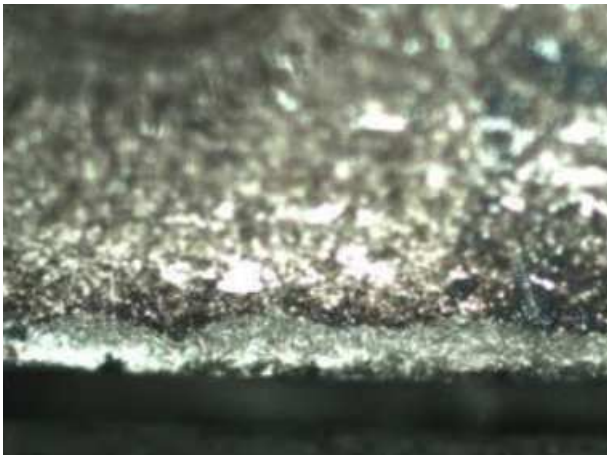


Рисунок 3.22 – Мікроструктура зовнішньої обойми (робочої поверхні) підшипника №2 (x500)



Рисунок 3.23 – Мікроструктура зовнішньої обойми (робочої поверхні) підшипника №2 (x1000)

Первинні карбіди витягнуті вздовж напрямку деформації. Підвищена концентрація карбідів у серцевині поверхні. На рисунку 3.21 вже видно конгломерати карбідів, які не роздроблені, що говорить про погане проведення процесу кування. Карбідну неоднорідність можна віднести до 3-4 балів, що допускається ТУ 14-1-2244-77.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

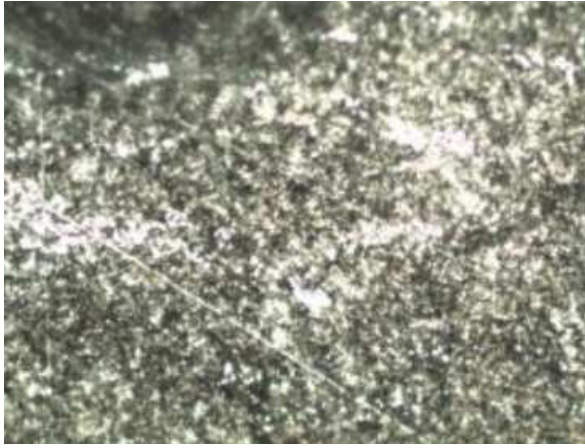


Рисунок 3.24 – Мікроструктура зовнішньої обойми (центральної частини) підшипника № 2 (x500)

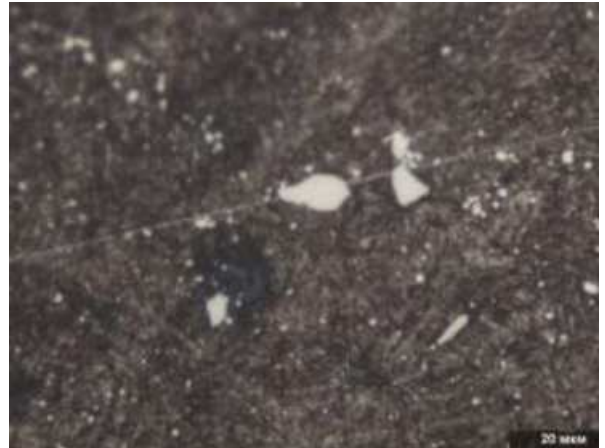


Рисунок 3.25 – Мікроструктура зовнішньої обойми (центральної частини) підшипника № 2 (x1000)



Рисунок 3.26 – Мікроструктура зовнішньої обойми (з боку неробочої поверхні) підшипника № 2 (x500)

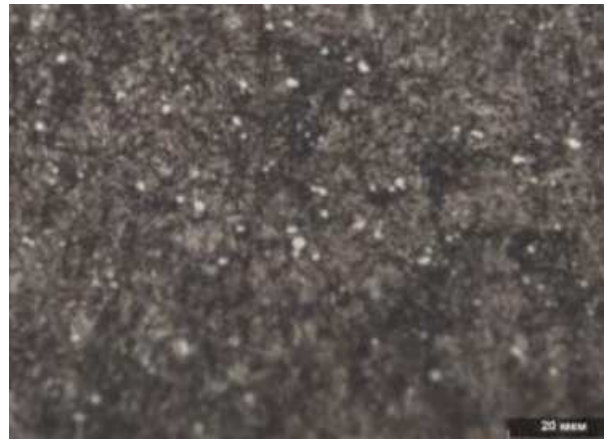


Рисунок 3.27 – Мікроструктура кульки підшипника №2 (x1000)

Утворення водню могло статися в процесі лиття, внаслідок чого утворення водню могло сприяти крихкості.

Робоча поверхня підшипника стикається з поверхнею валу, виникає теплова дія між поверхнями внаслідок тертя.

У структурі кульки залишковий аустеніт практично відсутній (рис. 3.27). Існує спрямованість вторинних карбідів. Більш-менш рівномірна структура, первинних карбідів майже немає.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3.4 Дослідження структури зовнішньої обойми та кульки підшипника № 2 (вміст Н₂ - 3,4 ppm) (шліф виконаний у поздовжньому напрямку)

При 50-кратному збільшенні видно залишки литої структури. У центральній частині структури зовнішньої обойми (Рисунок 3.28) спостерігаємо мартенсит, залишковий аустеніт, невеликий вміст первинних карбідів. Однорідна структура. Хоча навіть така невелика наявність первинних карбідів могла сприяти викришуванню.

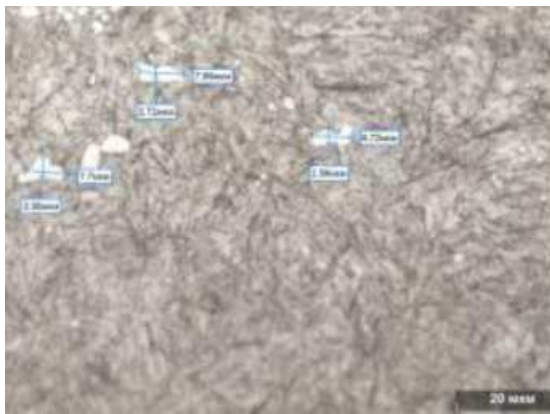


Рисунок 3.28 – Мікроструктура зовнішньої обойми (центральної частини) підшипника № 2 (x1000)



Рисунок 3.29 - Мікроструктура зовнішньої обойми (центральної частини) підшипника №2 (x500)

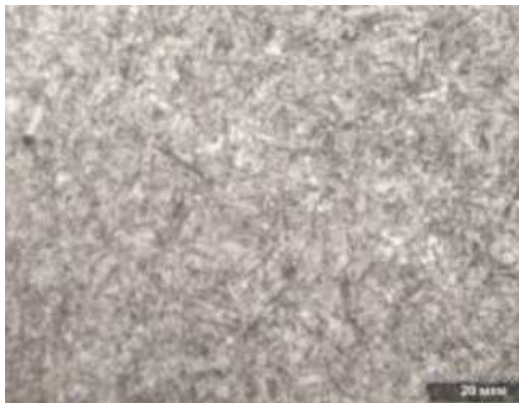


Рисунок 3.30 – Мікроструктура зовнішньої обойми (центральної частини) підшипника № 2 (x1000)

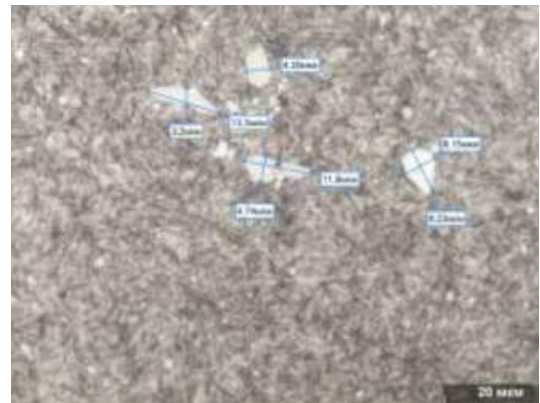


Рисунок 3.31 – Мікроструктура зовнішньої обойми (центральної частини) підшипника №2 (x1000)

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

У структурі зовнішньої обойми (рисунок 3.30) є і первинні, і вторинні карбіди.

На рисунку 3.31 первинні карбіди мають великі розміри.

Обговорення результатів дослідження мікроструктури.

Однією з вимог до структури сталі 8X4B9Ф2-Ш є рівномірний розподіл карбідів, інакше може розвиватися викришування. Для рівномірного розподілу карбідів необхідно робити більш тривалу витримку. Крім того, рекомендується проводити гомогенізацію в процесі нагрівання для зменшення неоднорідності розподілу карбідів.

Також для більш рівномірного виділення та розподілу карбідів рекомендується робити ступінчасте загартування. У процесі кування слід було б дати побільше деформації, щоб подрібнити первинні карбіди.

3.4 Фрактографічні дослідження

На додаток до дослідження було проведено фрактографічні дослідження розкритої тріщини на біговій доріжці зовнішньої обойми підшипників № 2, 3, 7.

Дослідження зламу розкритої тріщини проводилося за допомогою біноклярних стереоскопічних мікроскопів МБС-10 та MEIJI TECHNO, а також за допомогою растрового електронного мікроскопа TESCAN VEGA 5130 LM.

3.4.1 Фрактографічні дослідження підшипника №3

Фрактографічними дослідженнями підтверджено статичний характер виникнення поперечної тріщини на біговій доріжці зовнішньої обойми підшипника.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наявність великої кількості сходів, язичків і гребенів поза поверхнею зламу, але що примикають до неї кордоном (рисунок 3.32-3.34) і що утворилися в результаті штучного розтину, свідчать про пластичну деформацію двійникуванням.

Дослідження поверхні зламу, проведені за допомогою растрового електронного мікроскопа, підтверджують двійникову природу пластичної деформації тріщини поблизу поверхні (рисунок 3.35, е і рисунок 3.36, д), так і на глибині (рисунок 3.35, в).

