

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра інженерії вагонів та якості продукції

РОЗРОБКА НОРМАТИЧНИХ ДОКУМЕНТІВ ДО АКРЕДИТАЦІЇ ВИПРОБУВАЛЬНОЇ  
ЛАБОРАТОРІЇ

Пояснювальна записка і розрахунки  
до магістерської кваліфікаційної роботи

МКРМЕ.175.26.4.00. ПЗ

Розробила студентка групи 217-ЯСС-324  
спеціальності 175 «Інформаційно-  
вимірювальні технології» освітньої програми  
«Якість, стандартизація та сертифікація»  
(робота виконано самостійно, відповідно до  
принципів академічної доброчесності)

 Світлана ГЛАДКА

Керівник: професор, д-р техн. наук  
Ларіса ТИМОФЕЄВА

Рецензент: доцент кафедри  
машинобудування та технічний сервіс машин  
УкрДУЗТ, канд. техн. наук  
Андрій БАБЕНКО

# Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний

Кафедра інженерії вагонів та якості продукції

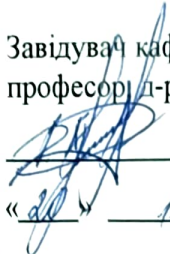
Другий (магістерський) рівень вищої освіти

Спеціальність – 175 «Інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітня програма – «Якість, стандартизація, сертифікація»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,  
професор, д-р техн. наук

 В. Г. Равлюк

« 20 » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гладкої Світлани Олександрівни

1 Тема «Розробка нормативних документів до акредитації випробувальної лабораторії».

керівник Тимофеева Ларіса Андріївна, професор, д-р техн. наук

затверджені наказом по механіко-енергетичному факультету від

“ ” 2025 року № \_\_\_\_\_.

2 Строк подання студентом закінченої роботи «28» грудня 2025 року.

3. Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи отримати під час проходження переддипломної практики на підприємстві технічного профілю, що здійснює експлуатацію техніки та проводить експлуатаційні дослідження її технічного стану й робочих параметрів. У процесі практики студент повинен зібрати фактичні дані, необхідні для аналізу вимірювальних процесів і оцінювання стану техніки в реальних умовах експлуатації.

4. Під час проходження переддипломної практики необхідно ознайомитися з організаційною структурою підприємства, функціональними обов'язками його підрозділів, умовами та режимами експлуатації техніки, а також із внутрішньою технічною, технологічною та нормативно-методичною документацією у сфері вимірювання експлуатаційних параметрів. Студент повинен вивчити нормативно-правову та стандартну базу з метрологічного забезпечення вимірювань, проаналізувати застосовувані методи та засоби вимірювання, а також чинну практику організації вимірювального контролю й забезпечення точності та достовірності результатів у процесі експлуатаційних досліджень.

5. На основі зібраних матеріалів необхідно сформулювати методичний підхід до удосконалення методів і засобів вимірювання техніки при експлуатаційних дослідженнях, виконати аналіз застосовуваних вимірювальних методик і засобів, визначити основні проблемні аспекти вимірювального контролю та обґрунтувати напрями їх удосконалення.

6 Перелік графічного матеріалу:  
Графічний матеріал виконати у вигляді презентації (обсяг 15-20 слайдів).

7 Дата видачі завдання «24» лютого 2025 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи                                                                                   | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1. Ознайомлення з діяльністю підприємства та технічною документацією у сфері ремонту і відновлення пар тертя.                       | 26.02 - 02.03                 | виконано |
| 2. Аналіз нормативно-правової та стандартної бази метрологічного забезпечення вимірювань при ремонті пар тертя.                     | 03.03 – 13.04                 | виконано |
| 3. Дослідження методів і засобів вимірювання геометричних і мікрогеометричних параметрів пар тертя та оцінювання їх точності.       | 14.04 – 10.06                 | виконано |
| 4. Аналіз системи вимірювального контролю технічного стану деталей пар тертя у процесі ремонтно-відновлювальних робіт.              | 11.06 – 03.07                 | виконано |
| 5. Обґрунтування та розроблення удосконалених методів і засобів вимірювання для підвищення точності контролю при ремонті пар тертя. | 04.07 – 01.09                 | виконано |
| 6. Оцінка економічної та організаційної ефективності впровадження запропонованих рішень у ремонтному виробництві.                   | 02.09 – 05.10                 | виконано |
| 7. Розробка та оформлення слайдів                                                                                                   | 06.10 - 16.11                 | виконано |
| 8. Отримання рецензії на МКР                                                                                                        | 01.12.25                      | виконано |
| 9. Захист МКР в ДЕК                                                                                                                 | 15.01.26                      |          |

Студентка  Світлана ГЛАДКА

Керівник  Лариса ТИМОФЕЄВА

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота включає 15 слайдів презентації та 105 аркушів пояснювальної записки формату А4.

Ключові слова: пари тертя, ремонт деталей, вимірювальні процеси, засоби вимірювання, метрологічне забезпечення, точність вимірювань, невизначеність, якість ремонту, надійність машин.

Об'єктом дослідження є пари тертя машин і механізмів у процесі їх ремонту та відновлення як об'єкти вимірювального контролю.

Предметом дослідження є методи, засоби та організаційно-методичні підходи до вимірювання геометричних, мікрогеометричних і функціональних параметрів пар тертя під час ремонтно-відновлювальних робіт.

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування та розроблення напрямів удосконалення точності вимірювання при ремонті пар тертя з метою підвищення достовірності результатів контролю, зниження метрологічних ризиків, підвищення якості ремонту та збільшення ресурсу відновлених вузлів машин і механізмів.

У роботі проаналізовано теоретичні та нормативно-методичні засади вимірювального контролю при ремонті пар тертя, розглянуто вимоги національних і міжнародних стандартів у сфері метрології, технічного контролю та управління якістю. Проведено аналіз чинних методів і засобів вимірювання параметрів пар тертя, особливостей організації вимірювальних процесів у ремонтному виробництві та виявлено основні проблемні аспекти, що знижують точність вимірювань і якість ремонтно-відновлювальних робіт.

Розроблено практичні рекомендації щодо удосконалення методів і засобів вимірювання при ремонті пар тертя, які передбачають застосування сучасних високоточних вимірювальних приладів, удосконалення методик вимірювання, стандартизацію умов проведення контролю та впровадження елементів автоматизованого збору й обробки результатів вимірювань. Виконано оцінку технічної, економічної та організаційної ефективності запропонованих заходів, а також розглянуто питання охорони праці та безпеки під час виконання вимірювальних робіт у процесі ремонту пар тертя.

## **ABSTRACT**

The qualification work includes 15 presentation slides and 105 pages of explanatory notes in A4 format.

Keywords: friction pairs, component repair, measurement processes, measuring instruments, metrological support, measurement accuracy, uncertainty, repair quality, machine reliability.

The object of the study is friction pairs of machines and mechanisms during repair and restoration processes as objects of measurement control.

The subject of the study is methods, measuring instruments, and organizational and methodological approaches to measuring geometric, microgeometric, and functional parameters of friction pairs during repair operations.

The purpose of the qualification work is to substantiate and develop directions for improving measurement accuracy during friction pair repair in order to increase the reliability of measurement results, reduce metrological risks, improve repair quality, and extend the service life of restored machine components.

The work analyzes theoretical and regulatory foundations of measurement control in friction pair repair, as well as national and international standards in the field of metrology, technical control, and quality management. Existing measurement methods and instruments used in repair production are analyzed, and key factors that reduce measurement accuracy and repair quality are identified.

Practical recommendations for improving measurement methods and instruments during friction pair repair are developed, including the use of modern high-precision measuring instruments, improved measurement methodologies, standardized measurement conditions, and implementation of automated data acquisition and processing. The technical, economic, and organizational efficiency of the proposed measures is evaluated, and occupational health and safety issues during repair-related measurements are considered.

## Зміст

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ                                                                                                        | 8  |
| 1 Теоретичні основи контролю та вимірювань під час ремонту пар тертя                                         | 11 |
| 1.1. Сутність, роль та значення вимірювань при ремонті пар тертя                                             | 11 |
| 1.2. Нормативно-метрологічні вимоги та стандарти, що регламентують точність вимірювань при ремонті пар тертя | 14 |
| 1.3. Фактори, що впливають на точність вимірювань при ремонті пар тертя, та їхній науково-технічний аналіз   | 17 |
| 1.4. Вплив точності вимірювань на якість ремонту пар тертя                                                   | 21 |
| 1.5. Похибки та невизначеність вимірювань при ремонті пар тертя                                              | 24 |
| 1.6. Обґрунтування необхідності удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя                      | 27 |
| 1.7. Шляхи підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя                                              | 30 |
| Висновки до розділу 1                                                                                        | 34 |
| 2 Аналіз методів і засобів вимірювання при ремонті пар тертя                                                 | 36 |
| 2.1. Характеристика пар тертя як об'єктів вимірювання при ремонтно-відновлювальних роботах                   | 36 |
| 2.2. Аналіз існуючих методів вимірювання геометричних параметрів пар тертя                                   | 39 |
| 2.3. Аналіз методів вимірювання параметрів мікрогеометрії та зношування поверхонь пар тертя                  | 43 |
| 2.4. Аналіз похибок та невизначеності вимірювань при ремонті пар тертя                                       | 47 |
| 2.5. Аналіз організації вимірювального контролю при ремонті пар тертя                                        | 51 |
| Висновки до розділу 2                                                                                        | 54 |
| 3 Розроблення заходів з удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя                              | 56 |

|           |           |          |                                                                                     |          |  |                       |         |       |
|-----------|-----------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|--|-----------------------|---------|-------|
|           |           |          |                                                                                     |          |  | МКРМЕ.175.26.4.00, ПЗ |         |       |
| Зм        | Аркуш     | № докум. | Підпис                                                                              | Дата     |  |                       |         |       |
| Розробив  | Гладка    |          |  | 20.08.25 |  |                       | Літер   | Аркуш |
| Перевірив | Тимофєєва |          |  | 20.08.25 |  |                       |         | 4     |
| Реценз.   | Бабенко   |          |  |          |  |                       |         | 90    |
| Н. контр. | Шовкун    |          |  | 29.08.26 |  |                       | УкрДУЗТ |       |
| Затв.     | Равлюк    |          |  | 22.09.26 |  |                       |         |       |

|                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Обґрунтування напрямів удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя                                               | 56  |
| 3.2. Удосконалення засобів вимірювання при ремонті пар тертя                                                                      | 60  |
| 3.3. Удосконалення методик вимірювання при ремонті пар тертя                                                                      | 64  |
| 3.4. Удосконалення організації вимірювального контролю при ремонті пар тертя                                                      | 68  |
| 3.5. Оцінювання ефективності запропонованих заходів з підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя                        | 72  |
| 3.6. Забезпечення стабільності та простежуваності результатів вимірювань при ремонті пар тертя                                    | 76  |
| Висновки до розділу 3                                                                                                             | 80  |
| 4 Охорона праці та безпека виробничої діяльності                                                                                  | 82  |
| 4.1. Аналіз умов праці та небезпечних і шкідливих виробничих факторів при виконанні вимірювальних робіт під час ремонту пар тертя | 82  |
| 4.2. Заходи з охорони праці та безпеки при виконанні вимірювальних робіт під час ремонту пар тертя                                | 85  |
| 4.3. Пожежна та електробезпека під час виконання вимірювальних робіт при ремонті пар тертя                                        | 90  |
| 4.4. Санітарно-гігієнічні вимоги, мікроклімат і ергономіка робочих місць при виконанні вимірювальних робіт                        | 94  |
| Висновки до розділу 4                                                                                                             | 98  |
| Загальні висновки                                                                                                                 | 100 |
| Список використаних джерел                                                                                                        | 102 |

|    |       |          |        |      |                       |
|----|-------|----------|--------|------|-----------------------|
|    |       |          |        |      | МКРМЕ.175.26.4.00. ПЗ |
|    |       |          |        |      |                       |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                       |

## Вступ

Сучасні машинобудівні системи, транспортні засоби, аграрна та промислова техніка містять велику кількість пар тертя, які забезпечують перетворення, передачу та регулювання механічної енергії. Саме ці вузли визначають плавність руху механізмів, їх ресурс, надійність і здатність працювати під високими навантаженнями в агресивних умовах. Під час експлуатації на деталі пар тертя — вали, втулки, підшипникові посадки, шліцьові з'єднання, шийки валів, направляючі — постійно діють сили тертя, контактні напруження, температурні впливи і динамічні навантаження. Унаслідок цього відбувається поступове спрацювання поверхонь, зміна геометрії, зростання зазорів і, відповідно, погіршення технічних характеристик. Тому ремонт пар тертя є критично важливим етапом підтримання працездатності машин та механізмів.

Основною передумовою якісного ремонту є точне вимірювання геометричних параметрів деталей, їх форми, відхилень, шорсткості та взаємного розташування поверхонь. Без точних вимірювань неможливо об'єктивно оцінити реальний стан деталей, встановити ступінь їх зношування, визначити можливість відновлення або заміни, а також забезпечити правильний вибір технологічних рішень — наплавлення, напилення, хонінгування, розточування, шліфування, припасування чи встановлення ремонтних розмірів. Саме тому точність вимірювання у процесі ремонту пар тертя є базовим чинником, що визначає якість і довговічність відновлених вузлів.

В умовах сучасного машинобудування вимірювання деталей пар тертя мають виконуватися з урахуванням високих вимог до допусків, що нерідко становлять кілька сотих або навіть тисячних міліметра. Це вимагає застосування високоточних засобів контролю — внутрішніх і зовнішніх мікрометрів, нутромірів, індикаторних головок, багатоточкових і оптичних

систем, координатно-вимірювальних машин, а також новітніх цифрових приладів. Проте практична діяльність ремонтних підрозділів показує, що навіть наявність сучасних засобів вимірювання не гарантує високої точності, якщо не враховані впливи людського фактора, умов навколишнього середовища, конструкційних особливостей деталей та методичних похибок.

У реальному виробничому середовищі процес вимірювання при ремонті пар тертя ускладнюється низкою факторів: нерівномірним спрацюванням поверхонь, деформацією деталей унаслідок навантажень, наявністю дефектів геометричної форми (овальності, конусності, вигину), температурними впливами, неточністю базування деталі під час вимірювання, а також похибками, що виникають через недосконалість вимірювального інструменту чи неправильний вибір баз. Усе це призводить до суттєвих відхилень у результатах вимірювання, що згодом може спричинити неправильний вибір способу ремонту або помилки при відновленні розмірів.

Проблема підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя є комплексною, оскільки включає оптимізацію методів контролю, вдосконалення вимірювальних засобів, розроблення раціональних технологічних схем базування, підвищення кваліфікації персоналу та впровадження цифрових технологій обробки вимірювальних даних. Значного поширення набувають контактні та безконтактні інформаційні системи, що працюють на основі лазерних, акустичних, оптичних та комбінованих принципів. Упровадження таких технологій дозволяє мінімізувати похибки, підвищити стабільність результатів вимірювань і знизити залежність процесу контролю від людського фактора.

Важливим аспектом є те, що точні вимірювання дозволяють правильно оцінити ступінь зношування та визначити найбільш оптимальний спосіб ремонту — відновлення посадкових місць за допомогою

наплавлення, застосування ремонтних розмірів, встановлення нових втулок, напилення антифрикційних покриттів, геометричну корекцію деталей або повну заміну вузла. Це значно впливає на економічні показники підприємства: зменшує витрати на ремонт, скорочує простой обладнання, підвищує ресурс відновлених вузлів та забезпечує стабільність їхньої роботи протягом усього міжремонтного циклу.

Сучасні тенденції розвитку ремонтних технологій пов'язані з упровадженням цифрових методів контролю, зокрема 3D-сканування, машинного аналізу поверхонь, оптико-цифрових датчиків, автоматизованих вимірювальних систем та програмного забезпечення для побудови математичних моделей зношування. Використання цифрових технологій забезпечує не лише високу точність визначення геометрії, але й дозволяє аналізувати характер зношування, визначати невидимі дефекти та прогнозувати подальший розвиток пошкоджень.

Об'єктом дослідження в роботі є процес вимірювання геометричних параметрів деталей пар тертя в умовах їхнього ремонту. Предметом дослідження — методи та засоби підвищення точності вимірювання при відновленні посадкових місць і поверхонь тертя.

Метою роботи є розроблення та обґрунтування удосконалених методів підвищення точності вимірювань у процесі ремонту пар тертя з урахуванням впливу конструкційних, технологічних та експлуатаційних факторів.

- Для досягнення мети передбачено:
- аналіз сучасних методів контролю геометричних параметрів деталей пар тертя;
  - визначення основних джерел похибок та факторів впливу;
  - оцінка ефективності засобів вимірювання, що застосовуються при ремонті;
  - розроблення заходів щодо підвищення точності вимірювань;
  - обґрунтування раціональних схем базування і технологічних прийомів;

– визначення економічної доцільності впровадження запропонованих рішень.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні закономірностей впливу похибок вимірювань на якість ремонту пар тертя та розробленні алгоритмів підвищення точності контролю, які враховують реальні умови ремонтного процесу.

Практичне значення полягає у можливості застосування запропонованих рішень у ремонтних підрозділах підприємств машинобудівного, транспортного та аграрного профілю для підвищення ресурсу техніки, мінімізації браку та оптимізації ремонтних технологій.

Структура роботи включає вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел та додатки.

## 1. Теоретичні основи контролю та вимірювань під час ремонту пар тертя

### 1.1. Сутність, роль та значення вимірювань при ремонті пар тертя

Пари тертя у машинобудівних конструкціях є одними з найбільш відповідальних елементів, від яких залежить працездатність, надійність, ефективність та довговічність роботи техніки. У процесі експлуатації машини вони постійно зазнають складних механічних, динамічних, теплових та хімічних навантажень, що призводить до поступового спрацювання поверхонь, зміни їх геометрії, збільшення зазорів та погіршення контактних характеристик. Ремонт пар тертя має на меті відновлення їх первинної геометрії, параметрів взаємодії та функціональних властивостей. Ключовою умовою цього процесу є точність вимірювання як вихідного стану деталей, так і результатів ремонтно-відновлювальних операцій.

Вимірювання при ремонті пар тертя виконують роль фундаментального інформаційного інструмента, який визначає правильність технологічних рішень і якість кінцевого результату. Без достовірної інформації про фактичні розміри, форми, ступінь зношування, характер дефектів та особливості спрацювання поверхонь неможливо вибрати оптимальний метод ремонту – розточування, шліфування, хонінгування, наплавлення, напилення чи встановлення ремонтних розмірів. Точність вимірювань формує основу для проєктування ремонтних технологій, вибору припусків на оброблення, забезпечення правильного базування деталей та контролю параметрів після виконання технологічних операцій.

Особливість вимірювань у парах тертя полягає у складності реальних геометричних відхилень, що виникають у процесі експлуатації. У

відновлюваних деталях спостерігаються явища овальності, конусності, бочкоподібності, еліптичності та локальних вибоїн, які значно ускладнюють точну оцінку їхнього стану. Поверхні, що працюють у важких умовах, часто не мають правильної геометричної форми, тому просте вимірювання діаметра або довжини не дає повної картини. Вимірювальна система повинна виявляти як середні, так і локальні відхилення, враховувати нерівномірність спрацювання та визначати критичні зони, де знос перевищує допустимі межі.

Важливу роль відіграють системні похибки, зумовлені впливом зовнішніх умов. У ремонтних цехах температура, вологість, забрудненість повітря, стан вимірювальних поверхонь та стабільність базування часто не відповідають лабораторним умовам, що створює додаткові труднощі під час вимірювань. Відсутність стабільного мікроклімату може призвести до температурних деформацій деталей, зміни чутливості приладів та спотворення результатів. Тому точність вимірювань у ремонтному середовищі значною мірою залежить від організації робочого місця, правильного вибору засобів вимірювання, попередньої стабілізації деталей та професійного досвіду персоналу.

Не менш важливим аспектом є вплив людського фактора. Помилки, пов'язані з неправильним прикладанням вимірювального інструмента, невірним вибором баз, некоректним зчитуванням показів, недостатнім притискним зусиллям або, навпаки, надмірним тиском, є поширеними причинами неточностей. Розвиток цифрових вимірювальних приладів частково зменшує цей вплив, проте повністю виключити можливість операторської помилки неможливо. Тому сучасні тенденції спрямовані на автоматизацію вимірювальних процесів, використання датчиків з електронними індикаторами, цифрових нутромірів, координатно-вимірювальних машин та оптичних методів контролю.

У контексті ремонту пар тертя важливим є взаємозв'язок між точністю вимірювань і ресурсом відновленого вузла. Якщо вимірювання виконано неточно, навіть невеликі геометричні відхилення можуть призвести до нерівномірного розподілу навантажень, локального перегріву, зростання контактних напружень і прискореного зносу. У підшипникових посадках, шліцевих з'єднаннях, сферичних опорах або направляючих неправильний контроль розмірів може суттєво скоротити міжремонтний ресурс і призвести до повторного виходу вузла з ладу. Таким чином, точність вимірювань є одним із визначальних факторів якості ремонту.

Технічний прогрес у галузі вимірювальних технологій привів до появи широкого спектра засобів контролю, що дозволяють значно підвищити точність і надійність вимірювань. До таких засобів належать лазерні сканери, фотограмметричні системи, 3D-оптичні пристрої, інтерференційні установки, ультразвукові вимірювальні комплекси та координатно-вимірювальні машини. Вони забезпечують можливість визначення тривимірної геометрії деталей з високою точністю, дозволяють швидко оцінювати складні поверхні та створювати математичні моделі зношування. Упровадження цифрових методів аналізу різко підвищує інформативність вимірювань і сприяє прийняттю більш точних технологічних рішень.

З огляду на зазначене, вимірювання при ремонті пар тертя є ключовим етапом відновлювального процесу, який визначає структурну точність деталей, контактні параметри та подальшу працездатність вузлів. Удосконалення методів і засобів вимірювання сприяє зменшенню похибок, підвищенню якості ремонту, збільшенню ресурсу машин та зниженню експлуатаційних витрат. Тому дослідження у цьому напрямі мають важливе наукове та практичне значення та є актуальним завданням для ремонтних підрозділів машинобудівних, транспортних і аграрних підприємств.

## 1.2. Нормативно-метрологічні вимоги та стандарти, що регламентують точність вимірювань при ремонті пар тертя

Точність вимірювань при ремонті пар тертя визначається не лише конструктивними особливостями деталей чи застосованими засобами контролю, але й нормативно-метрологічними вимогами, які визначають допустимі відхилення, методи оцінювання похибок, правила калібрування вимірювальних приладів та принципи забезпечення єдності вимірювань. Нормативна база має фундаментальне значення, оскільки саме вона встановлює вимоги до точності, повторюваності й простежуваності вимірювань, що гарантує відтворюваність результатів і забезпечує високу якість ремонтно-відновлювальних операцій.

У ремонті пар тертя метрологічні вимоги визначаються низкою міжнародних, національних і галузевих стандартів. Першочергове місце посідає Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність», який встановлює систему організації вимірювань, визначає правила експлуатації засобів вимірювальної техніки, вимоги до їх повірки та калібрування, а також порядок забезпечення простежуваності результатів до державних еталонів. Для ремонтних підприємств це означає, що будь-який прилад, застосований для контролю геометричних параметрів деталей пар тертя, має бути повіреним, мати підтверджені метрологічні характеристики та пройти калібрування у встановлені терміни.

Особливе значення мають вимоги стандартів ISO та ДСТУ, гармонізованих з міжнародними нормами. Стандарти ISO 9001 та ISO 10012 визначають принципи управління вимірювальними процесами, включаючи планування калібрувань, контроль метрологічних характеристик засобів вимірювання, оцінювання невизначеності результатів та документування вимірювальних процедур. У контексті ремонту пар тертя це забезпечує

системний підхід до вимірювань і підвищує довіру до отриманих даних, що є критичним для відновлення високоточних контактних поверхонь.

Особливу увагу слід приділити стандартам ISO/IEC 17025, які регламентують компетентність вимірювальних лабораторій. Хоча ремонтні підприємства не завжди мають сертифіковані лабораторії у формальному сенсі, принципи ISO/IEC 17025 визначають загальні вимоги до точності й достовірності вимірювань: від правильного вибору методик і засобів контролю до аналізу факторів, що впливають на похибку. Для відновлення пар тертя ці вимоги є надзвичайно важливими, адже ремонт передбачає роботу з мінімальними допусками, високими класами точності та необхідністю забезпечення геометричної сумісності поверхонь.

Окрему групу нормативів становлять стандарти, що регламентують геометричні параметри деталей, допуски й посадки. Система допусків і посадок ISO (раніше ГОСТ) визначає допустимі значення розмірних відхилень, що забезпечують працездатність пар тертя після ремонту. Наприклад, посадки H7/g6, H8/f7 або P7/m6 застосовуються у втулкових, підшипникових або валових з'єднаннях залежно від функціонального призначення вузла. Стандарти на шорсткість поверхні визначають допустимі параметри Ra, Rz, які мають бути забезпечені після механічної обробки. Правильне дотримання цих нормативів неможливе без високоточного вимірювального контролю, тому стандарти допусків прямо пов'язані з нормативами метрології.

Важливим аспектом є вимоги до контролю форми та просторових відхилень. Нормативні документи встановлюють допустимі значення овальності, конусності, вигину, биття, непаралельності та осевого зміщення. При ремонті пар тертя ці параметри мають визначальне значення, оскільки навіть мінімальні відхилення від геометричної точності призводять до нерівномірного зносу, зростання температури в зоні контакту та передчасного руйнування вузла. Стандарти визначають не лише величини

допустимих відхилень, але й методики їх вимірювання, що потребує застосування нутромірів високої точності, індикаторних головок, калібрів, оптичних та лазерних систем контролю.

Метрологічні вимоги також стосуються повторюваності й відтворюваності вимірювань. Для того щоб результати вимірювання при ремонті були достовірними, методики повинні забезпечувати можливість повторного отримання однакових значень як одним виконавцем, так і різними операторами у різний час. Це особливо важливо при контролі пар тертя, де часто вирішальну роль відіграють соті долі міліметра, і будь-яке відхилення може вплинути на правильність вибору ремонтного розміру.

Нормативні документи також регламентують умови проведення вимірювань. Температура, вологість, чистота робочого середовища, стан контактних поверхонь приладів та деталей — усе це має бути враховано під час вимірювань. Стандарти визначають допустимі межі температури, вплив якої може призводити до деформацій деталей або змін у метрологічних характеристиках приладів. Для ремонтних цехів, де температура часто нестабільна, дотримання цих вимог є критично важливим і потребує ретельної підготовки деталей перед контролем.

Питання калібрування засобів вимірювання займає особливе місце у нормативній системі. Кожен вимірювальний прилад повинен мати документально підтверджену точність, що забезпечується регулярним калібруванням відповідно до затвердженого графіка. Калібрування гарантує, що результати вимірювання є простежуваними до державних або міжнародних еталонів. У випадку ремонту пар тертя це надзвичайно важливо, адже від точності вимірювань залежить правильність ремонту та ресурс відновленої деталі.

У сучасних умовах значну роль відіграють цифрові стандарти, що визначають вимоги до електронних приладів, алгоритмів обробки сигналів, систем реєстрації та програмного забезпечення. Упровадження цифрових

нутромірів, мікрометрів, 3D-сканерів і координатно-вимірювальних машин потребує дотримання стандартів точності, дискретності та стабільності цифрових сигналів. Стандарти наполягають на використанні алгоритмів компенсації похибок, фільтрації шумів та автоматичного коригування вимірювальних даних, що значно підвищує якість контролю.

Таким чином, нормативно-метрологічні вимоги є інтегральною складовою процесу ремонту пар тертя. Вони формують систему правил, на основі яких здійснюється вибір засобів вимірювання, розроблення методик контролю, аналіз похибок та оцінювання відповідності результатів установленим нормам. Дотримання цих вимог забезпечує високу точність та достовірність вимірювань, що є ключовим фактором якості та надійності ремонтно-відновлювальних робіт.

### 1.3. Фактори, що впливають на точність вимірювань при ремонті пар тертя, та їхній науково-технічний аналіз

Точність вимірювань у процесі ремонту пар тертя залежить від великої кількості взаємопов'язаних факторів, які формують комплексну систему впливів як на вимірювальний процес, так і на сам об'єкт контролю. На відміну від лабораторних умов, ремонтні операції виконуються у середовищі, де неможливо забезпечити повну стабільність температури, відсутність механічних збурень або ідеальну чистоту поверхонь. Тому для досягнення високої точності важливо не лише використовувати сучасні засоби вимірювання, але й глибоко розуміти природу зовнішніх та внутрішніх факторів, що можуть спотворювати результати контролю. Науковий підхід до аналізу цих факторів дозволяє мінімізувати похибки, забезпечити правильність технологічних рішень та підвищити довговічність відновлених вузлів.

Одним із головних факторів, що впливає на точність вимірювань, є температурний режим, оскільки більшість металевих деталей пар тертя має значний температурний коефіцієнт лінійного розширення. Навіть незначні відхилення температури на 5–10°C від нормованих умов можуть призвести до помилок у соті міліметра, що для високоточних посадок є критичним. У реальних ремонтних цехах деталі часто перебувають у стані підігріву після демонтажу або механічної обробки, що призводить до тимчасових розширень. Якщо вимірювання проводять без попередньої стабілізації температури, отримані результати будуть некоректними. Відповідно, науково обґрунтовані методики передбачають витримку деталей до досягнення температури 20°C або використання термометричної компенсації.