Крім того, в зоні поверхні (рисунок 3.36, б, в, д) відзначені ознаки насичення воднем і водневої крихкості - поверхні мікро квазісколу, що чітко спостерігаються; мікропори і пластично розкриті волосини (рисунок 3.36, б, в).

Оскільки для утворення двійників необхідні поєднання таких факторів, як низька температура, велика швидкість докладання напружень і багато вісність характеру напружень, то з великою ймовірністю можна припустити, що тріщина утворилася під дією зовнішнього навантаження при відносно низьких температурах, а її утворенню міг сприяти високий вміст водню поверхневому шарі.



Рисунок 3.32 – Розташування та зовнішній вигляд розкритої тріщини (x30)

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

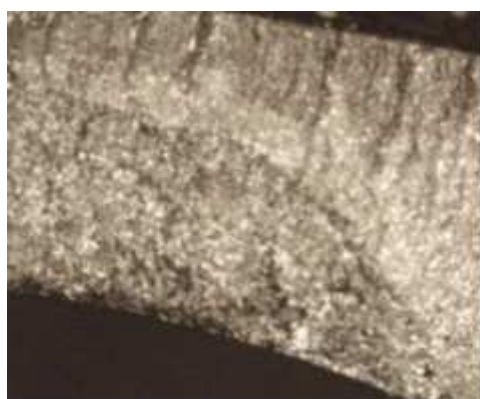


(a)



(б)

Рисунок 3.33 – Панорама розкритої тріщини (оптична металографія) (x30)



(a)



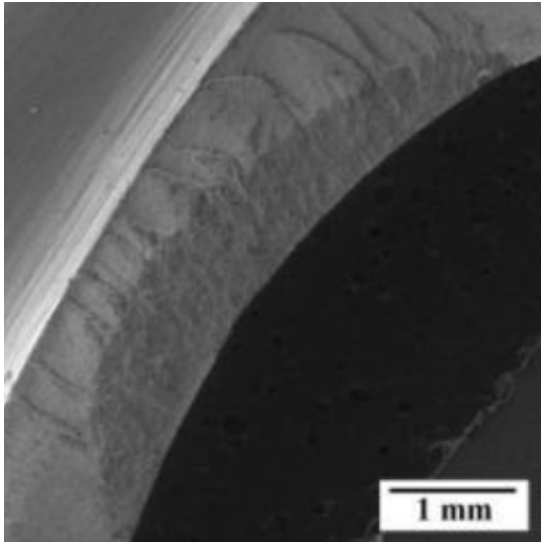
(б)



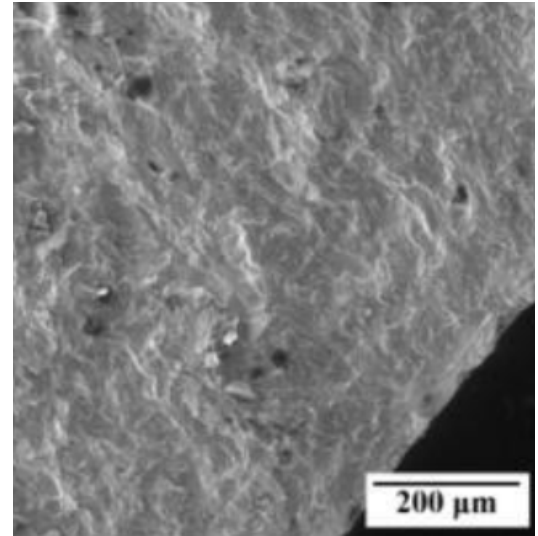
(в)

Рисунок 3.34 – Фрагменти розкритої тріщини (оптична металографія) (x40)

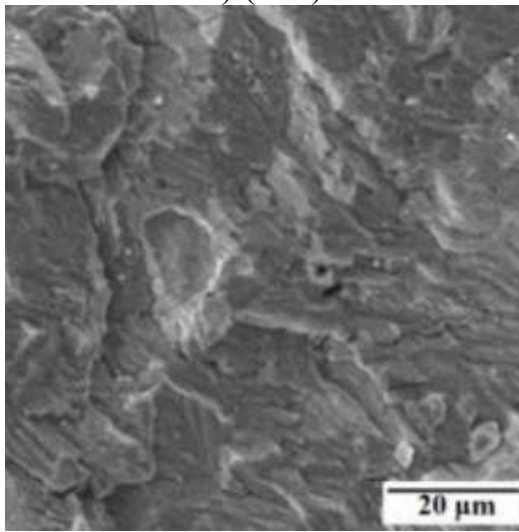
					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74



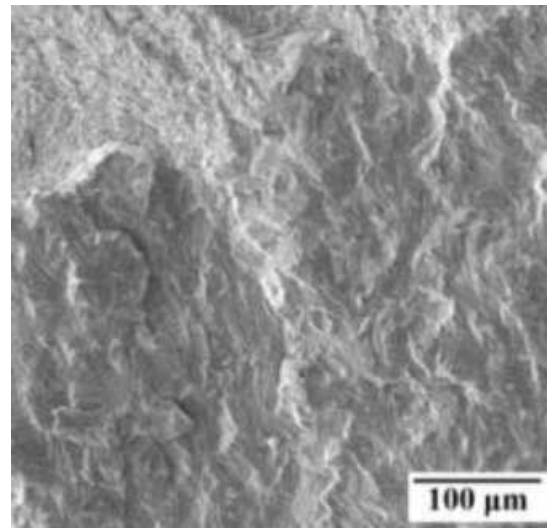
а) (x50)



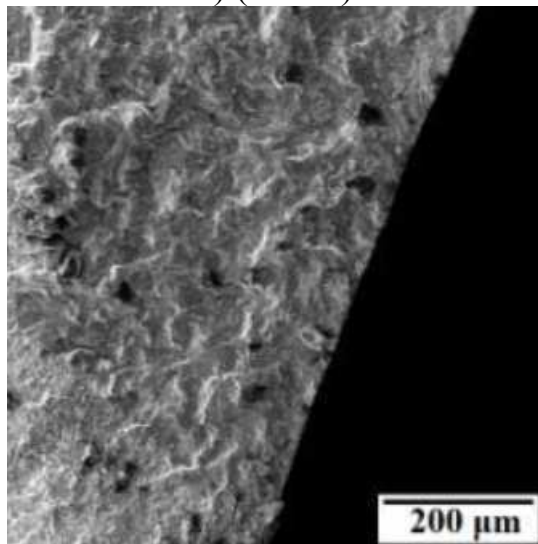
б) (x295)



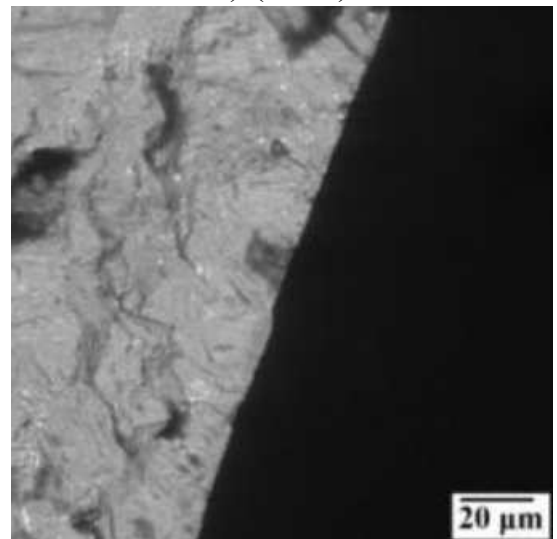
в) (x2650)



г) (x505)



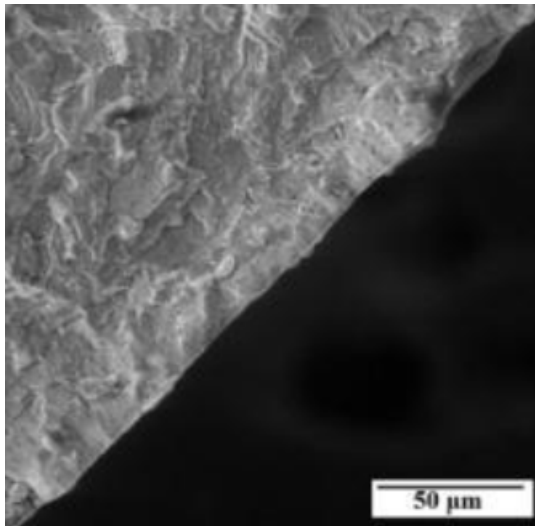
д) (x301)



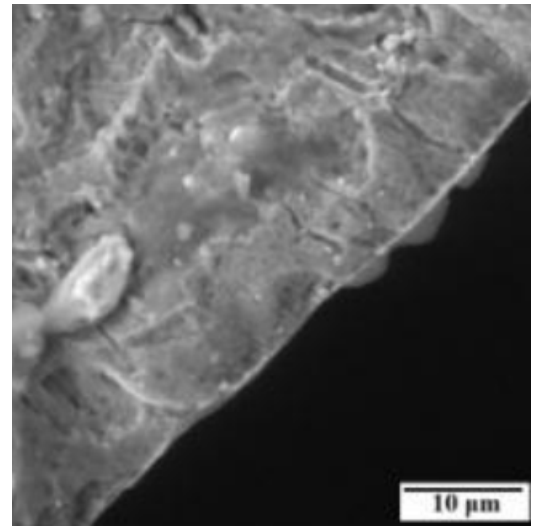
е) (x1450)

Рисунок 3.35 – Панорама розкритої тріщини (Скануючий електронний мікроскоп)

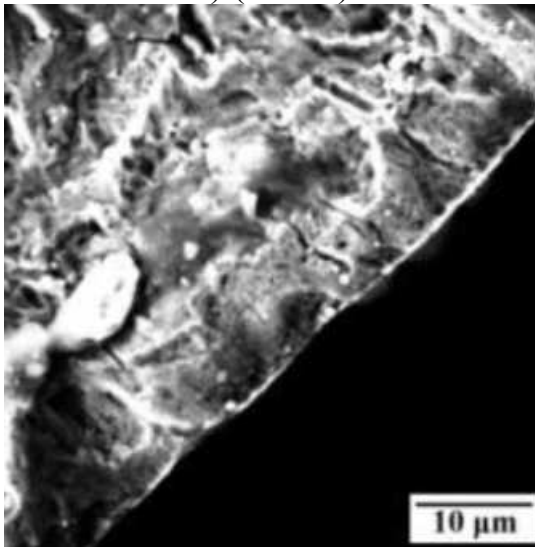
					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75



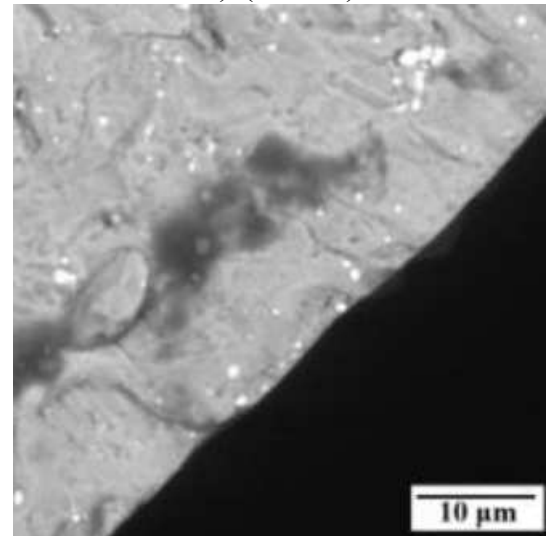
а) (x1180)



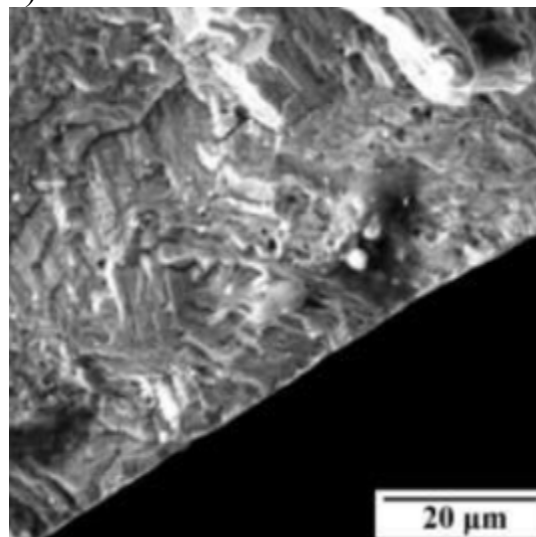
б) (x4710)



в) (x4710)



г) (x4710)



д) (x3120)

Рисунок 3.36 – Фрагменти зламу - поверхнева руйнація
(Скануючий електронний мікроскоп)

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

Таким чином, підтверджено статичний характер виникнення поперечної тріщини на біговій доріжці зовнішньої обойми підшипника №3.

Тріщина утворилася під впливом зовнішнього навантаження. Виникненню тріщини міг сприяти високий вміст водню в поверхневому шарі.

3.4.2 Фрактографічні дослідження підшипника №2

Фрактографічними дослідженнями підтверджено статичний характер виникнення поперечної тріщини на біговій доріжці зовнішньої обойми підшипника.

Злам умовно можна розділити на дві частини – поверхневу та основну; для поверхневої частини (рисунок 3.39, в, г) характерний вид з карбідними виділеннями, для основної - рядкова, волокнисто-смужкова будова (рисунок 3.39, б і рисунок 3.40, в, г).

Наявність карбідних виділень і поздовжніх розшарування в поверхневому шарі зламу, а також наявність характерних мікротріщин і фасеток квазисколу свідчать про стан поверхневого перенаклепу, що пов'язано з наявністю високих стискаючих поверхневих залишкових напружень і внутрішньо зеренвою крихкістю.

Поверхня руйнування основної частини зламу, що характеризується наявністю шаруватості (рядкова, волокнисто-смужкова будова), пов'язана з неоднорідністю матеріалу і має технологічне походження на стадії гарячої пластичної деформації (кування). Розташування волокна під кутом, орієнтовно, 90° по відношенню до бігової доріжки є несприятливим як з точки зору можливого розшарування, так і механічних властивостей.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

Таким чином, поява тріщини пов'язана з виникненням високих поверхневих залишкових напружень стиснення при несприятливому рядковому будові матеріалу.



Рисунок 3.37 – Злам 1. Зовнішній вигляд (оптична металографія)

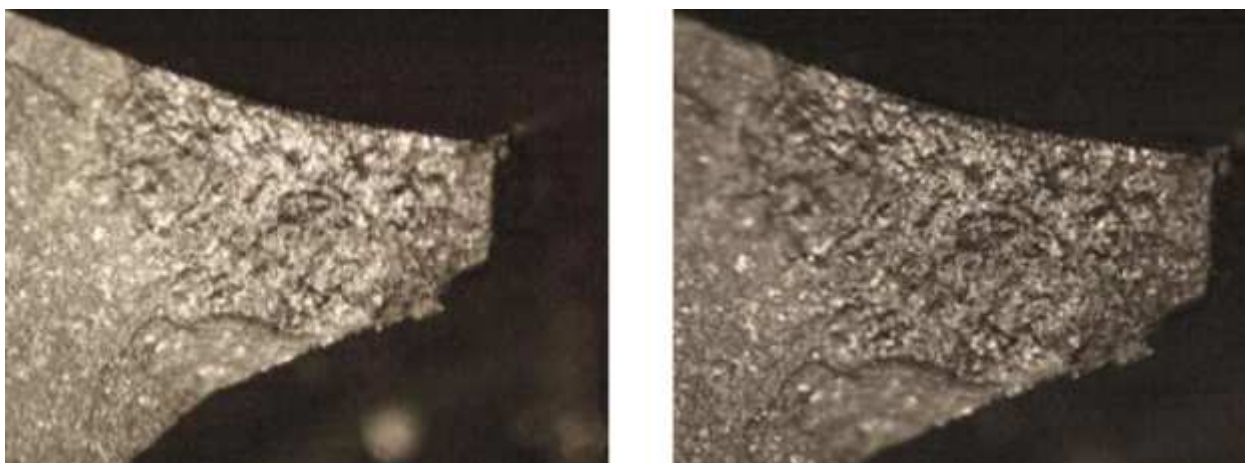
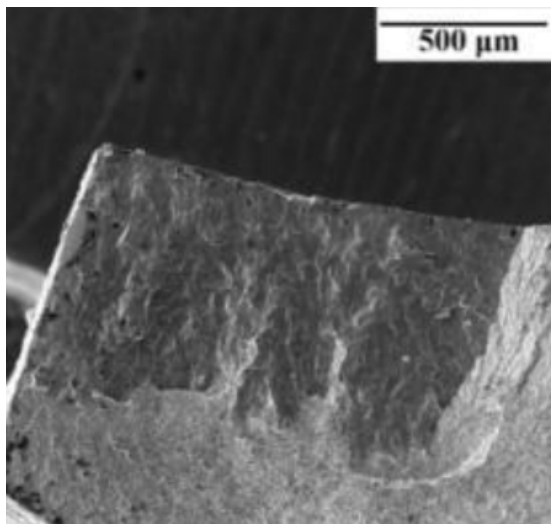
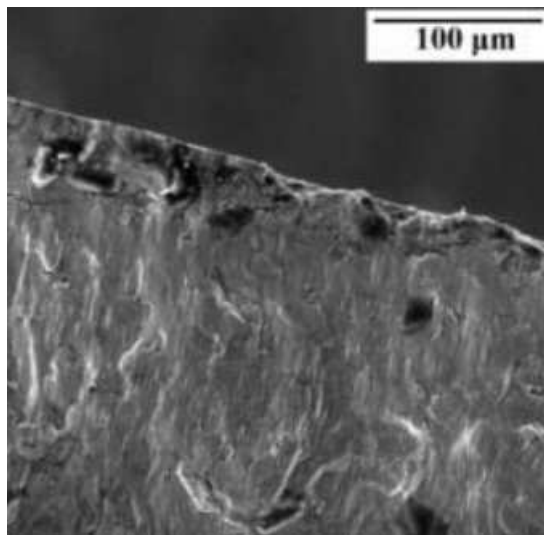


Рисунок 3.38 – Злам 2. Зовнішній вигляд (оптична металографія)

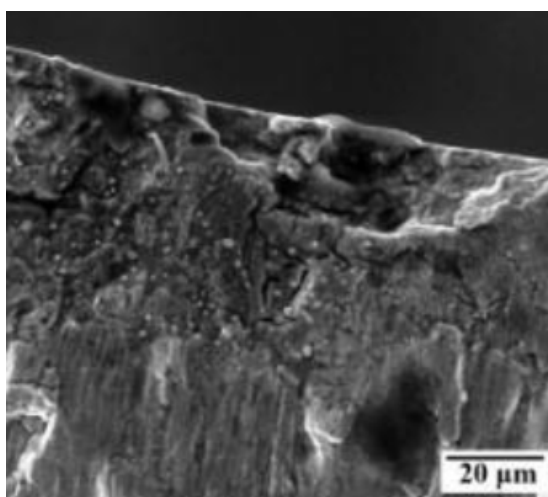
					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



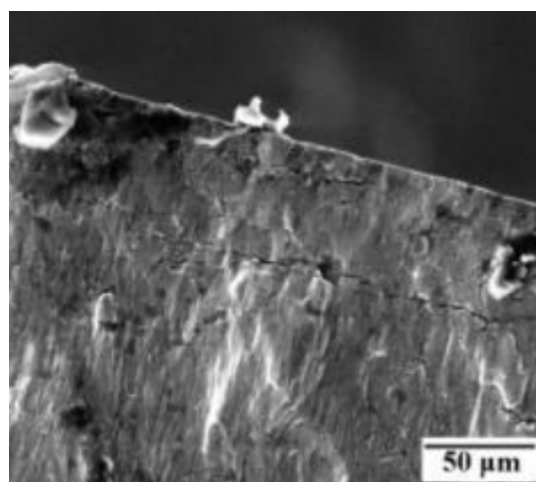
а) (x133)