Другим ключовим фактором є механічні та вібраційні впливи, які становлять серйозну загрозу для точності вимірювань. Багато вимірювальних приладів — індикаторні головки, нутроміри, мікрометри — є надзвичайно чутливими до механічних коливань, еластичних деформацій та ударних навантажень. У ремонтних майстернях джерелами вібрацій виступають шліфувальні верстати, розточувальні агрегати, компресори та навіть трафік персоналу. Внаслідок цього стрілка індикатора може «плисти», цифровий прилад — показувати нестабільні значення, а механічний нутромір — змінювати силу контакту з поверхнею. Правильне розташування робочого поста, ізоляція приладів від джерел вібрацій та стабілізація положення деталей є важливими умовами, що підвищують точність вимірювань.

Важливим джерелом похибок є забруднення поверхонь, що проявляється у вигляді мастил, залишків абразиву, металевої стружки, корозійних продуктів або пилу. Пари тертя зазвичай працюють в умовах підвищеного тертя, і після демонтажу на їхніх поверхнях залишаються частки зносу. Навіть тонкий шар мастила або дрібні частки можуть

спотворити результати вимірювань на 2–5 мкм, що становить суттєву частину допусків полів високоточних посадок. Тому підготовка поверхонь — очищення, знежирення, легке шліфування або притирка — є обов'язковою складовою методики вимірювання.

Суттєвий вплив мають геометричні відхилення, що виникають унаслідок зношування. На відміну від нових деталей, які виготовляються з урахуванням правильних геометричних форм, деталі пар тертя після експлуатації мають складні профілі — овальність, конусність, еліптичність, бочкоподібність, локальні западини. Традиційні методи вимірювання (наприклад, контроль тільки у двох взаємно перпендикулярних площинах) не здатні забезпечити повну картину геометричних відхилень. Це призводить до систематичних похибок, оскільки фактична форма поверхні може суттєво відрізнитися від ідеальної. Високоточний ремонт вимагає багатоточкових методів вимірювання, застосування нутромірів з триточною схемою контакту, кругломірів, оптичних пристроїв та методів 3D-аналізу.

Не менш важливим фактором є вибір бази вимірювання. У ремонтній практиці часто виникає ситуація, коли базові поверхні, від яких проводяться вимірювання, також мають спрацювання або дефекти. У таких випадках результат контролю не відображатиме реального положення чи розміру. Неправильне базування призводить до накопичення похибок, що впливають на точність подальшої обробки. Тому в метрології ремонту пар тертя застосовують принцип правильного вибору технологічної бази, яка забезпечує мінімальний вплив геометричних відхилень на результат вимірювання.

Важливим фактором є і похибка самого вимірювального засобу, яка включає інструментальну похибку, знос контактних поверхонь, некоректне калібрування, люфти, недостатню чутливість та погану повторюваність. Прилади, які довго працюють у ремонтних умовах, зазнають

мікродеформацій і втрати точності. Регулярна повірка та калібрування, а також контроль стабільності показів, є необхідними умовами забезпечення точної вимірювальної діяльності.

Людський чинник залишається одним із найбільш значущих джерел похибок. Недостатній досвід оператора, неякісне прикладання приладу, неправильний кут контакту, надмірне або недостатнє зусилля вимірювання, некоректне зчитування показів — усе це здатне істотно спотворити результати. Особливо критичними є вимірювання на внутрішніх поверхнях, де відчуття контакту є менш очевидним. Цю проблему частково розв’язують шляхом переходу до цифрових вимірювальних засобів, однак необхідність високої кваліфікації персоналу залишається актуальною.

Сучасний розвиток вимірювальних технологій показує, що для усунення впливу факторів точності все більш широко застосовуються цифрові інтелектуальні методи й адаптивні сенсорні системи, які автоматично коригують сигнал, виконують температурну компенсацію, фільтрують шум і збільшують достовірність вимірювання. Використання таких систем є перспективним напрямом підвищення точності при ремонті пар тертя.

Отже, точність вимірювань у процесі ремонту пар тертя є результатом взаємодії багатьох факторів — температурних, механічних, геометричних, метрологічних, технологічних і людських. Науково обґрунтований аналіз цих факторів дозволяє сформувати комплекс заходів для їх мінімізації та розробити методи, що забезпечують високу достовірність отриманих даних. Саме це є основою для підвищення якості ремонту, довговічності вузлів і загальної ефективності експлуатації машин.

#### 1.4. Вплив точності вимірювань на якість ремонту пар тертя

Точність вимірювань є одним із визначальних чинників, що безпосередньо впливають на якість ремонту пар тертя та подальшу надійність відновлених вузлів машин і механізмів. Під час ремонтно-відновлювальних робіт саме результати вимірювань геометричних параметрів, мікрогеометрії поверхонь і величини зношування слугують основою для прийняття технологічних рішень щодо вибору способу ремонту, обсягу обробки та доцільності подальшої експлуатації деталей.

Недостатня точність вимірювань може призвести до помилкової оцінки технічного стану деталей пар тертя. У разі заниження фактичних значень зношування можливе використання деталей, які вже не забезпечують необхідних експлуатаційних характеристик, що призводить до прискореного повторного зносу, підвищення втрат енергії на тертя та збільшення ймовірності відмови вузла. Завищення ж результатів вимірювань, навпаки, спричиняє передчасне списання деталей або виконання надмірних ремонтних операцій, що негативно впливає на економічну ефективність ремонту.

Особливу роль точність вимірювань відіграє при відновленні сполучень типу «вал – втулка», «поршень – циліндр», «палець – отвір», де навіть незначні відхилення геометричних параметрів можуть суттєво змінити умови змащування та розподіл контактних напружень. У таких парах тертя похибка вимірювання у кілька мікрометрів може призвести до порушення зазорів, появи задирів або зростання коефіцієнта тертя.

Точність вимірювань визначається сукупністю факторів, серед яких важливе місце посідають метрологічні характеристики засобів вимірювання, методика виконання вимірювань, умови навколишнього середовища та кваліфікація персоналу. В умовах ремонтного виробництва ці фактори часто мають нестабільний характер, що ускладнює забезпечення повторюваності та відтворюваності результатів.

Таблиця 1.1 – Основні фактори, що впливають на точність вимірювань при ремонті пар тертя

| Фактор            | Характер впливу                                  |
|-------------------|--------------------------------------------------|
| Засіб вимірювання | Визначає граничну похибку та роздільну здатність |
| Метод вимірювання | Впливає на систематичну складову похибки         |
| Умови середовища  | Температурні деформації, вологість               |
| Стан поверхні     | Шорсткість, хвилястість, локальні дефекти        |
| Людський фактор   | Повторюваність і правильність зчитування         |

Під час ремонту пар тертя точність вимірювань має забезпечувати не лише контроль номінальних розмірів, але й оцінювання форми поверхонь, таких як овальність, конусність, биття та співвісність. Ігнорування цих параметрів або їх вимірювання з недостатньою точністю призводить до нерівномірного розподілу навантаження в зоні контакту та зниження ресурсу відновленої пари тертя.

Крім геометричних параметрів, важливе значення має точність вимірювання параметрів мікрогеометрії поверхонь, зокрема шорсткості. Невірна оцінка шорсткості може спричинити порушення режиму змащування, підвищення контактних напружень і прискорене спрацювання деталей після ремонту. Саме тому при фінішному контролі пар тертя доцільно застосовувати високоточні профілометричні та оптичні методи вимірювання.

Таблиця 1.2 – Вплив похибок вимірювання на наслідки ремонту пар тертя

| Вид похибки          | Можливі наслідки                       |
|----------------------|----------------------------------------|
| Заниження зношування | Передчасна відмова вузла               |
| Завищення зношування | Необґрунтовані витрати на ремонт       |
| Похибка зазору       | Порушення режиму змащування            |
| Похибка форми        | Нерівномірний контакт і локальний знос |

Забезпечення необхідної точності вимірювань при ремонті пар тертя вимагає застосування диференційованого підходу до вибору засобів і методів контролю залежно від етапу ремонту. На стадії попередньої дефектації допускається використання менш точних, але оперативних методів, тоді як на етапі остаточного контролю повинні застосовуватися високоточні засоби вимірювання, що забезпечують мінімальну невизначеність результатів.

Таким чином, точність вимірювань є ключовим чинником, який визначає якість ремонту пар тертя, довговічність відновлених деталей та економічну ефективність ремонтних робіт. Саме необхідність підвищення точності та достовірності вимірювальної інформації обумовлює актуальність удосконалення методів і засобів вимірювання при ремонті пар тертя, що є предметом подальших досліджень у даній роботі.

### 1.5. Похибки та невизначеність вимірювань при ремонті пар тертя

Під час ремонту пар тертя результати вимірювань геометричних і мікрогеометричних параметрів деталей є основою для прийняття технічних рішень щодо подальшої обробки, відновлення або вибракування деталей.

Однак будь-яке вимірювання супроводжується похибками, які зумовлюють невизначеність отриманих результатів і можуть суттєво впливати на якість ремонтних робіт.

Похибка вимірювання визначається як відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. В умовах ремонту пар тертя істинне значення, як правило, невідоме, тому оцінювання похибок здійснюється на основі метрологічних характеристик засобів вимірювання, аналізу методики вимірювання та умов її виконання. Сукупний вплив похибок призводить до виникнення невизначеності вимірювань, яка характеризує діапазон можливих значень вимірюваної величини.

Основними складовими похибок при ремонті пар тертя є систематичні, випадкові та грубі похибки. Систематичні похибки виникають унаслідок неточності калібрування засобів вимірювання, зношування вимірювальних поверхонь інструменту, температурних деформацій деталей і приладів. Такі похибки мають сталий характер і можуть призвести до систематичного завищення або заниження результатів вимірювання.

Випадкові похибки зумовлені нестабільністю умов вимірювання, неоднорідністю поверхонь деталей, коливанням зусилля притискання вимірювального інструменту та суб'єктивними особливостями оператора. Вони проявляються у розсіюванні результатів при повторних вимірюваннях і суттєво впливають на повторюваність та відтворюваність результатів.

Грубі похибки, як правило, пов'язані з помилками оператора, неправильним встановленням деталі або використанням несправного вимірювального інструменту. У ремонтній практиці такі похибки можуть призводити до критичних помилок при дефектації деталей і мають бути своєчасно виявлені та усунені.

Таблиця 1.3 – Класифікація похибок вимірювань при ремонті пар тертя

| Вид похибки  | Причини виникнення                             | Наслідки                      |
|--------------|------------------------------------------------|-------------------------------|
| Систематична | Некалібрований інструмент, температурні впливи | Стійке відхилення результатів |
| Випадкова    | Нестабільність умов, людський фактор           | Розсіювання результатів       |
| Груба        | Помилки оператора, несправний інструмент       | Критичні помилки контролю     |

У сучасній метрології для кількісної оцінки якості вимірювань застосовується поняття невизначеності вимірювання, яке дозволяє більш об'єктивно оцінити достовірність результатів порівняно з традиційним урахуванням лише похибок. Невизначеність вимірювання враховує всі значущі джерела похибок і подається у вигляді інтервалу, в межах якого з заданою ймовірністю знаходиться істинне значення вимірюваної величини.

При ремонті пар тертя основними складовими невизначеності є:

- невизначеність, пов'язана із засобом вимірювання;
- невизначеність методики вимірювання;
- невизначеність, зумовлена станом поверхні деталі;
- невизначеність, пов'язана з умовами навколишнього середовища;
- невизначеність, обумовлена людським фактором.

Особливої актуальності питання невизначеності набуває при контролі зазорів у парах тертя, де сумарна невизначеність вимірювань може бути

співрозмірною з допустимими граничними відхиленнями. У таких випадках навіть незначне зростання невизначеності може призвести до неправильного рішення щодо придатності деталі до подальшої експлуатації.

Таблиця 1.4 – Основні складові невизначеності вимірювань при ремонті пар тертя

| Джерело невизначеності | Характер впливу                  |
|------------------------|----------------------------------|
| Засіб вимірювання      | Обмежує досягну точність         |
| Методика вимірювання   | Визначає систематичну складову   |
| Стан поверхні          | Викликає додаткове розсіювання   |
| Умови середовища       | Температурні та механічні впливи |
| Оператор               | Впливає на повторюваність        |

Зменшення похибок і невизначеності вимірювань при ремонті пар тертя можливе за рахунок застосування високоточних і стабільних засобів вимірювання, удосконалення методик контролю, впровадження автоматизованих і безконтактних методів вимірювання, а також підвищення кваліфікації персоналу. Комплексний підхід до управління похибками та невизначеністю дозволяє суттєво підвищити достовірність результатів вимірювань і забезпечити стабільну якість ремонтних робіт.

Таким чином, аналіз похибок і невизначеності вимірювань є необхідною складовою процесу ремонту пар тертя. Усвідомлення джерел виникнення похибок та їх впливу на результати контролю створює

методичну основу для подальшого удосконалення методів і засобів вимірювання, що безпосередньо сприяє підвищенню точності ремонту та довговічності відновлених вузлів.

#### 1.6. Обґрунтування необхідності удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя

У сучасних умовах експлуатації машин і механізмів пари тертя є одними з найбільш навантажених та відповідальних елементів конструкції. Саме вони визначають працездатність, надійність і довговічність машин, оскільки в процесі роботи безпосередньо сприймають механічні, теплові та динамічні навантаження. Унаслідок інтенсивного зношування поверхонь тертя відбувається поступове погіршення геометричних параметрів деталей, зміна зазорів, порушення режимів змащування та зростання втрат енергії на тертя. У зв'язку з цим якість ремонту пар тертя має вирішальне значення для забезпечення подальшої надійної експлуатації відновлених вузлів.

Ключовою умовою якісного ремонту пар тертя є достовірна вимірювальна інформація, яка використовується на всіх етапах ремонтного процесу — від первинної дефектації деталей до остаточного контролю після відновлення. Саме результати вимірювань визначають вибір технології ремонту, обсяг обробки матеріалу, параметри відновлювальних операцій та допустимість подальшої експлуатації деталей. За відсутності достатньої точності вимірювань ці рішення приймаються з підвищеним ризиком, що негативно впливає як на технічні, так і на економічні показники ремонту.

Аналіз практики ремонтного виробництва свідчить, що традиційно застосовувані методи та засоби вимірювання часто не відповідають сучасним вимогам до точності й достовірності. Це особливо характерно для умов ремонтних підприємств, де вимірювання виконуються в обмеженому просторі, за нестабільних температурних умов, при підвищеній запиленості

та вібрації. За таких умов навіть високоточні вимірювальні прилади не завжди забезпечують необхідний рівень повторюваності та відтворюваності результатів.