б) (x679)



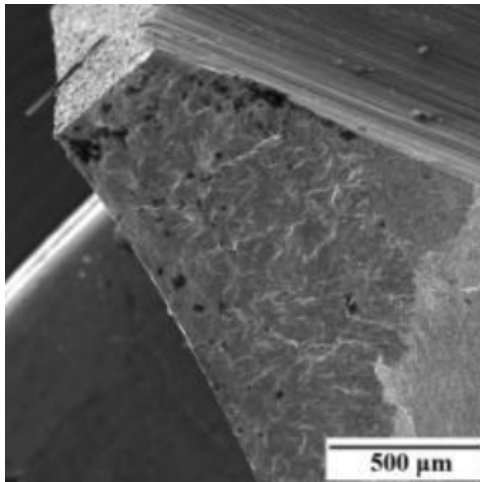
в) (x1930)



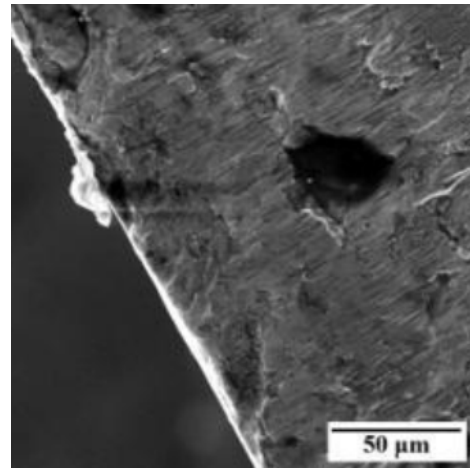
г) (x880)

Рисунок 3.39 – Будова зламу 1. Дослідження за допомогою електронного мікроскопу:

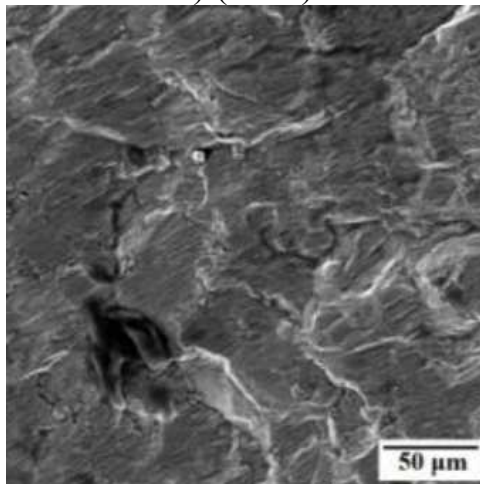
(а) – загальний вигляд; (б) – рядкова, волокнисто-смужкова будова частини зламу мартенситної структури; (в) – будова поверхневого шару; (г) – поверхнева та підповерхнева структура частини зламу



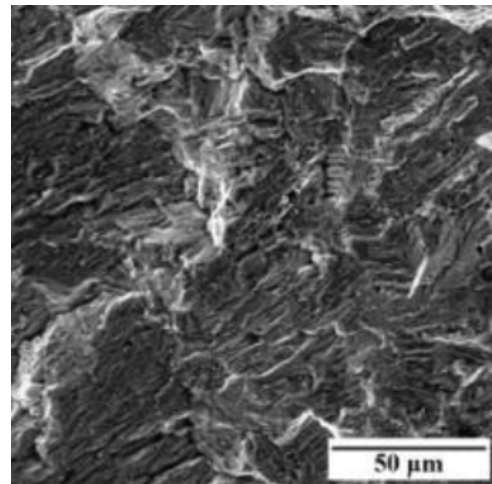
а) (x137)



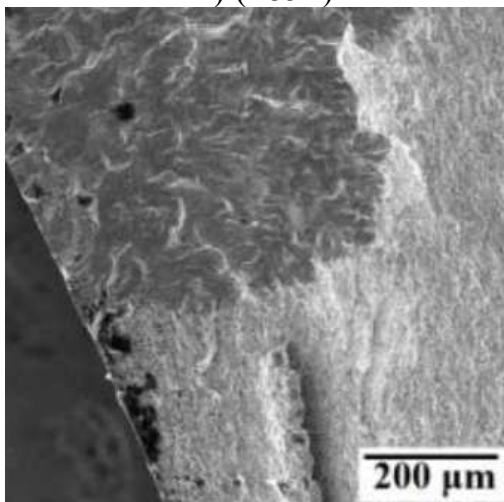
б) (x1210)



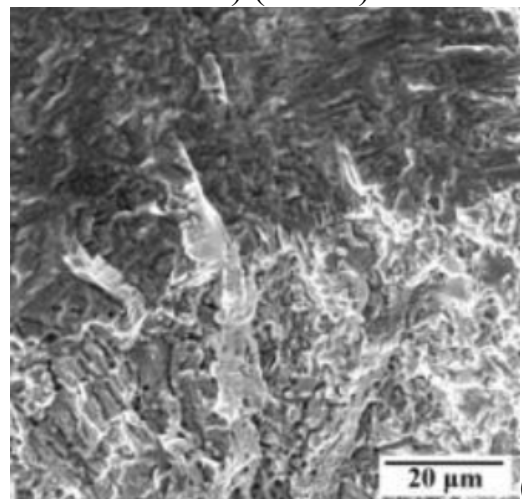
в) (x854)



г) (x1390)



д) (x285)



(x2450)

(е)

Рисунок 3.40 – Будова зламу 2. Дослідження за допомогою електронного мікроскопа: (а) – загальний вигляд; (б) - будова поверхневого шару; (в), (г) - рядкова, волокнисто-смужкова будова частини зламу мартенситної структури; (д),(е) – межа частини зламу

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

Підтверджено статичний характер виникнення поперечної тріщини на біговій доріжці зовнішньої обойми підшипника №2.

Тріщина утворилася через перенаклеп поверхневого шару і виникнення високих поверхневих напружень стиснення. Виникненню тріщини могла сприяти несприятлива рядкова будова матеріалу, що має технологічне походження.

3.4.3 Фрактографічні дослідження підшипника № 7

При дослідженні поверхні зовнішньої обойми підшипника № 7 за допомогою оптичного мікроскопа спостерігаємо вогнища та напрямки втомного викришування (показані стрілками) (рисунок 3.41).

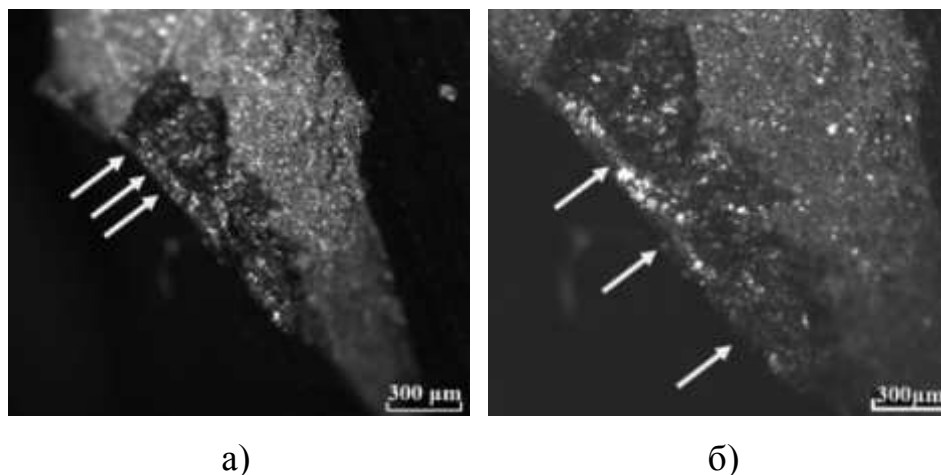


Рисунок 2.41 – Злам 1. Поверхня зовнішньої обойми підшипника № 7 (оптичний мікроскоп)

На протилежній частині зламу видно розкриту тріщину і рубці, що відходять від неї, що утворилися при розтині тріщини (рисунок 3.42).

На рисунку 3.43 спостерігаємо вм'ятину, розташовану на поверхні розкритої тріщини. Можливо, спочатку стався статичний надрив, а потім стало розвиватися втомне викришування (тобто руйнування йде з підповерхневого шару) (або втомне викришування розвивалося самостійно).

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

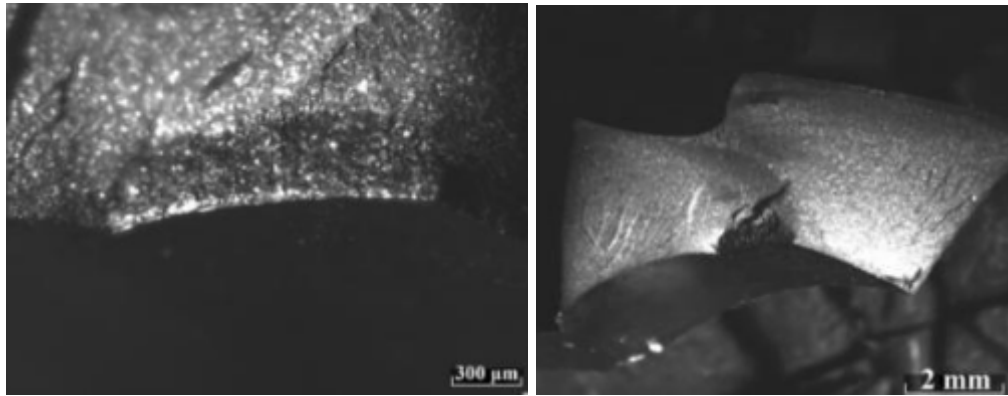


Рисунок 3.42 – Злам 2. Поверхня зовнішньої обойми підшипника № 7
(оптичний мікроскоп)

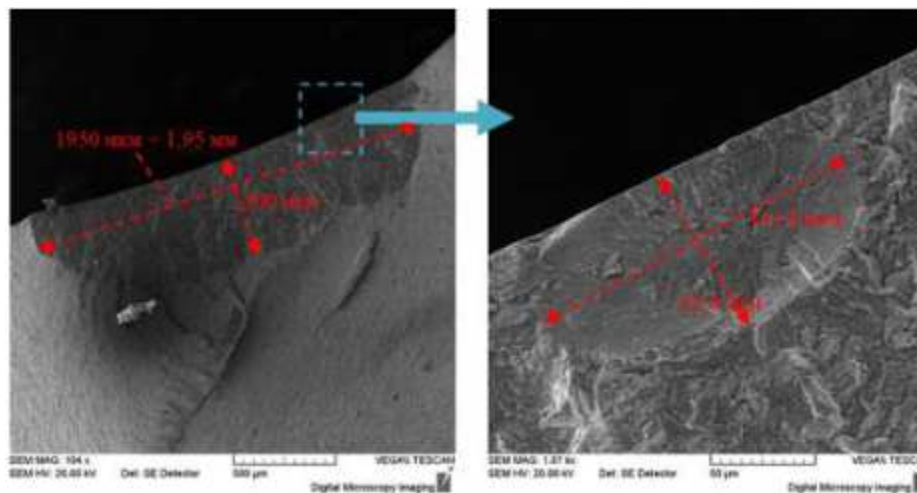


Рисунок 3.43 – Злам 1. Загальний вигляд вм'ятини на поверхні розкритої тріщини (скануючий електронний мікроскоп)

Можливий наступний механізм утворення вм'ятини. У процесі механічної обробки на робочих поверхнях утворюються мікронерівності. У місцях контакту тіл кочення з біговою доріжкою кільця під впливом навантаження виникають контактні напруження. Одночасно з дією навантаження на доріжках кочення відбувається ковзання контактуючих поверхонь, що супроводжується зминанням і відривом на них дрібних виступів. Ці частинки металу, потрапляючи між поверхнями, що обкатуються, утворюють мікроскопічні вм'ятини, в яких метал ущільнюється. Наклеп поверхні збільшується дією внутрішніх динамічних сил, що

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

виникають через неточності форми тіл кочення та профілю бігових доріжок кілець підшипника.

Подальше ущільнення металу створює сприятливі умови для початку втомного викришування і для виникнення втомної тріщини досить невеликого пошкодження поверхневого шару. Потім під дією повторних навантажень втомна тріщина швидко поширюється в товщу ущільненого металу. Початкова втомна тріщина може виникнути в результаті розтріскування металу на поверхні навколо глибокої вм'ятини, яка утворилася в результаті концентрації напружень у кутах розривів, утворених появою волокнистого металу при ковзанні без мастила або після тривалої роботи деталі.

Під час розгляду елементів вм'ятини лежить на поверхні розкритої тріщини спостерігаємо дрібні ямки (фасетка сколу), які свідчать про статичне навантаження (рисунок 3.44).

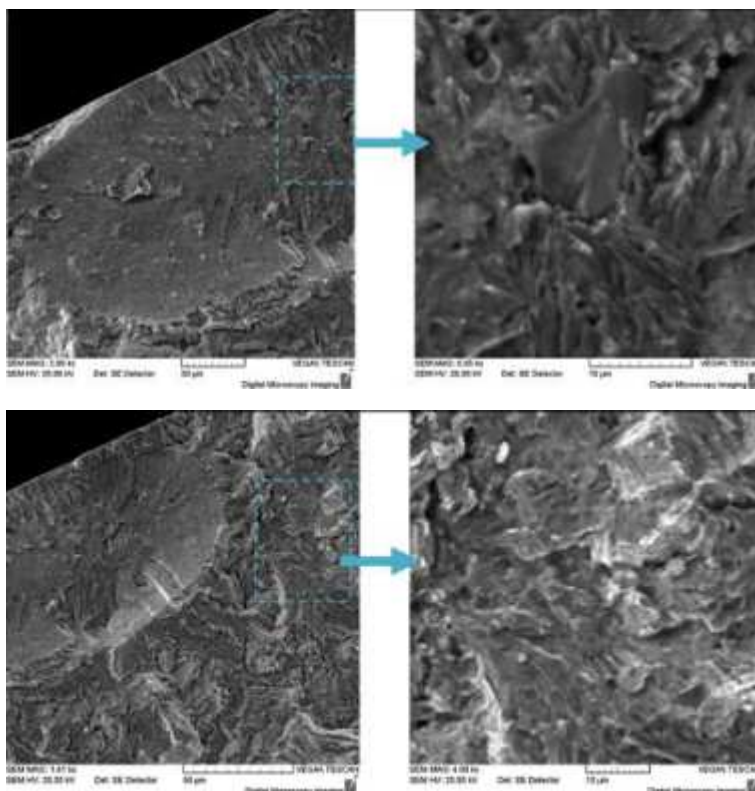


Рисунок 3.44 – Злам 1. Фрагмент вм'ятини на поверхні розкритої тріщини (скануючий електронний мікроскоп)

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

На рисунку 3.45 показано окислену поверхню. На рисунку 3.46 показано фрагмент панорами розкритої тріщини.

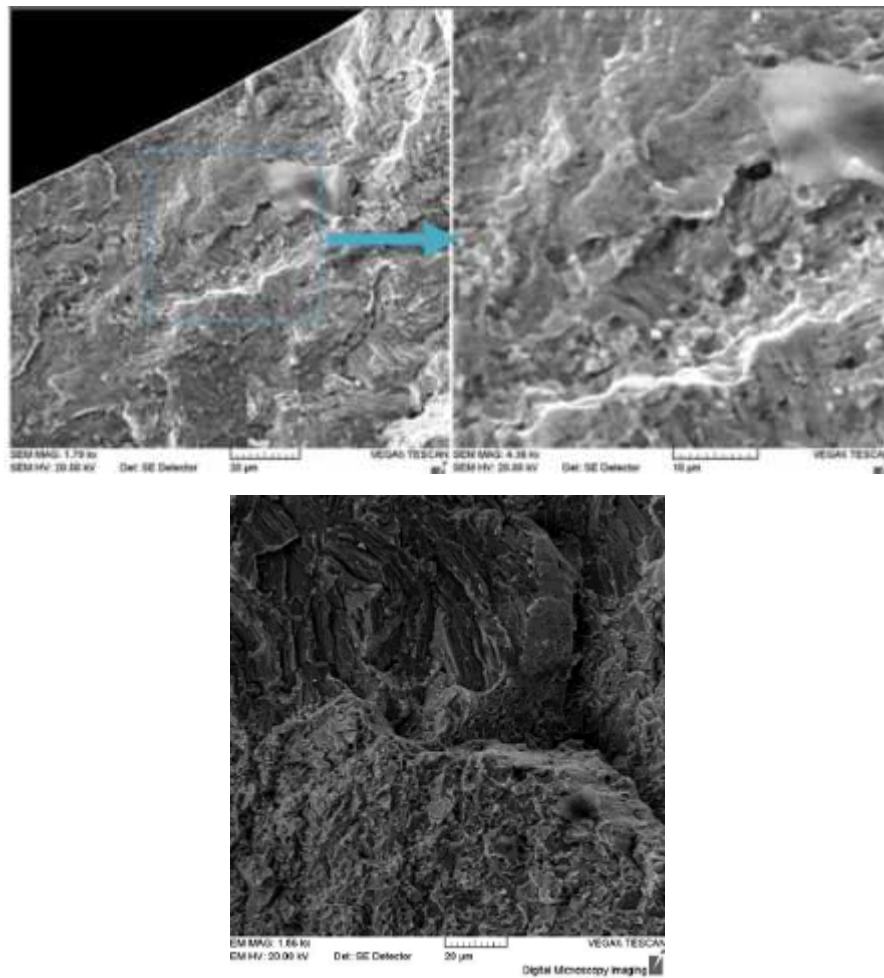


Рисунок 3.45 – Злам 1. Фрагмент панорами розкритої тріщини

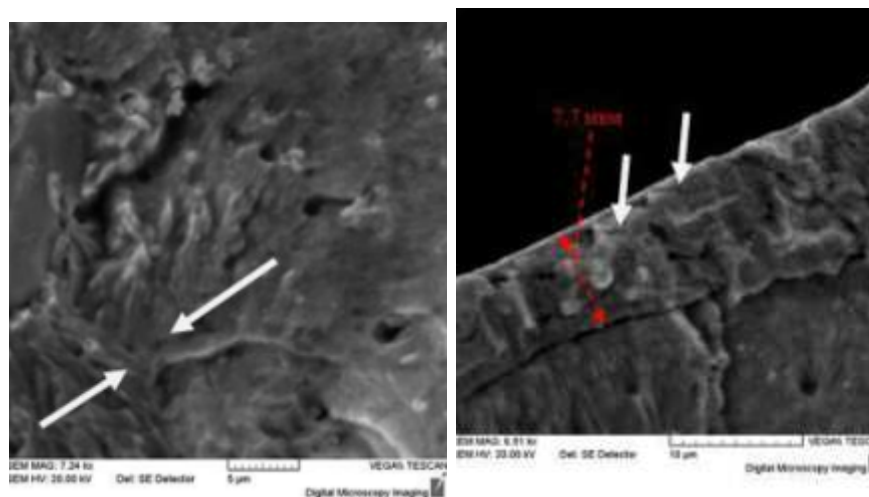


Рисунок 3.46 – Злам 1. Фрагмент панорами розкритої тріщини (стрілками показані тріщини)

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

У підповерхневому шарі спостерігаємо підповерхневі тріщини, які виникли внаслідок внутрішніх напружень (рисунок 3.47).