Недостатня точність вимірювань при ремонті пар тертя призводить до накопичення похибок на різних стадіях технологічного процесу. Помилки, допущені під час дефектації, безпосередньо впливають на правильність вибору способу ремонту. Якщо фактичне зношування недооцінене, деталь може бути помилково визнана придатною до експлуатації, що зумовлює прискорений повторний знос і передчасну відмову вузла. У разі ж завищення результатів вимірювання виникає необґрунтоване збільшення обсягу ремонтних робіт або повна заміна деталей, що підвищує собівартість ремонту.

Особливо критичним є вплив точності вимірювань на формування оптимальних зазорів у парах тертя. Зазор є одним з основних параметрів, що визначає режим тертя, умови змащування та тепловий стан вузла. Навіть незначні відхилення зазору від оптимального значення можуть спричинити порушення гідродинамічного або змішаного режиму змащування, появу сухого тертя, локальних перегрівів і задирів. У таких умовах похибка вимірювання в кілька мікрометрів може мати вирішальне значення для працездатності відновленої пари тертя.

Не менш важливим є вплив точності вимірювань на оцінювання форми та взаємного розташування поверхонь деталей пар тертя. Параметри овальності, конусності, співвісності та биття істотно впливають на рівномірність розподілу навантаження в зоні контакту. Недостатня точність вимірювання цих параметрів призводить до локальної концентрації напружень, що прискорює розвиток зношування і знижує ресурс вузла навіть за умови дотримання номінальних розмірів.

Окремої уваги потребує питання точності вимірювання мікрогеометрії поверхонь тертя, зокрема параметрів шорсткості. Шорсткість визначає

характер початкового приработування деталей, утримання мастильного матеріалу та інтенсивність зношування в початковий період експлуатації. Помилки при оцінюванні шорсткості можуть призвести до вибору невідповідної фінішної обробки поверхонь, що негативно впливає на тривалість стабільної роботи відновленого вузла.

З позицій сучасної метрології важливим аспектом є управління невизначеністю вимірювань, яка характеризує сумарний вплив усіх джерел похибок. У багатьох випадках при ремонті пар тертя невизначеність вимірювань є співрозмірною з допустимими відхиленнями контрольованих параметрів, що значно ускладнює прийняття обґрунтованих технічних рішень. Тому підвищення точності вимірювань повинно супроводжуватися системним підходом до оцінювання та зменшення невизначеності результатів.

Необхідність удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя має також економічне обґрунтування. Підвищення точності контролю дозволяє зменшити кількість повторних ремонтів, скоротити втрати часу та матеріальних ресурсів, знизити витрати на запасні частини й підвищити коефіцієнт готовності обладнання. У довгостроковій перспективі це сприяє підвищенню ефективності ремонтного виробництва та конкурентоспроможності підприємства.

Комплексне удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя має передбачати:

- впровадження сучасних високоточних контактних і безконтактних засобів вимірювання;
- удосконалення методик вимірювання з урахуванням реальних умов ремонту;
- автоматизацію процесів збору, обробки та аналізу вимірювальної інформації;
- зменшення впливу людського фактора;

- системне управління похибками та невизначеністю вимірювань;
- інтеграцію вимірювального контролю в систему управління якістю ремонту.

Таким чином, удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя є не окремим технічним заходом, а стратегічним напрямом підвищення якості ремонтно-відновлювальних робіт. Реалізація цього напрямку дозволяє забезпечити стабільну якість відновлених вузлів, підвищити їх ресурс, знизити експлуатаційні витрати та створити передумови для впровадження сучасних технологій ремонту. Саме зазначені положення визначають актуальність і практичну значущість подальших досліджень, спрямованих на аналіз існуючих методів вимірювання та розроблення шляхів їх удосконалення, що становить зміст наступних розділів даної роботи.

### 1.7. Шляхи підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя

Підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя є комплексною науково-технічною задачею, вирішення якої потребує системного підходу, що поєднує удосконалення засобів вимірювання, методик контролю, організації вимірювальних процесів та управління метрологічними ризиками. В умовах сучасного ремонтного виробництва вимірювання повинні забезпечувати не лише відповідність геометричних параметрів деталей нормативним вимогам, але й достовірну оцінку фактичного технічного стану пар тертя з урахуванням їх експлуатаційних особливостей.

Одним з основних напрямів підвищення точності є вибір і застосування адекватних засобів вимірювання залежно від контролюваного параметра та етапу ремонту. На стадії попередньої дефектації доцільно використовувати оперативні методи вимірювання, тоді як на етапі

остаточного контролю після відновлення необхідно застосовувати високоточні засоби, що забезпечують мінімальну похибку та низьку невизначеність результатів.

Таблиця 1.5 – Відповідність засобів вимірювання етапам ремонту пар тертя

| Етап ремонту        | Контрольовані параметри | Рекомендовані засоби вимірювання  |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Дефектація          | Зношування, зазори      | Штангенінструмент, індикатори     |
| Механічна обробка   | Розміри, форма          | Мікрометри, нутроміри             |
| Фінішна обробка     | Шорсткість, форма       | Профілометри, оптичні системи     |
| Остаточний контроль | Комплекс параметрів     | КВМ, цифрові вимірювальні системи |

Важливим шляхом підвищення точності є удосконалення методик вимірювання. Стандартизовані методики дозволяють зменшити систематичні похибки та забезпечити відтворюваність результатів. При цьому методики повинні враховувати реальні умови ремонту, геометричну складність деталей і специфіку поверхонь тертя. Доцільним є застосування багатоточкових і багаторазових вимірювань із подальшою статистичною обробкою результатів.

Значний ефект дає зменшення впливу людського фактора шляхом автоматизації вимірювальних операцій. Використання цифрових індикаторів, автоматизованих вимірювальних стендів і координатно-

вимірювальних машин дозволяє підвищити повторюваність вимірювань та знизити ймовірність суб'єктивних помилок оператора.

Таблиця 1.6 – Вплив автоматизації на показники точності вимірювань

| Показник            | Ручні вимірювання | Автоматизовані вимірювання |
|---------------------|-------------------|----------------------------|
| Повторюваність      | Середня           | Висока                     |
| Вплив оператора     | Значний           | Мінімальний                |
| Час контролю        | Високий           | Знижений                   |
| Ймовірність помилки | Підвищена         | Знижена                    |

Окремим напрямом є управління похибками та невизначеністю вимірювань. Це передбачає регулярне калібрування засобів вимірювання, контроль їх метрологічних характеристик, аналіз джерел похибок і застосування методів оцінювання невизначеності відповідно до сучасних метрологічних підходів. У практиці ремонту пар тертя доцільно встановлювати допустимі рівні невизначеності для кожного контрольованого параметра з урахуванням граничних відхилень.

Важливу роль у підвищенні точності відіграє контроль умов проведення вимірювань. Температурні коливання, вібрації та стан поверхні деталей можуть істотно впливати на результати вимірювань. Тому необхідно забезпечувати стабільні умови вимірювального середовища або враховувати вплив зовнішніх факторів шляхом внесення відповідних поправок.

Таблиця 1.7 – Основні організаційно-технічні заходи з підвищення точності вимірювань

| Захід                             | Очікуваний ефект                |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Калібрування приладів             | Зменшення систематичних похибок |
| Стандартизація методик            | Підвищення відтворюваності      |
| Автоматизація вимірювань          | Зниження людського фактора      |
| Контроль умов середовища          | Стабільність результатів        |
| Підвищення кваліфікації персоналу | Зменшення грубих похибок        |

Суттєве значення має інтеграція вимірювального контролю у систему управління якістю ремонту. Вимірювальні дані повинні використовуватися не лише для прийняття рішень щодо придатності деталей, але й для аналізу тенденцій зношування, оптимізації технологічних процесів та прогнозування ресурсу відновлених пар тертя. Такий підхід дозволяє перейти від реактивного до превентивного управління якістю ремонту.

Таким чином, підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя можливе лише за умови реалізації комплексу взаємопов'язаних технічних, методичних та організаційних заходів. Реалізація запропонованих шляхів створює передумови для істотного зниження метрологічних ризиків, підвищення якості ремонтно-відновлювальних робіт і збільшення ресурсу відновлених вузлів. Отримані положення є теоретичною та методичною основою для подальшого аналізу та практичного удосконалення методів вимірювання, що буде розглянуто у наступних розділах дипломної роботи.

## Висновки до розділу 1

У першому розділі дипломної роботи виконано комплексний теоретичний аналіз проблеми забезпечення точності вимірювань при ремонті пар тертя, що є основою для подальших практичних досліджень та розроблення шляхів удосконалення вимірювального контролю в ремонтному виробництві.

У процесі дослідження встановлено, що пари тертя належать до найбільш відповідальних елементів машин і механізмів, від технічного стану яких безпосередньо залежить надійність, довговічність і безпека експлуатації обладнання. Саме тому точність вимірювань їх геометричних і мікрогеометричних параметрів є ключовим чинником забезпечення якості ремонтно-відновлювальних робіт.

Проаналізовано вплив точності вимірювань на формування зазорів, умови змащування та розподіл контактних напружень у парах тертя. Показано, що навіть незначні похибки вимірювань можуть призводити до порушення режимів тертя, прискореного зношування та передчасних відмов відновлених вузлів, що зумовлює необхідність підвищення вимог до достовірності вимірювального контролю.

У розділі систематизовано методи і засоби вимірювання, що застосовуються при ремонті пар тертя, та виконано їх класифікацію за принципом дії, ступенем автоматизації та досяжною точністю. Встановлено, що традиційні контактні методи, незважаючи на поширеність, не завжди забезпечують необхідний рівень точності в умовах ремонтного виробництва, особливо при контролі складної геометрії та мікрогеометрії поверхонь тертя.

Розглянуто природу похибок і невизначеності вимірювань при ремонті пар тертя, визначено основні джерела їх виникнення та вплив на результати

контролю. Обґрунтовано доцільність застосування сучасних метрологічних підходів до оцінювання невизначеності вимірювань як інструменту підвищення достовірності прийняття технічних рішень у процесі ремонту.

На основі проведеного аналізу доведено необхідність удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя як стратегічного напрямку підвищення якості ремонтно-відновлювальних робіт. Показано, що підвищення точності вимірювань має здійснюватися комплексно та включати вдосконалення засобів і методів вимірювання, зменшення впливу людського фактора, автоматизацію вимірювальних процесів і інтеграцію вимірювального контролю в систему управління якістю ремонту.

Запропоновані у розділі шляхи підвищення точності вимірювань створюють теоретичну та методичну основу для подальших досліджень, спрямованих на аналіз існуючих вимірювальних рішень та розроблення практичних рекомендацій щодо їх удосконалення. Отримані висновки підтверджують актуальність теми дипломної роботи та визначають логічну послідовність подальшого викладення матеріалу у наступних розділах.

## 2 Аналіз методів і засобів вимірювання при ремонті пар тертя

### 2.1. Характеристика пар тертя як об'єктів вимірювання при ремонтно-відновлювальних роботах

Пари тертя є основними функціональними елементами більшості машин і механізмів, у яких відбувається передача навантажень, рух або позиціонування деталей. У процесі експлуатації вони піддаються інтенсивному механічному, тепловому та трибологічному впливу, що призводить до поступового зношування робочих поверхонь і зміни їх геометричних та фізико-механічних параметрів. У зв'язку з цим під час

ремонтно-відновлювальних робіт пари тертя виступають складними об'єктами вимірювання, для яких необхідно забезпечити високу точність та достовірність контролю.

Особливістю пар тертя як об'єктів вимірювання є різноманітність контрольованих параметрів, які впливають на їх працездатність. До таких параметрів належать лінійні розміри, зазори, відхилення форми, взаємне розташування поверхонь, параметри шорсткості, а також характер і глибина зношування. Кожен з цих параметрів вимагає застосування відповідних методів і засобів вимірювання, що ускладнює організацію вимірювального контролю в умовах ремонтного виробництва.

У ремонтній практиці пари тертя можуть мати різну конструктивну форму та умови роботи. Найбільш поширеними є циліндричні та плоскі пари тертя, що працюють у режимах ковзання або кочення. Конструктивні особливості деталей визначають доступність контрольованих поверхонь і впливають на вибір методів вимірювання. Наприклад, внутрішні поверхні втулок і циліндрів потребують застосування нутромірів або спеціалізованих вимірювальних пристроїв, тоді як зовнішні поверхні валів можуть контролюватися стандартними мікрометрами.

Таблиця 2.1 – Основні типи пар тертя та характерні параметри, що підлягають вимірюванню

| Тип пари тертя | Приклад сполучення | Основні контрольовані параметри |
|----------------|--------------------|---------------------------------|
| Циліндрична    | Вал – втулка       | Діаметр, зазор, овальність      |
| Плоска         | Напрямна – повзун  | Площинність, паралельність      |

|                   |                    |                         |
|-------------------|--------------------|-------------------------|
| Кочення           | Підшипник          | Діаметри, зазори, биття |
| Складна профільна | Шліцьові з'єднання | Профіль, співвісність   |

Важливою характеристикою пар тертя як об'єктів вимірювання є неоднорідність зношування. У більшості випадків зношування має локальний характер і нерівномірно розподіляється по поверхні контакту. Це ускладнює оцінювання середніх значень геометричних параметрів і потребує виконання багаторазових вимірювань у різних зонах поверхні. Недостатня кількість вимірювань або неправильний вибір контрольних точок може призвести до суттєвих похибок у визначенні фактичного стану деталі.

Особливу складність становить вимірювання параметрів форми поверхонь — овальності, конусності, хвилястості та биття. Ці параметри не завжди можуть бути визначені простими лінійними вимірюваннями і потребують застосування індикаторних методів, кругломірів або координатно-вимірювальних машин. У ремонтному виробництві використання таких засобів часто обмежене, що знижує повноту контролю та точність оцінювання.

Таблиця 2.2 – Основні параметри форми поверхонь пар тертя та методи їх вимірювання

| Параметр   | Характеристика               | Типові методи вимірювання |
|------------|------------------------------|---------------------------|
| Овальність | Відхилення від круглої форми | Індикаторні методи        |
| Конусність | Зміна діаметра по довжині    | Мікрометри, нутроміри     |

|              |                        |                            |
|--------------|------------------------|----------------------------|
| Биття        | Радіальне відхилення   | Індикаторні головки        |
| Співвісність | Взаємне положення осей | КВМ, пристрої<br>базування |

Крім геометричних параметрів, пари тертя характеризуються параметрами мікрогеометрії поверхонь, які визначають умови контакту та змащування. Параметри шорсткості та хвилястості істотно впливають на інтенсивність початкового зношування та стабільність роботи вузла після ремонту. Вимірювання цих параметрів вимагає застосування профілометричних або оптичних методів, які дозволяють отримувати детальну інформацію про стан поверхні.

З позицій метрології пари тертя відносяться до об'єктів вимірювання з високими вимогами до точності, оскільки допустимі відхилення геометричних параметрів часто мають мікрометровий діапазон. У таких умовах похибка вимірювання та невизначеність результатів можуть бути співрозмірними з допустимими відхиленнями, що суттєво ускладнює прийняття обґрунтованих технічних рішень. Це обумовлює необхідність застосування високоточних засобів вимірювання та ретельного контролю умов виконання вимірювань.

Ще однією особливістю пар тертя як об'єктів вимірювання є вплив попередньої експлуатації на результати контролю. Наявність залишкових напружень, деформацій, продуктів зношування та мастильних матеріалів може спотворювати результати вимірювань. Тому перед виконанням вимірювань необхідно здійснювати підготовку поверхонь — очищення, стабілізацію температури та правильне базування деталей.

Таким чином, пари тертя як об'єкти вимірювання при ремонтно-відновлювальних роботах характеризуються складною сукупністю геометричних, мікрогеометричних і експлуатаційних параметрів, що

потребують комплексного підходу до організації вимірювального контролю. Розуміння цих особливостей є необхідною передумовою для подальшого аналізу існуючих методів і засобів вимірювання та обґрунтування шляхів підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя, що буде розглянуто у наступних підрозділах даного розділу.

## 2.2. Аналіз існуючих методів вимірювання геометричних параметрів пар тертя

Вимірювання геометричних параметрів пар тертя є одним із ключових етапів ремонтно-відновлювальних робіт, оскільки саме ці параметри визначають правильність формування зазорів, характер контакту поверхонь та умови змащування. До основних геометричних параметрів, що підлягають контролю при ремонті пар тертя, належать лінійні розміри, зазори, відхилення форми (овальність, конусність), а також параметри взаємного розташування поверхонь.

Існуючі методи вимірювання геометричних параметрів умовно поділяють на контактні та безконтактні. Контактні методи є найбільш поширеними в ремонтній практиці завдяки відносній простоті реалізації та доступності вимірювальних засобів. Вони передбачають безпосередній контакт вимірювального елемента з поверхнею деталі, що дозволяє отримувати значення лінійних розмірів і відхилень форми з достатньою точністю для більшості ремонтних операцій.

До контактних методів належать вимірювання за допомогою штангенінструменту, мікрометрів, нутромірів та індикаторних приладів. Штангенінструмент застосовується переважно для попереднього контролю та дефектації деталей, коли необхідно швидко оцінити ступінь зношування. Однак його точність є обмеженою і, як правило, недостатньою для остаточного контролю пар тертя.

Мікрометри та нутроміри дозволяють здійснювати більш точні вимірювання діаметрів валів і внутрішніх поверхонь втулок. При цьому точність вимірювання значною мірою залежить від правильності базування приладу, стану поверхні деталі та навичок оператора. Індикаторні методи застосовуються для визначення відхилень форми та взаємного розташування поверхонь, зокрема овальності, биття та конусності.

Таблиця 2.3 – Контактні методи вимірювання геометричних параметрів пар тертя

| Метод             | Засоби вимірювання | Контрольовані параметри | Переваги                | Недоліки                 |
|-------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Штангенінструмент | Штангенциркуль     | Лінійні розміри         | Простота, оперативність | Низька точність          |
| Мікрометричний    | Мікрометр          | Діаметри валів          | Висока точність         | Залежність від оператора |

Продовження табл.2.3

| 1            | 2         | 3                  | 4               | 5                    |
|--------------|-----------|--------------------|-----------------|----------------------|
| Нутромірний  | Нутромір  | Внутрішні діаметри | Контроль втулок | Складність базування |
| Індикаторний | Індикатор | Овальність, биття  | Універсальність | Похибки установки    |

Безконтактні методи вимірювання набувають дедалі більшого поширення завдяки можливості зменшення впливу людського фактора та

виключення механічного впливу на поверхню деталі. До таких методів належать оптичні, лазерні та координатно-вимірювальні технології. Вони дозволяють отримувати детальну інформацію про форму та розміри поверхонь з високою точністю і повторюваністю.

Оптичні методи базуються на аналізі відбитого або прохідного світлового потоку та застосовуються для контролю профілю та форми поверхонь. Лазерні методи дозволяють здійснювати високоточні вимірювання без фізичного контакту з деталлю, що є особливо важливим при контролі поверхонь після фінішної обробки. Координатно-вимірювальні машини (КВМ) забезпечують комплексний контроль геометричних параметрів, включаючи складні просторові відхилення.

Таблиця 2.4 – Безконтактні методи вимірювання геометричних параметрів пар тертя

| Метод        | Засоби вимірювання | Основні можливості     | Переваги             | Обмеження                |
|--------------|--------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|
| Оптичний     | Оптичні системи    | Контроль профілю       | Висока деталізація   | Чутливість до забруднень |
| Лазерний     | Лазерні сканери    | Висока точність        | Відсутність контакту | Висока вартість          |
| Координатний | КВМ                | Просторові вимірювання | Комплексний аналіз   | Складність експлуатації  |

Особливу увагу при аналізі методів вимірювання слід приділяти впливу умов вимірювання. Температурні деформації деталей і вимірювальних приладів, наявність залишкових мастильних матеріалів і продуктів зношування можуть суттєво впливати на результати вимірювань. У контактних методах ці фактори часто компенсуються досвідом оператора, тоді як у безконтактних методах необхідно застосовувати спеціальні алгоритми корекції.

Аналіз існуючих методів показує, що жоден з них не є універсальним для всіх етапів ремонту пар тертя. Контактні методи доцільні для оперативного контролю та дефектації, тоді як безконтактні та координатні методи більш ефективні для фінішного контролю та аналізу складних геометричних відхилень. Вибір методу вимірювання повинен здійснюватися з урахуванням необхідної точності, умов ремонту та економічної доцільності.

Таким чином, аналіз існуючих методів вимірювання геометричних параметрів пар тертя свідчить про необхідність їх удосконалення та комбінування з метою підвищення точності та достовірності результатів. Отримані висновки створюють основу для подальшого дослідження методів вимірювання параметрів мікрогеометрії та зношування, що буде розглянуто у наступних підрозділах даного розділу.

### 2.3. Аналіз методів вимірювання параметрів мікрогеометрії та зношування поверхонь пар тертя

Параметри мікрогеометрії поверхонь пар тертя є визначальними для формування умов контакту, змащування та зносостійкості відновлених деталей. До основних показників мікрогеометрії належать параметри шорсткості, хвилястості та локальні дефекти поверхні, які суттєво

впливають на реальну площу контакту, інтенсивність зношування та стабільність роботи вузла після ремонту. У зв'язку з цим вимірювання мікрогеометрії та зношування поверхонь є обов'язковим етапом контролю якості ремонтно-відновлювальних робіт.

У ремонтній практиці вимірювання параметрів мікрогеометрії здійснюється різними методами, які відрізняються принципом дії, точністю, складністю реалізації та вимогами до умов проведення вимірювань. Найбільш поширеними є контактні профілометричні методи, що базуються на механічному зчитуванні профілю поверхні за допомогою чутливого щупа. Ці методи дозволяють отримувати числові значення параметрів шорсткості, таких як  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$ , та застосовуються для контролю поверхонь після механічної та фінішної обробки.

Контактні методи характеризуються достатньо високою точністю та відносною простотою використання, однак мають певні обмеження. Контакт щупа з поверхнею може призводити до мікропошкоджень тонких поверхневих шарів, а також ускладнює вимірювання на поверхнях зі складним профілем або в обмежених зонах. Крім того, результати вимірювань значною мірою залежать від вибору траєкторії руху щупа та умов проведення вимірювань.

Таблиця 2.5 – Контактні методи вимірювання параметрів мікрогеометрії поверхонь

| Метод            | Засоби вимірювання     | Основні параметри     | Переваги        | Недоліки           |
|------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|
| Профілометричний | Контактний профілометр | $R_a$ , $R_z$ , $R_q$ | Висока точність | Механічний контакт |

|              |                      |                   |           |                          |
|--------------|----------------------|-------------------|-----------|--------------------------|
| Індикаторний | Індикаторні пристрої | Нерівності        | Простота  | Обмежена інформативність |
| Порівняльний | Еталони шорсткості   | Орієнтовна оцінка | Швидкість | Суб'єктивність           |

Альтернативою контактним є безконтактні оптичні методи вимірювання мікрогеометрії, які ґрунтуються на аналізі відбитого світлового потоку або інтерференційних ефектів. Такі методи дозволяють здійснювати вимірювання без фізичного впливу на поверхню, що є особливо важливим для фінішно оброблених або покритих поверхонь пар тертя. Оптичні методи забезпечують високу роздільну здатність і можливість отримання просторової карти мікрорельєфу.

Разом із тим оптичні методи є чутливими до забруднення поверхні, наявності мастильних матеріалів і змін оптичних властивостей матеріалу. Це вимагає ретельної підготовки поверхні та стабільних умов вимірювання, що не завжди можливо в умовах ремонтного виробництва.

Таблиця 2.6 – Безконтактні методи вимірювання мікрогеометрії поверхонь

| Метод    | Засоби вимірювання   | Можливість і   | Переваги        | Обмеження                |
|----------|----------------------|----------------|-----------------|--------------------------|
| Оптичний | Оптичні профілометри | Аналіз профілю | Безконтактність | Чутливість до забруднень |

|                  |                 |                                  |                         |                            |
|------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Лазерний         | Лазерні сканери | Висока<br>роздільна<br>здатність | Швидкість               | Висока<br>вартість         |
| Інтерференційний | Інтерферометри  | Просторов<br>а карта             | Максимальна<br>точність | Складність<br>експлуатації |

Окрему групу становлять методи оцінювання зношування поверхонь пар тертя, які дозволяють визначати характер і глибину зношування, а також локалізацію найбільш навантажених зон. До таких методів належать порівняльні вимірювання геометрії поверхні до і після експлуатації, аналіз профілю зношеної поверхні та методи цифрової обробки зображень. У ремонтній практиці вимірювання зношування часто поєднується з аналізом параметрів мікрогеометрії, що дозволяє комплексно оцінювати стан поверхонь.

Особливу увагу необхідно приділяти відтворюваності та невизначеності вимірювань мікрогеометрії. Невеликі відхилення в умовах вимірювання або налаштуванні приладів можуть призводити до суттєвих розбіжностей у результатах. Тому для забезпечення достовірності вимірювань необхідно застосовувати стандартизовані методики, виконувати багаторазові вимірювання та здійснювати статистичну обробку результатів.

Таблиця 2.7 – Фактори, що впливають на точність вимірювання мікрогеометрії

|        |                 |                    |
|--------|-----------------|--------------------|
| Фактор | Характер впливу | Заходи мінімізації |
|--------|-----------------|--------------------|

|                      |                      |                         |
|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Стан поверхні        | Спотворення профілю  | Очищення,<br>знежирення |
| Температура          | Теплові деформації   | Термостабілізація       |
| Налаштування приладу | Систематичні похибки | Калібрування            |
| Людський фактор      | Випадкові похибки    | Автоматизація           |

Проведений аналіз показує, що для забезпечення високої точності вимірювання мікрогеометрії та зношування поверхонь пар тертя доцільно застосовувати комбінований підхід, який поєднує контактні та безконтактні методи залежно від етапу ремонту та вимог до точності. Такий підхід дозволяє підвищити інформативність вимірювань, знизити метрологічні ризики та забезпечити стабільну якість ремонтно-відновлювальних робіт.

Отримані результати аналізу створюють основу для подальшого дослідження похибок і невизначеності вимірювань, а також для обґрунтування шляхів удосконалення методів і засобів вимірювання при ремонті пар тертя, що буде розглянуто у наступних підрозділах даного розділу.

#### 2.4. Аналіз похибок та невизначеності вимірювань при ремонті пар тертя

Забезпечення високої точності вимірювань при ремонті пар тертя неможливе без детального аналізу похибок і невизначеності вимірювань, які виникають у процесі контролю геометричних параметрів і мікрогеометрії поверхонь. Похибки вимірювань безпосередньо впливають на достовірність оцінювання технічного стану деталей, правильність прийняття рішень щодо їх придатності та якості виконання ремонтно-відновлювальних робіт.

У загальному випадку похибка вимірювання визначається як відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. В умовах ремонтного виробництва істинне значення, як правило, невідоме, тому особливого значення набуває оцінювання невизначеності вимірювань, що характеризує інтервал, у межах якого з певною ймовірністю знаходиться істинне значення параметра.

Похибки вимірювань при ремонті пар тертя можуть мати різну природу та поділяються на систематичні, випадкові та грубі. Систематичні похибки мають сталий або закономірний характер і повторюються при багаторазових вимірюваннях за однакових умов. Вони можуть бути зумовлені неточністю засобів вимірювання, неправильним калібруванням приладів або методичними помилками вимірювання.

Таблиця 2.8 – Класифікація похибок вимірювань при ремонті пар тертя

| Вид похибки  | Характеристика    | Основні причини виникнення               |
|--------------|-------------------|------------------------------------------|
| Систематична | Має сталий напрям | Некалібровані прилади, методичні помилки |

Продовження табл.2.8

| 1         | 2                    | 3                             |
|-----------|----------------------|-------------------------------|
| Випадкова | Змінюється випадково | Нестабільні умови вимірювання |

|       |                   |                                          |
|-------|-------------------|------------------------------------------|
| Груба | Значне відхилення | Помилки оператора, неправильне базування |
|-------|-------------------|------------------------------------------|

Випадкові похибки виникають унаслідок дії численних неконтрольованих факторів, таких як коливання температури, вібрації, нестабільність положення деталі або неоднорідність поверхні. Вони проявляються у вигляді розсіювання результатів вимірювань і можуть бути зменшені шляхом багаторазових вимірювань та статистичної обробки результатів. Грубі похибки, на відміну від систематичних і випадкових, мають епізодичний характер і, як правило, зумовлені помилками персоналу або неправильним застосуванням вимірювальних засобів.

Особливу роль у формуванні похибок відіграють умови проведення вимірювань. При ремонті пар тертя вимірювання часто виконуються безпосередньо в цехових умовах, де складно забезпечити стабільну температуру, відсутність вібрацій і чистоту поверхонь. Температурні деформації деталей і вимірювальних приладів можуть призводити до суттєвих систематичних відхилень результатів, особливо при контролі розмірів з мікрометровими допусками.

Таблиця 2.9 – Вплив умов вимірювання на формування похибок

| Фактор      | Характер впливу    | Наслідки для точності |
|-------------|--------------------|-----------------------|
| Температура | Теплове розширення | Зміна розмірів        |

|                         |                       |                       |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Вібрації                | Коливання показів     | Зростання розсіювання |
| Забруднення поверхні    | Спотворення контакту  | Систематичні похибки  |
| Освітлення (для оптики) | Погіршення зчитування | Випадкові похибки     |

З розвитком сучасної метрології все більшого значення набуває оцінювання невизначеності вимірювань, яке дозволяє комплексно враховувати всі джерела похибок. Невизначеність включає складові типу А, що визначаються статистично на основі серії вимірювань, і складові типу В, які оцінюються за даними калібрування, технічної документації або попереднього досвіду.