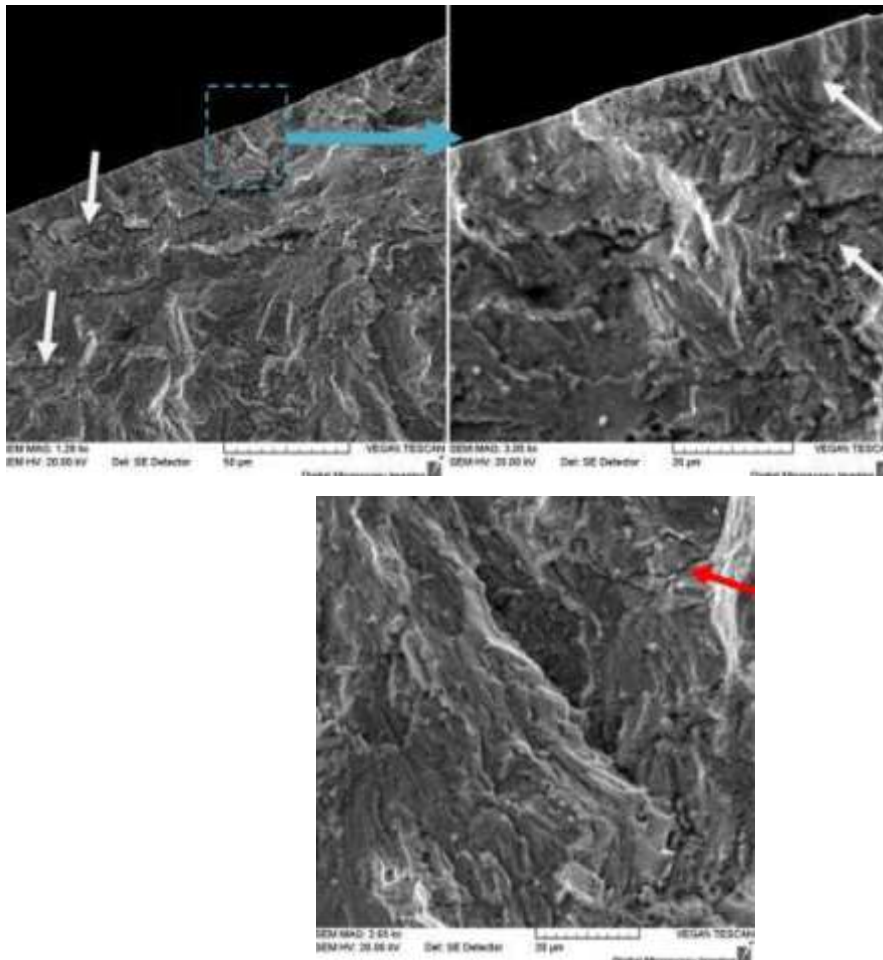
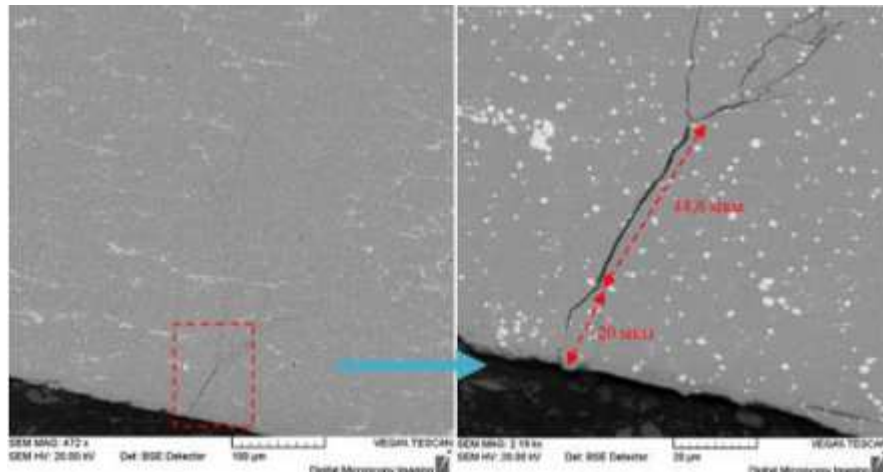


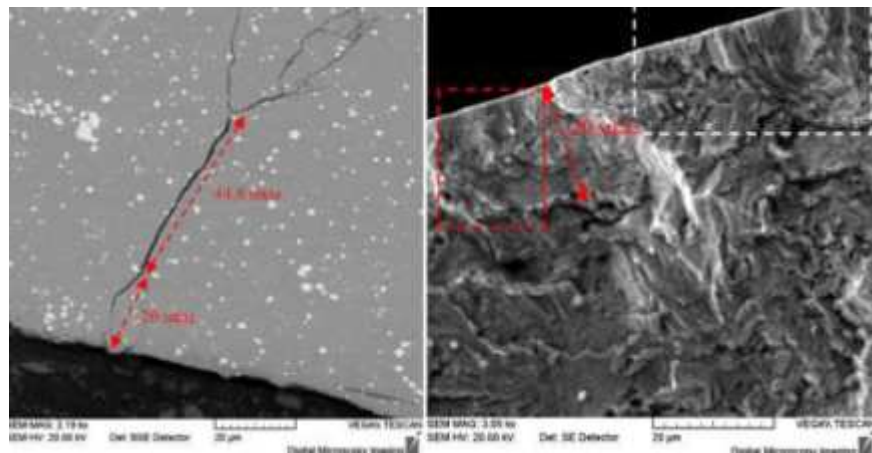
Рисунок 3.47 – Злам 1. Фрагмент панорами розкритої тріщини (стрілками показані підповерхневі тріщини)

На поперечному шліфі в районі викрашування виявлено множину тріщин, що розповсюджуються в поперечному напрямку до бігової доріжки (рисунок 3.48, 3.49). Тріщини – розкриті, деякі тріщини мають розкриття на глибині. Від цих тріщин на поверхню поширюються закриті тріщини. Такий вид тріщин свідчить про виникнення внутрішніх тріщин з подальшим розвитком у різні боки. Такі тріщини могли виникнути внаслідок напружень.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85



а)



б)

Рисунок 3.48 – Злам 1. Фрагмент панорами розкритої тріщини

Видно, що тріщина є підповерхневою (відкрита всередині, а на поверхню не виходить). Підповерхнева тріщина розвивається на глибину <20 мкм (рис. 3.48).

Зона втомного руйнування (пружно-пластичний механізм) позначена білою пунктирною лінією. Статичне руйнування позначено червоною пунктирною лінією. Частина тріщин поширюються від викришування (Рисунок 3.48), а частина не виходить на поверхню на даній досліджуваній ділянці (Рисунок 3.49).

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

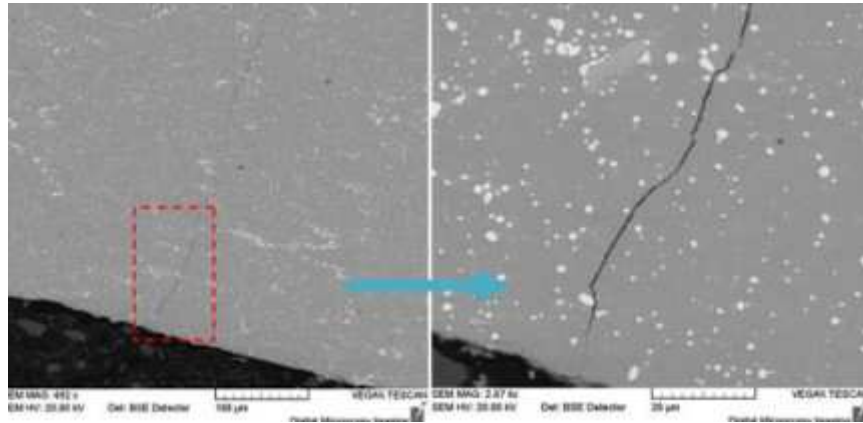


Рисунок 3.49 – Злам 1. Фрагмент панорами розкритої тріщини

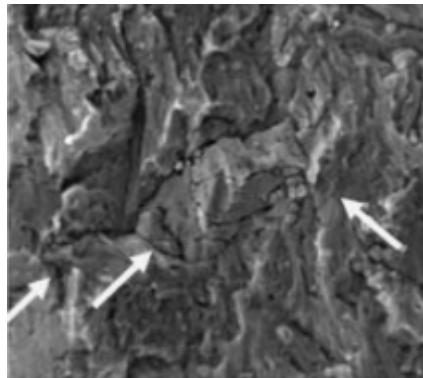


Рисунок 3.50 – Злам 1. Тріщини. Підтвердження малоциклової втоми

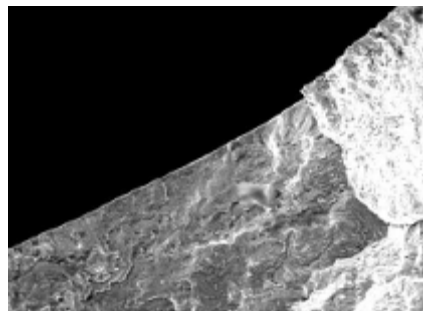
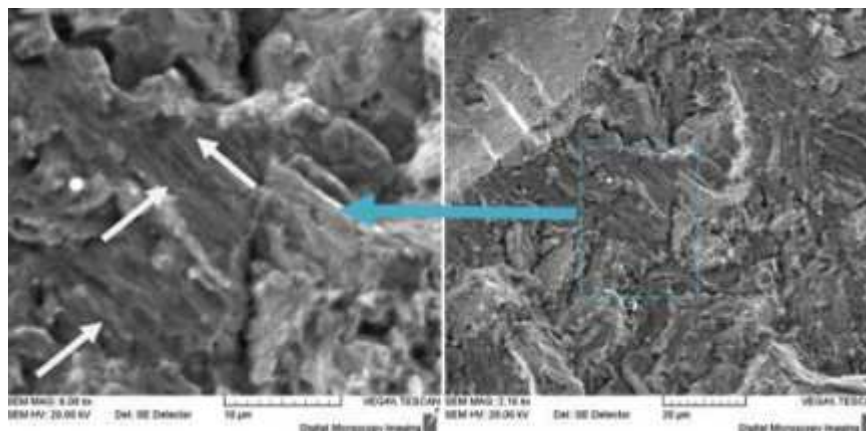


Рисунок 3.51 – Злам 1

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

Можливо, тріщини поширюються по зерну (рисунок 3.51 а). Видно ділянки з різним ступенем окислення, отже, розвиток тріщини протікало тривалий час (рисунок 3.51, б).