Для пар тертя характерною є ситуація, коли сумарна невизначеність вимірювань стає співмірною з допустимими відхиленнями геометричних параметрів. У таких умовах ігнорування невизначеності може призводити до помилкових рішень щодо придатності деталей або ефективності ремонтних операцій. Тому впровадження методів оцінювання невизначеності є важливим елементом удосконалення вимірювального контролю.

Таблиця 2.10 – Основні складові невизначеності вимірювань

|         |                    |                 |
|---------|--------------------|-----------------|
| Джерело | Тип невизначеності | Характер впливу |
|---------|--------------------|-----------------|

|                   |       |                            |
|-------------------|-------|----------------------------|
| Засіб вимірювання | Тип В | Похибка приладу            |
| Метод вимірювання | Тип В | Методична складова         |
| Повторюваність    | Тип А | Розсіювання<br>результатів |
| Умови середовища  | Тип В | Температурні впливи        |

Аналіз похибок і невизначеності вимірювань показує, що в ремонтному виробництві часто відсутній системний підхід до їх оцінювання. Як правило, обмежуються контролем справності приладів, не враховуючи сукупний вплив усіх факторів. Це знижує достовірність вимірювального контролю та ускладнює підвищення якості ремонту пар тертя.

Таким чином, детальний аналіз похибок і невизначеності вимірювань при ремонті пар тертя підтверджує необхідність удосконалення методів і засобів вимірювання з урахуванням метрологічних принципів. Отримані результати є підґрунтям для розроблення практичних рекомендацій щодо зниження похибок, оптимізації умов вимірювання та впровадження сучасних підходів до оцінювання невизначеності, що буде розглянуто у наступних підрозділах даного розділу.

## 2.5. Аналіз організації вимірювального контролю при ремонті пар тертя

Організація вимірювального контролю при ремонті пар тертя є визначальним чинником забезпечення точності вимірювань та стабільної

якості ремонтно-відновлювальних робіт. Навіть за наявності сучасних і високоточних засобів вимірювання відсутність системного підходу до організації контролю призводить до зростання метрологічних ризиків, збільшення розсіювання результатів та зниження надійності відновлених вузлів.

Вимірювальний контроль у процесі ремонту пар тертя має багатостадійний характер і охоплює етапи дефектації, технологічної обробки, фінішного відновлення та остаточного приймального контролю. На кожному з цих етапів вимірювання виконують різні функції — від орієнтовної оцінки зношування до високоточного підтвердження відповідності геометричних і мікрогеометричних параметрів установленим вимогам.

Таблиця 2.11 – Основні етапи вимірювального контролю при ремонті пар тертя

| Етап ремонту        | Мета вимірювань        | Основні параметри   |
|---------------------|------------------------|---------------------|
| Дефектація          | Визначення придатності | Зношування, зазори  |
| Попередня обробка   | Контроль припусків     | Лінійні розміри     |
| Фінішна обробка     | Забезпечення точності  | Форма, шорсткість   |
| Остаточний контроль | Підтвердження якості   | Комплекс параметрів |

Ефективність вимірювального контролю значною мірою залежить від чіткого розподілу відповідальності між підрозділами та персоналом, залученими до ремонтного процесу. У практиці ремонтних підприємств часто спостерігається ситуація, коли вимірювання виконуються без єдиного

методичного керівництва, що призводить до різночитань результатів і зниження їх відтворюваності.

Важливою складовою організації вимірювального контролю є вибір контрольних точок і кількості вимірювань. Для пар тертя, які характеризуються нерівномірним зношуванням, контроль лише в одній або двох точках є недостатнім. Необхідно застосовувати багатоточкові схеми вимірювання, що дозволяють адекватно оцінити реальний стан поверхонь.

Таблиця 2.12 – Порівняння схем вимірювального контролю

| Схема контролю | Характеристика                 | Достовірність результатів |
|----------------|--------------------------------|---------------------------|
| Одноточкова    | Мінімальні витрати часу        | Низька                    |
| Двоточкова     | Часткове врахування зношування | Середня                   |
| Багатоточкова  | Повна оцінка поверхні          | Висока                    |

Суттєвий вплив на точність вимірювань має організація робочого місця вимірювача. Невідповідні умови, відсутність температурної стабілізації та неправильне зберігання засобів вимірювання призводять до виникнення додаткових систематичних і випадкових похибок. Тому вимірювальні операції доцільно виконувати у спеціально відведених зонах або приміщеннях, обладнаних відповідно до метрологічних вимог.

Окремого аналізу потребує документування результатів вимірювань. Невпорядковане або неповне фіксування результатів унеможлиблює подальший аналіз якості ремонту та ускладнює виявлення причин

відхилень. Раціональна система документації повинна передбачати збереження результатів вимірювань на всіх етапах ремонту та їх прив'язку до конкретних деталей і партій виробів.

Таблиця 2.13 – Основні недоліки організації вимірювального контролю та їх наслідки

| Недолік                         | Причина                 | Наслідки                |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Відсутність єдиної методики     | Несистемний підхід      | Розбіжність результатів |
| Недостатня кількість вимірювань | Економія часу           | Недооцінка зношування   |
| Погані умови вимірювання        | Цехові фактори          | Зростання похибок       |
| Неповне документування          | Відсутність регламентів | Втрата простежуваності  |

Важливим аспектом організації вимірювального контролю є взаємодія вимірювальних операцій з технологічними процесами ремонту. Вимірювання повинні бути інтегровані в технологічний маршрут таким чином, щоб своєчасно виявляти відхилення та запобігати накопиченню дефектів. Запізнілий контроль, як правило, призводить до повторних операцій або браку відновлених деталей.

Сучасні тенденції розвитку ремонтного виробництва передбачають часткову або повну автоматизацію вимірювального контролю. Використання цифрових засобів вимірювання, автоматизованих вимірювальних постів і програмного забезпечення для обробки результатів дозволяє підвищити повторюваність вимірювань, знизити вплив людського фактора та забезпечити оперативний аналіз даних.

Таким чином, аналіз організації вимірювального контролю при ремонті пар тертя свідчить, що підвищення точності вимірювань неможливе без удосконалення організаційних аспектів контролю. Комплексний підхід, який поєднує чітке регламентування вимірювальних операцій, оптимізацію схем контролю, належні умови проведення вимірювань та ефективну систему документування, створює передумови для зниження метрологічних ризиків і підвищення якості ремонтно-відновлювальних робіт. Отримані висновки є основою для подальшого обґрунтування практичних заходів з удосконалення точності вимірювань, що буде розглянуто у наступних підрозділах.

## Висновки до розділу 2

У другому розділі дипломної роботи виконано всебічний аналіз особливостей вимірювання параметрів пар тертя при ремонтно-відновлювальних роботах, що дозволило виявити основні проблеми забезпечення точності та достовірності вимірювального контролю в умовах ремонтного виробництва.

У результаті дослідження встановлено, що пари тертя як об'єкти вимірювання характеризуються складною сукупністю геометричних, мікрогеометричних та експлуатаційних параметрів, контроль яких потребує застосування різноманітних методів і засобів вимірювання. При цьому нерівномірність зношування поверхонь та складність доступу до

контрольованих зон суттєво ускладнюють отримання об'єктивної інформації про фактичний технічний стан деталей.

Проведений аналіз існуючих методів вимірювання геометричних параметрів пар тертя показав, що контактні методи, які переважають у практиці ремонтних підприємств, забезпечують достатню точність лише на етапах дефектації та попереднього контролю. Для фінішних операцій і контролю параметрів форми та взаємного розташування поверхонь їх можливості є обмеженими, що зумовлює необхідність залучення більш точних та інформативних методів вимірювання.

Дослідження методів вимірювання параметрів мікрогеометрії та зношування поверхонь дозволило встановити, що точність оцінювання шорсткості, хвилястості та локальних дефектів істотно впливає на якість ремонту та подальший ресурс пар тертя. Контактні профілометричні методи є найбільш доступними, однак їх застосування супроводжується низкою обмежень, пов'язаних із впливом умов вимірювання та людського фактора. Безконтактні методи мають значний потенціал для підвищення точності, але потребують відповідних організаційних та технічних умов.

Аналіз похибок і невизначеності вимірювань показав, що в умовах ремонтного виробництва відсутній системний підхід до їх оцінювання. Систематичні та випадкові похибки, а також вплив умов проведення вимірювань часто не враховуються комплексно, що призводить до зниження достовірності результатів і підвищення метрологічних ризиків. Встановлено, що впровадження методів оцінювання невизначеності вимірювань є необхідною умовою прийняття обґрунтованих технічних рішень при ремонті пар тертя.

Дослідження організації вимірювального контролю виявило низку характерних недоліків, серед яких відсутність єдиних методик вимірювання, недостатня кількість контрольних точок, несприятливі умови виконання вимірювань та неповне документування результатів. Зазначені недоліки

негативно впливають на повторюваність і простежуваність вимірювань, ускладнюють аналіз якості ремонту та знижують ефективність управління ремонтними процесами.

Узагальнюючи результати другого розділу, встановлено, що підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя потребує комплексного підходу, який поєднує вдосконалення методів і засобів вимірювання, впровадження сучасних метрологічних принципів оцінювання похибок і невизначеності, а також удосконалення організації вимірювального контролю. Отримані висновки є науково-методичною основою для розроблення практичних заходів з удосконалення точності вимірювань, які будуть обґрунтовані та реалізовані у третьому розділі дипломної роботи.

### 3 Розроблення заходів з удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя

#### 3.1. Обґрунтування напрямів удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя

Результати аналізу, виконаного у попередніх розділах, свідчать, що досягнення високої точності вимірювань при ремонті пар тертя неможливе без системного вдосконалення методів, засобів та організації вимірювального контролю. Сучасні вимоги до надійності та ресурсу відновлених вузлів зумовлюють необхідність переходу від фрагментарного застосування вимірювальних засобів до комплексного метрологічного підходу, орієнтованого на зниження похибок і невизначеності вимірювань на всіх етапах ремонту.

Основними чинниками, що обмежують точність вимірювань при ремонті пар тертя, є застарілий парк засобів вимірювання, недостатня

стандартизація методик контролю, значний вплив людського фактора та несприятливі умови проведення вимірювань у цеховому середовищі. У зв'язку з цим напрями удосконалення повинні охоплювати як технічні, так і організаційно-методичні аспекти вимірювального процесу.

Першим і базовим напрямом є удосконалення засобів вимірювання, що застосовуються при ремонті пар тертя. Для забезпечення необхідної точності доцільно розширювати використання високоточних цифрових приладів, автоматизованих вимірювальних систем і комбінованих засобів контролю, які дозволяють зменшити суб'єктивний вплив оператора та підвищити повторюваність результатів.

Таблиця 3.1 – Основні напрями удосконалення засобів вимірювання

| Напрямок              | Зміст удосконалення                          | Очікуваний ефект           |
|-----------------------|----------------------------------------------|----------------------------|
| Модернізація приладів | Перехід на цифрові засоби                    | Підвищення точності        |
| Автоматизація         | Використання автоматизованих систем          | Зниження людського фактора |
| Комбіновані методи    | Поєднання контактних і безконтактних методів | Підвищення інформативності |

Другим важливим напрямом є вдосконалення методик вимірювання. Стандартизовані методики дозволяють мінімізувати методичні похибки та забезпечити відтворюваність результатів. Для пар тертя доцільно розробляти спеціалізовані методики вимірювання, що враховують конструктивні особливості деталей, характер зношування та вимоги до точності на різних етапах ремонту.

Значну роль у підвищенні точності вимірювань відіграє оптимізація схем вимірювального контролю. Застосування багатоточкових схем вимірювання дозволяє більш достовірно оцінювати нерівномірність зношування та реальний стан поверхонь тертя. При цьому кількість контрольних точок і їх розташування повинні визначатися з урахуванням конструкції деталі та зон найбільшого навантаження.

Таблиця 3.2 – Порівняння схем вимірювального контролю при ремонті пар тертя

| Схема      | Кількість вимірювань | Достовірність оцінки | Доцільність застосування |
|------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| Мінімальна | 1–2 точки            | Низька               | Дефектація               |
| Розширена  | 3–5 точок            | Середня              | Поточний контроль        |
| Повна      | 6 і більше           | Висока               | Остаточний контроль      |

Наступним напрямом є зниження впливу умов проведення вимірювань. Температурні коливання, вібрації та забруднення поверхонь істотно впливають на точність вимірювань. Тому доцільно передбачати термостабілізацію деталей, організацію спеціалізованих зон вимірювання або застосування поправок, що враховують вплив зовнішніх факторів.

Не менш важливим є управління похибками та невизначеністю вимірювань. Впровадження процедур оцінювання невизначеності дозволяє не лише кількісно оцінити якість вимірювань, але й підвищити обґрунтованість технічних рішень щодо придатності деталей. Для цього

необхідно забезпечити регулярне калібрування засобів вимірювання, аналіз джерел похибок і застосування статистичних методів обробки результатів.

Таблиця 3.3 – Основні заходи з управління точністю вимірювань

| Захід                  | Мета                           | Результат                   |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Калібрування приладів  | Усунення систематичних похибок | Підвищення достовірності    |
| Стандартизація методик | Зменшення методичних помилок   | Відтворюваність             |
| Статистична обробка    | Аналіз розсіювання             | Зниження випадкових похибок |

Важливим напрямом удосконалення є підвищення кваліфікації персоналу, який виконує вимірювальні операції. Навіть сучасні засоби вимірювання не забезпечують необхідної точності без належної підготовки операторів. Навчання персоналу методам точного базування, правилам експлуатації приладів і принципам оцінювання результатів вимірювань дозволяє суттєво знизити кількість грубих похибок.

Комплексна реалізація зазначених напрямів удосконалення створює передумови для переходу до системного управління точністю вимірювань при ремонті пар тертя. Це, у свою чергу, забезпечує підвищення якості ремонтно-відновлювальних робіт, зниження ймовірності повторного зношування та збільшення ресурсу відновлених вузлів.

Таким чином, обґрунтовані напрями удосконалення точності вимірювань є методичною та практичною основою для розроблення конкретних технічних рішень і рекомендацій, які будуть детально розглянуті у наступних підрозділах третього розділу дипломної роботи.

### 3.2. Удосконалення засобів вимірювання при ремонті пар тертя

Одним з ключових шляхів підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя є удосконалення та раціональний вибір засобів вимірювання з урахуванням характеру контрольованих параметрів, умов проведення вимірювань і вимог до достовірності результатів. У ремонтному виробництві традиційно застосовується широкий спектр універсальних вимірювальних засобів, однак їх метрологічні можливості не завжди відповідають сучасним вимогам до точності та повторюваності.

Проведений у попередніх розділах аналіз показав, що значна частина похибок при вимірюванні параметрів пар тертя пов'язана саме з обмеженими характеристиками застосовуваних засобів вимірювання, їх зношеністю або невідповідністю умовам експлуатації. Тому удосконалення засобів вимірювання слід розглядати як системний процес, що включає модернізацію приладів, впровадження цифрових і автоматизованих рішень, а також оптимізацію їх використання на різних етапах ремонту.