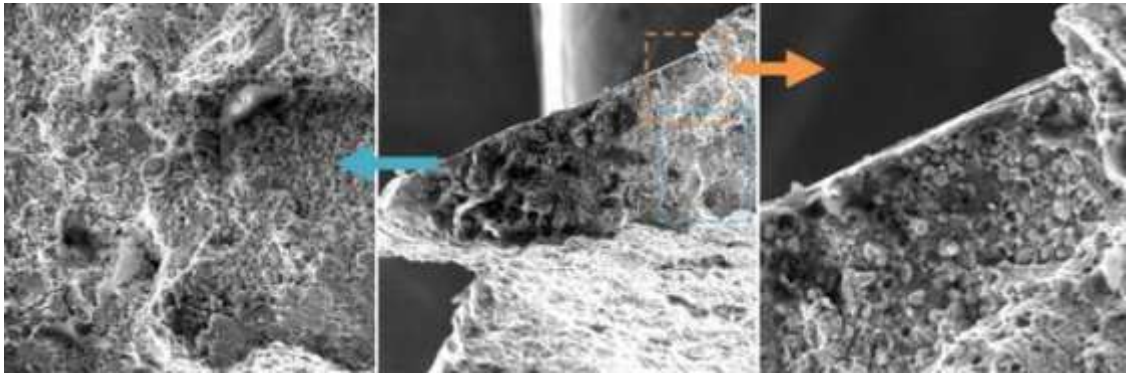


Рисунок 3.52 – Злам 2. Поверхня зовнішньої обойми підшипника № 7

Усередині вм'ятини видно карбіди. Нерівномірний розподіл карбідів свідчить про різний ступінь напруженості в ділянках металу (рис. 3.52).

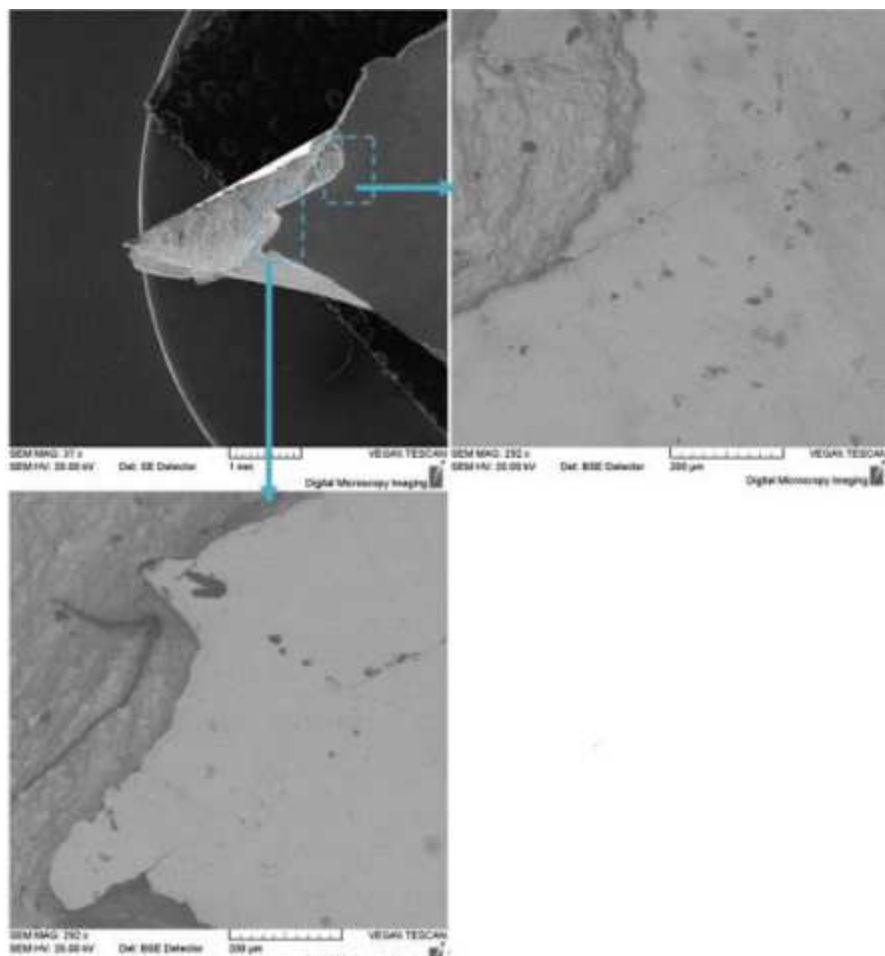


Рисунок 3.53 – Злам 2. Тріщина, що відходить від поверхні зламу

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

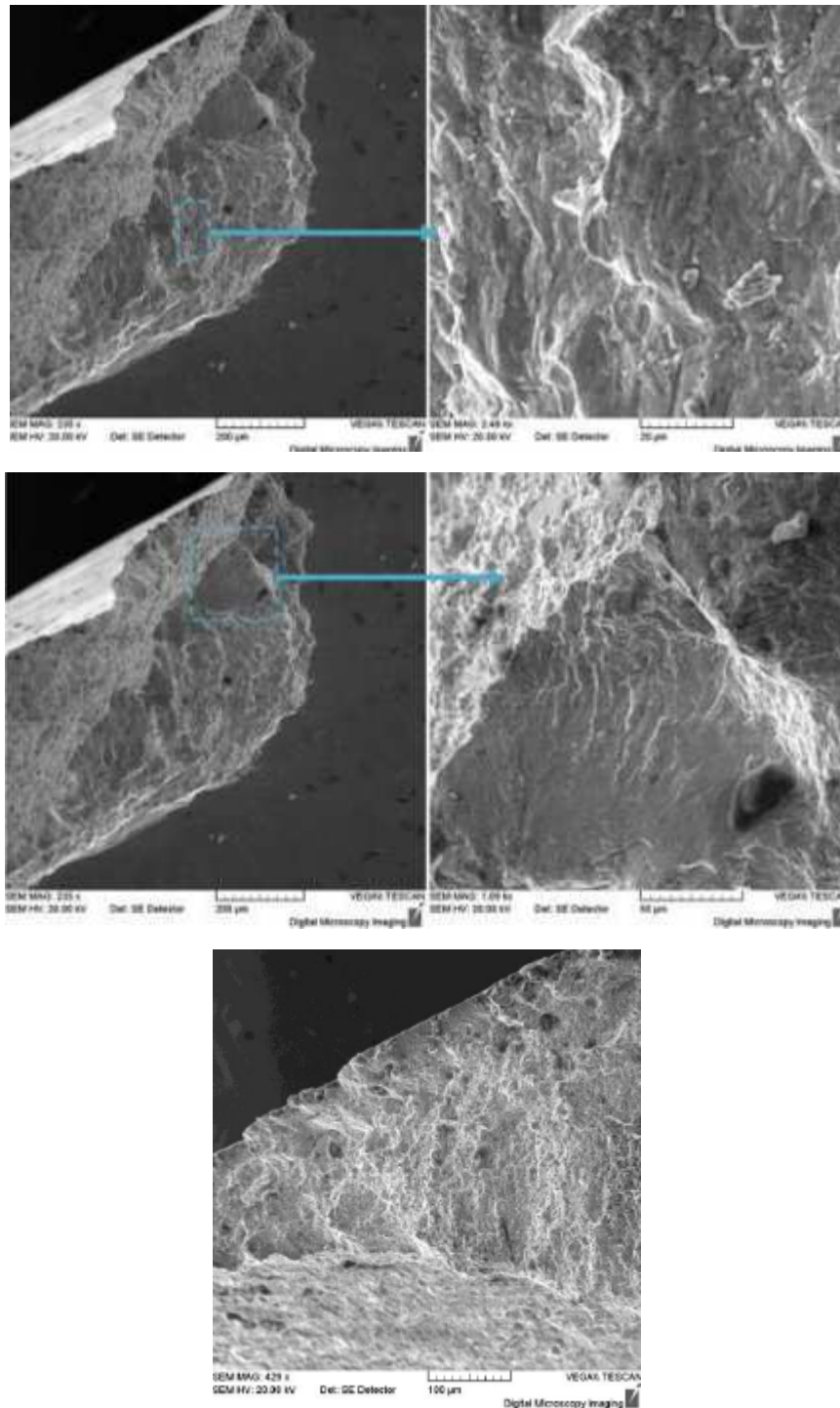


Рисунок 3.54 – Злам 2

Фрактографічними дослідженнями підтверджено статичний характер виникнення поперечної тріщини на біговій доріжці зовнішньої обойми підшипника №7.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

Основна частина зламу має рядкову, волокнисто-смушкову будову. Така будова пов'язана з неоднорідністю матеріалу та має технологічне походження на стадії гарячої пластичної деформації (ковки).

Також для зламу характерний вид з карбідними виділеннями. Наявність карбідних виділень, наявність характерних мікротріщин та фасеток квазисколу свідчать про стан поверхневого перенаклепу.

Обговорення результатів фрактографічних досліджень. Фрактографічними дослідженнями підтверджено статичний характер виникнення поперечної тріщини на біговій доріжці зовнішньої обойми підшипника.

Основна частина зламу має рядкову, волокнисто-смушкову будову. Така будова пов'язана з неоднорідністю матеріалу та має технологічне походження на стадії гарячої пластичної деформації (ковки).

Також для зламу характерний вид з карбідними виділеннями. Наявність карбідних виділень, наявність характерних мікротріщин та фасеток квазисколу свідчать про стан поверхневого перенаклепу.

Причинами утворення тріщини послужило зовнішнє навантаження, внаслідок перенаклепу поверхневого шару та виникнення високих поверхневих напружень стиснення. Крім того, виникненню тріщини могло сприяти високий вміст водню в поверхневому шарі та несприятлива рядкова будова матеріалу, що має технологічне походження.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки по третьому розділу

Наявність карбідних виділень та поздовжніх розшарування в поверхневому шарі зламу, а також наявність характерних мікротріщин і фасеток квазисколу свідчать про стан поверхневого перенаклепу. Перенаклеп підтверджується результатами аналізу мікроструктури і пов'язаний з наявністю високих стискаючих поверхневих залишкових напружень і внутрішньозеренним охрупчуванням.

У поперечному напрямку шліфу структура стали менш сприятливою, ніж у поздовжньому напрямку, що пов'язано з порушенням режимів термічної обробки. Зокрема порушення структури могла сприяти нерівномірній швидкості охолодження при термічній обробці. У процесі експлуатації підшипник розігрівається нерівномірно, що може призвести до порушення структури.

Стискаючі залишкові напруження сприяють підвищенню втомної міцності, що підтверджується виконаними експериментами. Залишкові напруження могли виникнути внаслідок наклепу поверхні, що підтверджується структурою поверхні зовнішньої обойми підшипника кочення.

Характер та розподіл напружень у підшипниках впливає на розподіл водню.

Водень розподілений нерівномірно і під дією різних факторів (градієнти концентрації та температур, різниця в розчинності водню в різних фазах та дефектах кристалічної будови ґрат, пластична та пружна деформація) може переміщатися у певні зони металу, створюючи в них підвищену концентрацію.

Наклеп також міг сприяти насиченню воднем підшипника кочення. При робочих температурах підшипника (140-150 °С) виділяється лише

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частина водню - дифузійно-рухливий водень. (При нагріванні розчинність водню підвищується, причому при температурах понад 250...400°C практично весь водень розчинений у ґратах металу). Але при цьому його дифузійна рухливість досить велика навіть за нормальних температур. Дослідження впливу вмісту водню показали, що саме д.р.п. негативно впливає на процес руйнування.

Схильність до водневої крихкості підтверджують і фрактографічні дослідження.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

ВИСНОВКИ

1. Зародження та розвиток втомної тріщини в обоймі підшипника при експлуатації відбувається при комплексній дії всіх виробничих факторів.

2. Аналіз отриманих експериментальних даних дозволяє вважати, що поява тріщини та розвиток втомного викришування пов'язаний з виникненням високих поверхневих залишкових напружень стиску при несприятливій рядковій будові матеріалу і нерівномірному розподілу карбідів, а також підвищеному вмісті водню.

3. Підвищена твердість наклепаного шару обойми підшипника робить її потенційною ділянкою руйнування під час експлуатації.

4. Аналіз поверхні зламів підтверджує наявність несприятливої рядкової (волокнуристо-смушкової) структури сталі, що має технологічне походження на стадії гарячої пластичної деформації. Слід зазначити, що розташування волокна під кутом $\sim 90^\circ$ до бігової доріжки є несприятливим і може негативно впливати на працездатність підшипника.

5. В результаті виконаної роботи було встановлено зв'язок між дифузійно-рухомим воднем і стискаючими залишковими напруженнями. Питання, що виникає раніше і сприяє подальшому розвитку дефектів, залишається відкритим.

6. Об'ємний водень є дефектом металургійного характеру. Вміст загального водню підвищено, але експериментами було виявлено, що саме дифузійно-рухливий водень негативно впливає на процес руйнування підшипника кочення. Його вміст утричі перевищує вміст дифузійно-рухомого водню у бездефектному підшипнику.

7. Виникнення стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі пов'язане з порушенням режимів термічної обробки.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що матеріал зовнішньої обойми підшипників у стані поставки мав підвищений вміст водню. Причиною цього, ймовірно, було порушення технології металургійного переділу сталі.

9. Незадовільна якість матеріалу деталей підшипника, недосконалість технології виготовлення чи складання, а також недотримання рекомендованих режимів та умов експлуатації підшипників у вузлі викликає прискорення втомного викришування металу деталей.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		94

РЕКОМЕНДАЦІЇ

Сталь для кілець підшипників та тіл кочення рекомендується проводити за технологіями вакуумування або вакуумної плавки для підтримки високого рівня чистоти та однорідності. Перед початком виготовлення компонентів підшипників всі матеріали повинні піддаватися металургійній, хімічній та механічній перевірці. Рекомендується налагодити ретельний контроль термічної обробки печач при використанні сучасних вакуумних печей, що мають досконалі термічні цикли, завдяки сучасним можливостям управління. Термічну обробку деталей підшипників кочення необхідно проводити на спеціалізованому устаткуванні, що забезпечує точну підтримку температури та виключає знеуглецювання поверхні.

Наявність попереднього ступеня відпалу при температурі близько 500 °С дає рівномірний розподіл карбідів. Також для рівномірнішого розподілу карбідів необхідно робити більш тривалу витримку. Крім того, рекомендується проводити гомогенізацію в процесі нагрівання для зменшення неоднорідності розподілу карбідів.

Не допускається порушення режимів термічної обробки. Температура перетину і швидкість охолодження підшипника повинні бути рівномірними. У процесі кування слід докласти більшу деформацію, щоб подрібнити первинні карбіди.

Чутливість до водневої крихкості залежить від режиму термічної обробки. Для зниження вмісту водню рекомендується проводити зневоднювальний відпуск.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hannon W M and Ai X 2013 Rolling bearing lubricants, in: Wang Q J and Chung Y - W (Eds.) Encyclopedia of Tribology (New York: Springer) pp 2848–56
2. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.bearing-news.com/the-five-most-common-causes-of-bearing-failure/>
3. Widner R L 1986 Failures of rolling-element bearings, in: ASM Handbook Volume 11, Failure Analysis and Prevention (Metals Park: ASM International) pp 490–513
4. Strecker, William. “Failure Analysis for Plain Bearings.” Machinery Lubrication magazine, July-August 2004. – pp 220-234
5. Strecker, William. “Troubleshooting Tilting Pad Thrust Bearings.” Machinery Lubrication magazine, March-April 2004. – pp 280-294
6. Berry, James. “Oil Whirl and Whip Instabilities within Journal Bearings.” Machinery Lubrication magazine, May-June 2005. – pp 112-123
7. Tribology Data Handbook. Chapter 61, Journal Bearing Design and Analysis. Khonsari, M. CRC Press, 1997. – pp 20-28
8. Robert Scott. «Journal Bearings and Their Lubrication». Machinery Lubrication magazine, July 2005. – pp. 56-61
9. B. M. Silayev B., Danilenko P. Method of calculating high-speed rolling bearings intended for an aircraft engine based on considering the wear process. Journal of Friction and Wear volume 36, pages 350–354 (2015)
10. Ebert, F.J. Fundamentals of Design and Technology of Rolling Element Bearings. Chin. J. Aeronaut. 2010, 23, 123–136.
11. Demirhan, N.; Kanber, B. Stress and displacement distributions on cylindrical roller bearing rings using FEM. Mech. Based Des. Struct. Mach. 2008, 36, 86–102.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

12. Zaretsky, E.V. Selection of rolling-element bearing steels for long-life applications. In Effect of Steel Manufacturing Processes on the Quality of Bearing Steels; Hoo, J.J.C., Ed.; ASTM STP 987; American Society for Testing and Materials: Philadelphia, PA, USA, 1988; pp. 5–43

13. Li, S.-X.; Su, Y.-S.; Shu, X.-D.; Chen, J.-J. Microstructural evolution in bearing steel under rolling contact fatigue. Wear 2017, 380–381, 146–153.

14. Sadeghi, F.; Jalalahmadi, B.; Slack, T.S.; Raje, N.; Arakere, N.K. A Review of Rolling Contact Fatigue. J. Tribol. 2009, 131, 041403

15. Dwivedi S., Manish Vishwakarma M. «Effect of hydrogen in advanced high strength steel materials». International Journal of Hydrogen Energy Volume 44, Issue 51, 22 October 2019, Pages 28007-28030

16. Ebihara K, Sekine D., Sakiyama Y., Takahashi J., Takai K., Omura T. «Numerical interpretation of thermal desorption spectra of hydrogen from high-carbon ferrite-austenite dual-phase steel» International Journal of Hydrogen Energy Volume 48, Issue 79, 15 September 2023, Pages 30949-30962

17. M. Wang, E. Akiyama, K. Tsuzaki. Hydrogen degradation of a boron-bearing steel with 1050 and 1300mpa strength levels. Scripta Mater, 52 (5) (2005), pp. 403-408,

18. Cundill R. Material Selection and Quality for Ceramic Rolling Elements. 4th International Symposium on Ceramic Materials and Components for Engines. - pp 905–912

19. Hansen, K.T.; Fæster, S.; Natarajan, A.; Mishin, O.V.; Danielsen, H.K.; Jensen, D.J.; Klit, P. Analysis of bearing steel exposed to rolling contact fatigue. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2017, 219, 012024.

20. Rycerz, P.; Olver, A.; Kadiric, A. Propagation of surface initiated rolling contact fatigue cracks in bearing steel. Int. J. Fatigue 2017, 97, 29–38.

21. Warda, B.; Chudzik, A. Fatigue life prediction of the radial roller bearing with the correction of roller generators. Int. J. Mech. Sci. 2014, 89, 299–310.

					MPMTBATAM 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

22. Upadhyay, R.K.; Kumaraswamidhas, L.A.; Azam, M.S. Rolling element bearing failure analysis: A case study. Case Stud. Eng. Fail. Anal. 2013, 1, 15–17.

23. Harada, H.; Mikami, T.; Shibata, M.; Sokai, D.; Yamamoto, A.; Tsubakino, H. Microstructural changes and crack initiation with white etching area formation under rolling/sliding contact in bearing steel. ISIJ Int. 2005, 45, pp. 1897–1902.

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		98

ДОДАТКИ

					МРМТВАТАМ 23.18038.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		99