Першим напрямом удосконалення є заміна застарілих аналогових засобів вимірювання на цифрові. Цифрові прилади забезпечують більш високу роздільну здатність, зменшують похибки зчитування та дозволяють автоматизувати фіксацію результатів вимірювань. Це особливо важливо при контролі геометричних параметрів пар тертя з мікрометровими допусками.

Таблиця 3.4 – Порівняння аналогових і цифрових засобів вимірювання

| Характеристика             | Аналогові засоби | Цифрові засоби |
|----------------------------|------------------|----------------|
| Точність зчитування        | Середня          | Висока         |
| Вплив оператора            | Значний          | Мінімальний    |
| Можливість автоматизації   | Обмежена         | Висока         |
| Документування результатів | Ручне            | Автоматичне    |

Другим важливим напрямом є впровадження спеціалізованих вимірювальних засобів, адаптованих до конструктивних особливостей деталей пар тертя. До таких засобів належать високоточні нутроміри з цифровою індикацією, мікрометри з підвищеною стабільністю вимірювального зусилля, профілометри для контролю мікрогеометрії поверхонь та комбіновані прилади, що дозволяють одночасно контролювати кілька параметрів.

Застосування спеціалізованих приладів дозволяє скоротити кількість допоміжних операцій, зменшити ймовірність помилок базування та підвищити відтворюваність результатів вимірювань. Особливо це актуально для внутрішніх поверхонь втулок і гільз, де доступ до зони вимірювання є обмеженим.

Таблиця 3.5 – Спеціалізовані засоби вимірювання для ремонту пар тертя

| Засіб вимірювання              | Контрольовані параметри | Переваги                 |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Цифровий нутромір              | Внутрішні діаметри      | Висока точність          |
| Мікрометр з обмеженням зусилля | Зовнішні діаметри       | Стабільність результатів |
| Профілометр                    | Шорсткість поверхні     | Контроль мікрогеометрії  |
| Комбіновані прилади            | Кілька параметрів       | Скорочення часу контролю |

Третім напрямом удосконалення є використання автоматизованих і напіваавтоматизованих засобів вимірювання. Автоматизовані вимірювальні системи дозволяють виконувати серії вимірювань за заданим алгоритмом, знижуючи вплив людського фактора та підвищуючи повторюваність результатів. У ремонтному виробництві доцільно застосовувати автоматизовані стенди для контролю геометрії та параметрів форми пар тертя.

Окрему увагу слід приділити інтеграції засобів вимірювання з інформаційними системами підприємства. Передача результатів вимірювань у цифровому вигляді дозволяє забезпечити простежуваність даних, виконувати статистичний аналіз якості ремонту та оперативно виявляти відхилення від нормативних значень.

Таблиця 3.6 – Рівні автоматизації засобів вимірювання

| Рівень            | Характеристика       | Очікуваний ефект           |
|-------------------|----------------------|----------------------------|
| Ручний            | Аналогові прилади    | Базовий контроль           |
| Напівавтоматичний | Цифрові прилади      | Підвищення точності        |
| Автоматизований   | Вимірювальні системи | Максимальна повторюваність |

Не менш важливим аспектом удосконалення засобів вимірювання є забезпечення їх метрологічної справності. Регулярне калібрування, перевірка та технічне обслуговування вимірювальних засобів дозволяють зменшити систематичні похибки та підтримувати стабільність метрологічних характеристик протягом усього терміну експлуатації приладів.

У процесі удосконалення засобів вимірювання доцільно також враховувати економічні аспекти. Вибір надто дорогих приладів без належного завантаження може бути економічно необґрунтованим, тоді як раціональне поєднання універсальних і спеціалізованих засобів вимірювання дозволяє досягти оптимального співвідношення між точністю, вартістю та ефективністю вимірювального контролю.

Таким чином, удосконалення засобів вимірювання при ремонті пар тертя повинно здійснюватися комплексно та включати модернізацію приладового парку, впровадження цифрових і автоматизованих рішень, застосування спеціалізованих вимірювальних засобів і забезпечення їх належного метрологічного обслуговування. Реалізація зазначених заходів створює необхідні умови для істотного підвищення точності вимірювань і якості ремонтно-відновлювальних робіт, що є основою для подальшого вдосконалення методик і організації вимірювального контролю.

### 3.3. Удосконалення методик вимірювання при ремонті пар тертя

Підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя неможливе лише за рахунок удосконалення засобів вимірювання. Не менш важливим є вдосконалення методик вимірювання, які визначають послідовність дій, умови виконання вимірювальних операцій, правила вибору контрольних точок і способи обробки результатів. Саме методика є ланкою, що поєднує технічні можливості вимірювальних засобів із реальними умовами ремонтного виробництва.

Аналіз практики ремонтних підприємств показує, що методики вимірювання часто мають узагальнений характер і не враховують специфіку пар тертя, нерівномірність їх зношування та вплив експлуатаційних факторів. Це призводить до виникнення методичних похибок і зниження достовірності результатів контролю. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення та впровадження удосконалених методик вимірювання, адаптованих до конкретних типів пар тертя та етапів ремонтно-відновлювальних робіт.

Першим напрямом удосконалення є структуризація методик вимірювання за етапами ремонту. На стадії дефектації основною метою вимірювань є виявлення ступеня зношування та прийняття рішення щодо доцільності ремонту. На етапах механічної та фінішної обробки методики повинні забезпечувати контроль припусків і досягнення заданих геометричних параметрів. Остаточний контроль потребує найбільш точних і повних методик, орієнтованих на підтвердження відповідності деталей установленим вимогам.

Таблиця 3.7 – Орієнтація методик вимірювання за етапами ремонту пар тертя

| Етап ремонту        | Основна мета методики | Характер вимірювань |
|---------------------|-----------------------|---------------------|
| Дефектація          | Оцінка зношування     | Орієнтовні          |
| Попередня обробка   | Контроль припусків    | Технологічні        |
| Фінішна обробка     | Досягнення точності   | Прецизійні          |
| Остаточний контроль | Підтвердження якості  | Комплексні          |

Другим важливим напрямом є впровадження багатоточкових методик вимірювання. Для пар тертя характерне локальне та нерівномірне зношування, тому вимірювання в одній або двох точках не дає об'єктивної оцінки стану поверхні. Удосконалені методики повинні передбачати вимірювання у кількох зонах по довжині та периметру деталі з подальшим аналізом розподілу отриманих значень.

Особливо ефективним є застосування методик із фіксованою схемою розташування контрольних точок, що забезпечує відтворюваність вимірювань і можливість порівняння результатів до та після ремонту.

Таблиця 3.8 – Порівняння одно- та багатоточкових методик вимірювання

| Методика    | Кількість точок | Інформативність | Достовірність |
|-------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Одноточкова | 1               | Низька          | Низька        |

Продовження табл.3.8

|               |              |         |         |
|---------------|--------------|---------|---------|
| 1             | 2            | 3       | 4       |
| Обмежена      | 2–3          | Середня | Середня |
| Багатоточкова | 4–8 і більше | Висока  | Висока  |

Наступним напрямом удосконалення є стандартизація умов проведення вимірювань, яка передбачає регламентацію температурного режиму, часу витримки деталей перед вимірюванням, стану поверхні та способів базування. Встановлення єдиних вимог до умов вимірювання дозволяє суттєво зменшити вплив зовнішніх факторів і підвищити повторюваність результатів.

Важливим елементом удосконалених методик є включення процедур оцінювання похибок і невизначеності вимірювань. Методика повинна містити рекомендації щодо кількості повторних вимірювань, способів статистичної обробки результатів та правил прийняття рішень з урахуванням невизначеності. Це особливо актуально при контролі параметрів з малими допусками, коли невизначеність може бути співмірною з допустимими відхиленнями.

Таблиця 3.9 – Основні елементи удосконаленої методики вимірювання

|                         |                |                         |
|-------------------------|----------------|-------------------------|
| Елемент методики        | Призначення    | Очікуваний ефект        |
| Вибір контрольних точок | Повнота оцінки | Зниження ризику помилок |

Продовження табл.3.9

| 1                         | 2                            | 3                              |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Регламентация умов        | Стабільність вимірювань      | Підвищення повторюваності      |
| Повторні вимірювання      | Зменшення випадкових похибок | Підвищення точності            |
| Оцінювання невизначеності | Обґрунтованість рішень       | Зниження метрологічних ризиків |

Суттєве значення має інтеграція методик вимірювання з технологічним процесом ремонту. Вимірювальні операції повинні бути логічно вписані в технологічний маршрут і виконуватися у моменти, коли їх результати можуть бути оперативно використані для коригування технологічних параметрів. Такий підхід дозволяє запобігати накопиченню відхилень і зменшувати кількість повторних операцій.

Окремо слід відзначити доцільність уніфікації методик вимірювання для однотипних пар тертя. Це спрощує підготовку персоналу, зменшує ймовірність помилок і забезпечує єдиний підхід до оцінювання якості ремонту на підприємстві.

Таким чином, удосконалення методик вимірювання при ремонті пар тертя є важливим складником підвищення точності вимірювального контролю. Запропоновані напрями дозволяють мінімізувати методичні похибки, підвищити відтворюваність результатів і забезпечити обґрунтованість технічних рішень. Реалізація удосконалених методик у поєднанні з сучасними засобами вимірювання створює передумови для істотного підвищення якості ремонтно-відновлювальних робіт, що буде розвинуто у наступних підрозділах дипломної роботи.

### 3.4. Удосконалення організації вимірювального контролю при ремонті пар тертя

Організація вимірювального контролю є одним з ключових чинників забезпечення високої точності вимірювань при ремонті пар тертя. Навіть за умови застосування сучасних засобів вимірювання та удосконалених методик відсутність чіткої організаційної структури контролю призводить до зростання похибок, втрати простежуваності результатів і зниження якості ремонтно-відновлювальних робіт. Тому удосконалення організації вимірювального контролю слід розглядати як системний процес, що охоплює планування вимірювань, розподіл відповідальності, регламентацію процедур та управління вимірювальною інформацією.

У процесі ремонту пар тертя вимірювальний контроль повинен здійснюватися безперервно та послідовно на всіх етапах технологічного процесу. Контроль лише на завершальній стадії ремонту є недостатнім, оскільки не дозволяє своєчасно виявляти відхилення та коригувати технологічні параметри. Удосконалена організація контролю передбачає інтеграцію вимірювальних операцій у технологічний маршрут ремонту з чітким визначенням місця, часу та відповідальних осіб.

Таблиця 3.10 – Місце вимірювального контролю у технологічному процесі ремонту пар тертя

| Етап ремонту        | Мета контролю               | Роль вимірювань              |
|---------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Дефектація          | Оцінка стану деталей        | Прийняття рішення про ремонт |
| Механічна обробка   | Контроль припусків          | Запобігання перевитратам     |
| Фінішна обробка     | Забезпечення точності       | Формування геометрії         |
| Остаточний контроль | Підтвердження відповідності | Гарантія якості              |

Важливим елементом удосконалення організації вимірювального контролю є чіткий розподіл функцій і відповідальності між працівниками. Вимірювальні операції повинні виконуватися персоналом, який має відповідну кваліфікацію та підготовку з метрології. Доцільним є виділення відповідальних осіб або підрозділів, що здійснюють методичний супровід вимірювань і контроль дотримання встановлених процедур.

Особливу увагу слід приділяти організації робочих місць для виконання вимірювань. Вимірювальні операції повинні виконуватися в умовах, що мінімізують вплив зовнішніх факторів: температурних коливань, вібрацій, забруднення поверхонь. За можливості доцільно створювати спеціалізовані вимірювальні зони або пости, оснащені необхідними засобами вимірювання та допоміжним обладнанням.

Таблиця 3.11 – Вимоги до організації робочих місць вимірювального контролю

| Параметр            | Вимоги     | Очікуваний результат          |
|---------------------|------------|-------------------------------|
| Температурний режим | Стабільний | Зменшення теплових похибок    |
| Віб्राції           | Мінімальні | Підвищення повторюваності     |
| Чистота             | Висока     | Достовірність вимірювань      |
| Освітлення          | Нормоване  | Зниження суб'єктивних помилок |

Наступним напрямом удосконалення є регламентація процедур вимірювального контролю. Усі вимірювальні операції повинні виконуватися відповідно до затверджених інструкцій і методик, що визначають послідовність дій, умови вимірювань, порядок фіксації результатів та критерії прийняття рішень. Відсутність чітких регламентів часто призводить до різночитань результатів і зниження їх відтворюваності.

Важливою складовою організації вимірювального контролю є документування та облік результатів вимірювань. Систематичне ведення протоколів вимірювань дозволяє забезпечити простежуваність даних, виконувати аналіз якості ремонту та виявляти тенденції зміни параметрів пар тертя. Удосконалена система документації повинна передбачати збереження результатів вимірювань на всіх етапах ремонту та їх прив'язку до конкретних деталей і технологічних операцій.

Таблиця 3.12 – Порівняння традиційної та удосконаленої системи документування вимірювань

| Ознака             | Традиційна система | Удосконалена система |
|--------------------|--------------------|----------------------|
| Форма записів      | Ручна              | Цифрова              |
| Повнота даних      | Обмежена           | Повна                |
| Простежуваність    | Низька             | Висока               |
| Можливість аналізу | Обмежена           | Розширена            |

Сучасним напрямом удосконалення організації вимірювального контролю є використання інформаційних технологій. Автоматизований збір і зберігання вимірювальних даних, використання програмних засобів для аналізу результатів і формування звітів дозволяють оперативно виявляти відхилення та приймати обґрунтовані управлінські рішення. Такий підхід сприяє переходу від реактивного до превентивного управління якістю ремонту.

Не менш важливим аспектом є планування та періодичний перегляд системи вимірювального контролю. Удосконалена організація контролю повинна бути гнучкою та адаптуватися до змін технологічних процесів, номенклатури деталей і вимог до точності. Регулярний аналіз ефективності вимірювального контролю дозволяє своєчасно виявляти слабкі місця та вживати коригувальних заходів.

Таким чином, удосконалення організації вимірювального контролю при ремонті пар тертя є необхідною умовою підвищення точності вимірювань і стабільної якості ремонтно-відновлювальних робіт. Комплексний підхід, що включає інтеграцію вимірювань у технологічний процес, оптимізацію умов контролю, регламентацію процедур і впровадження інформаційних технологій, створює передумови для

зниження метрологічних ризиків і підвищення надійності відновлених вузлів. Запропоновані положення є основою для подальшого обґрунтування ефективності запропонованих заходів, що буде розглянуто у наступних підрозділах дипломної роботи.

### 3.5. Оцінювання ефективності запропонованих заходів з підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя

Запропоновані у попередніх підрозділах заходи з удосконалення засобів, методик та організації вимірювального контролю потребують комплексного оцінювання їх ефективності. Таке оцінювання є необхідним для обґрунтування доцільності впровадження запропонованих рішень у практику ремонтно-відновлювального виробництва та підтвердження їх позитивного впливу на якість ремонту пар тертя.

Ефективність заходів з підвищення точності вимірювань доцільно розглядати з технічної, метрологічної, організаційної та економічної точок зору. Комплексний підхід дозволяє оцінити не лише покращення метрологічних характеристик вимірювань, але й їх вплив на загальну результативність ремонтного процесу та експлуатаційні показники відновлених вузлів.

#### Технічна та метрологічна ефективність

Технічна ефективність запропонованих заходів проявляється у зниженні похибок і невизначеності вимірювань геометричних та мікрогеометричних параметрів пар тертя. Впровадження удосконалених засобів вимірювання, стандартизованих методик і оптимізованих схем контролю дозволяє істотно підвищити повторюваність результатів і зменшити вплив людського фактора.

Зменшення сумарної похибки вимірювань сприяє більш точному формуванню зазорів у парах тертя, що безпосередньо впливає на умови

змащування, рівень контактних напружень та інтенсивність зношування. У результаті підвищується стабільність роботи відновлених вузлів і збільшується їх ресурс.

Таблиця 3.13 – Порівняльна оцінка точності вимірювань до і після впровадження заходів

| Показник                    | До впровадження | Після впровадження |
|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| Середня похибка вимірювання | Підвищена       | Знижена            |
| Повторюваність результатів  | Середня         | Висока             |
| Вплив оператора             | Значний         | Мінімальний        |
| Невизначеність вимірювань   | Висока          | Знижена            |

Організаційна ефективність запропонованих заходів полягає у впорядкуванні вимірювального контролю та підвищенні керованості ремонтного процесу. Чітка регламентація процедур вимірювання, розподіл відповідальності та впровадження системи документування результатів забезпечують простежуваність даних і знижують ймовірність помилкових рішень.

Удосконалена організація вимірювального контролю дозволяє своєчасно виявляти відхилення параметрів і коригувати технологічні режими, що зменшує кількість повторних операцій та браку. Крім того, накопичення вимірювальної інформації створює основу для аналізу тенденцій зношування та оптимізації технологій ремонту.

Таблиця 3.14 – Вплив удосконалення організації контролю на ремонтний процес

| Критерій                     | Традиційна організація | Удосконалена організація |
|------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Кількість повторних операцій | Підвищена              | Знижена                  |
| Час прийняття рішень         | Значний                | Скорочений               |
| Простежуваність результатів  | Обмежена               | Повна                    |
| Керованість процесу          | Низька                 | Висока                   |

Економічна ефективність впровадження запропонованих заходів зумовлена зменшенням витрат, пов'язаних із повторними ремонтами, браком деталей і передчасними відмовами відновлених вузлів. Підвищення точності вимірювань дозволяє більш раціонально використовувати матеріальні та трудові ресурси, зменшити перевитрати на механічну обробку та скоротити тривалість ремонтних операцій.

Хоча впровадження сучасних засобів вимірювання та автоматизованих систем потребує певних початкових інвестицій, ці витрати компенсуються за рахунок підвищення якості ремонту, збільшення ресурсу пар тертя та зниження експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі.

Таблиця 3.15 – Основні складові економічного ефекту від підвищення точності вимірювань

| Джерело ефекту              | Характер впливу                  |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Зменшення браку             | Скорочення матеріальних втрат    |
| Зниження повторних ремонтів | Економія трудових ресурсів       |
| Підвищення ресурсу вузлів   | Зменшення експлуатаційних витрат |
| Оптимізація обробки         | Зниження енергоспоживання        |

Комплексне оцінювання ефективності запропонованих заходів свідчить, що їх впровадження забезпечує суттєве підвищення точності та достовірності вимірювань при ремонті пар тертя, покращує організацію вимірювального контролю та має позитивний економічний ефект. Найбільший результат досягається за умови комплексної реалізації заходів, коли удосконалення засобів вимірювання поєднується з удосконаленням методик і організації контролю.

Таким чином, запропоновані у третьому розділі технічні та організаційні рішення є ефективними і доцільними для впровадження у практику ремонтно-відновлювальних підприємств. Отримані результати підтверджують можливість істотного підвищення якості ремонту пар тертя та створюють передумови для подальшого вдосконалення метрологічного забезпечення ремонтних процесів.

3.6. Забезпечення стабільності та простежуваності результатів вимірювань при ремонті пар тертя

Однією з ключових умов підвищення якості ремонтно-відновлювальних робіт є забезпечення стабільності та простежуваності результатів вимірювань. Навіть за наявності удосконалених засобів і методик вимірювання відсутність системи контролю стабільності вимірювальних процесів призводить до накопичення похибок, втрати достовірності результатів і зниження ефективності прийняття технічних рішень.

Стабільність вимірювань означає здатність вимірювальної системи зберігати незмінні метрологічні характеристики протягом визначеного часу та за заданих умов експлуатації. Для ремонтних процесів, пов'язаних з відновленням пар тертя, стабільність вимірювань є особливо важливою, оскільки контроль параметрів здійснюється на різних етапах ремонту та часто різними виконавцями.

Простежуваність результатів вимірювань забезпечує можливість встановлення зв'язку між отриманими результатами та національними або міжнародними еталонами одиниць вимірювання через безперервний ланцюг калібрувань і перевірок. В умовах ремонтного виробництва простежуваність є основою довіри до результатів вимірювань і необхідною умовою функціонування системи управління якістю.

#### Забезпечення стабільності вимірювальних процесів

Для забезпечення стабільності вимірювань при ремонті пар тертя необхідно реалізувати комплекс організаційних і технічних заходів, що охоплюють контроль стану засобів вимірювання, умов їх експлуатації та дотримання встановлених методик.

Основним інструментом забезпечення стабільності є регулярне калібрування та повірка засобів вимірювання, що дозволяє своєчасно виявляти відхилення їх метрологічних характеристик і запобігати виникненню систематичних похибок.

Таблиця 3.16 – Заходи забезпечення стабільності вимірювань при ремонті пар тертя

| Захід                    | Періодичність      | Очікуваний ефект               |
|--------------------------|--------------------|--------------------------------|
| Калібрування приладів    | Згідно з графіком  | Усунення систематичних похибок |
| Перевірка працездатності | Перед вимірюванням | Запобігання грубим помилкам    |
| Контроль умов середовища | Постійно           | Стабільність результатів       |
| Аналіз повторюваності    | Періодично         | Виявлення нестабільності       |

Важливим аспектом є моніторинг повторюваності результатів вимірювань. Аналіз серій вимірювань дозволяє оцінити стабільність вимірювального процесу та своєчасно виявити тенденції до зростання розсіювання результатів. У разі виявлення нестабільності необхідно проводити коригувальні заходи, зокрема перевірку приладів, уточнення методик або навчання персоналу.

#### Забезпечення простежуваності результатів вимірювань

Простежуваність результатів вимірювань при ремонті пар тертя досягається шляхом формування та підтримання єдиного ланцюга метрологічного забезпечення, що включає еталони, робочі засоби вимірювання та методики контролю.

Для кожного засобу вимірювання повинні бути наявні документи, що підтверджують його метрологічну справність і зв'язок з еталонами. Відсутність таких документів робить результати вимірювань формально

недостовірними та унеможлиблює їх використання для прийняття відповідальних технічних рішень.

Таблиця 3.17 – Основні елементи системи простежуваності вимірювань

| Елемент                   | Призначення            | Роль у системі             |
|---------------------------|------------------------|----------------------------|
| Еталони                   | Відтворення одиниць    | Базовий рівень             |
| Засоби вимірювання        | Виконання вимірювань   | Робочий рівень             |
| Калібрувальні сертифікати | Підтвердження точності | Документальне забезпечення |
| Методики вимірювання      | Єдність підходів       | Відтворюваність            |

Значну роль у забезпеченні простежуваності відіграє система документування вимірювань, яка повинна забезпечувати збереження інформації про всі виконані вимірювання, застосовані засоби, умови їх проведення та результати. Така система дозволяє здійснювати аналіз якості ремонту, проводити аудит вимірювальних процесів і підтверджувати відповідність виконаних робіт вимогам стандартів.

Інтеграція стабільності та простежуваності у систему управління якістю

Стабільність і простежуваність вимірювань повинні бути інтегровані у систему управління якістю ремонтного підприємства. Це передбачає розроблення відповідних процедур, визначення відповідальності персоналу та регулярний аналіз ефективності вимірювального контролю.

Інтеграція вимірювальних процесів у систему управління якістю дозволяє забезпечити безперервне вдосконалення ремонтних технологій,

підвищити довіру до результатів контролю та зменшити ймовірність виникнення дефектів у відновлених парах тертя.

Таблиця 3.18 – Вплив стабільності та простежуваності на якість ремонту

| Показник                 | Без системи      | З інтегрованою системою |
|--------------------------|------------------|-------------------------|
| Достовірність вимірювань | Низька           | Висока                  |
| Кількість спірних рішень | Підвищена        | Мінімальна              |
| Якість ремонту           | Нестабільна      | Стабільна               |
| Ресурс вузлів            | Непередбачуваний | Прогнозований           |

Таким чином, забезпечення стабільності та простежуваності результатів вимірювань є необхідною умовою реалізації запропонованих заходів з підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя. Реалізація комплексного підходу до стабілізації вимірювальних процесів і формування системи простежуваності дозволяє забезпечити високу достовірність результатів контролю, підвищити якість ремонтно-відновлювальних робіт і створити надійну основу для подальшого вдосконалення технологій ремонту.

### Висновки до розділу 3

У третьому розділі дипломної роботи розроблено та обґрунтовано комплекс практичних заходів, спрямованих на удосконалення точності

вимірювань при ремонті пар тертя, що базуються на результатах теоретичного аналізу та досліджень, виконаних у попередніх розділах.

У результаті проведених досліджень встановлено, що підвищення точності вимірювань при ремонті пар тертя можливе лише за умови системного підходу, який поєднує удосконалення засобів вимірювання, методик вимірювання та організації вимірювального контролю. Доведено, що ізольоване застосування окремих технічних або організаційних заходів не забезпечує стабільного зростання точності та достовірності результатів вимірювань.

Обґрунтовано основні напрями удосконалення точності вимірювань, серед яких ключовими є модернізація парку засобів вимірювання з переходом на цифрові та автоматизовані прилади, впровадження спеціалізованих вимірювальних засобів для контролю геометричних і мікрогеометричних параметрів пар тертя, а також раціональне поєднання контактних і безконтактних методів контролю залежно від етапу ремонтно-відновлювальних робіт.

У процесі розроблення удосконалених методик вимірювання доведено доцільність застосування багатоточкових схем контролю, стандартизації умов проведення вимірювань та впровадження процедур оцінювання похибок і невизначеності вимірювань. Показано, що зазначені заходи дозволяють зменшити вплив методичних і випадкових похибок, підвищити повторюваність результатів та обґрунтованість прийняття технічних рішень.

Особливу увагу в розділі приділено удосконаленню організації вимірювального контролю при ремонті пар тертя. Встановлено, що інтеграція вимірювальних операцій у технологічний процес ремонту, чіткий розподіл відповідальності між виконавцями, регламентація процедур контролю та впровадження системи документування результатів вимірювань істотно знижують метрологічні ризики та підвищують керованість ремонтного процесу.

Виконано комплексне оцінювання технічної, метрологічної, організаційної та економічної ефективності запропонованих заходів. Показано, що їх впровадження забезпечує зниження похибок і невизначеності вимірювань, зменшення кількості повторних ремонтних операцій, підвищення якості відновлених пар тертя та збільшення їх експлуатаційного ресурсу.

Доведено, що забезпечення стабільності та простежуваності результатів вимірювань є необхідною умовою довгострокової ефективності удосконалених вимірювальних процесів. Реалізація системи калібрування, моніторингу повторюваності та документального супроводу вимірювань дозволяє інтегрувати вимірювальний контроль у систему управління якістю ремонтного підприємства та забезпечити безперервне вдосконалення ремонтних технологій.

Таким чином, результати третього розділу підтверджують доцільність і практичну значущість запропонованих заходів з удосконалення точності вимірювань при ремонті пар тертя. Отримані висновки є основою для подальшого аналізу економічної ефективності та питань охорони праці, а також для формування загальних висновків дипломної роботи.

#### 4 Охорона праці та безпека виробничої діяльності

4.1. Аналіз умов праці та небезпечних і шкідливих виробничих факторів при виконанні вимірювальних робіт під час ремонту пар тертя

Ремонт пар тертя із застосуванням високоточних вимірювальних операцій здійснюється в умовах ремонтно-відновлювального виробництва, яке характеризується наявністю значної кількості небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Проведення вимірювань геометричних, мікрогеометричних і фізико-механічних параметрів деталей вимагає тривалої зосередженої праці, точності рухів та стабільних умов навколишнього середовища, що підвищує вимоги до організації робочих місць і заходів з охорони праці.

Аналіз умов праці при виконанні вимірювальних робіт дозволяє встановити потенційні ризики для здоров'я персоналу та якості результатів вимірювань, а також визначити необхідні профілактичні та захисні заходи. Особливістю таких робіт є поєднання механічних, фізичних і психофізіологічних навантажень, що безпосередньо впливають як на безпеку праці, так і на точність вимірювального контролю.

#### Характеристика виробничого середовища

Вимірювальні роботи при ремонті пар тертя виконуються, як правило, у механічних або контрольно-вимірювальних ділянках ремонтних підприємств. Для таких ділянок характерна наявність працюючого обладнання, обертових частин, джерел шуму, вібрації та підвищеної запиленості, що створює додаткові ризики для персоналу.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики умов праці при вимірювальних роботах

| Параметр       | Характеристика      |
|----------------|---------------------|
| Тип приміщення | Виробниче, ремонтне |

|                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| Режим роботи        | Змінний               |
| Освітлення          | Штучне та комбіноване |
| Температурний режим | Нестабільний          |
| Рівень шуму         | Підвищений            |
| Наявність вібрацій  | Можлива               |
| Запиленість повітря | Середня               |

Нестабільність мікроклімату та вплив шуму й вібрацій негативно впливають не лише на самопочуття працівників, але й на результати вимірювань, зокрема при контролі мікрорельєфу поверхонь і малих відхилень геометричних параметрів.

#### Небезпечні та шкідливі виробничі фактори

У процесі виконання вимірювальних робіт при ремонті пар тертя персонал піддається дії низки небезпечних і шкідливих факторів, які можуть бути класифіковані за їх природою.

Таблиця 4.2 – Класифікація небезпечних і шкідливих виробничих факторів

| Група факторів | Приклади                                         |
|----------------|--------------------------------------------------|
| Механічні      | Рухомі частини обладнання, гострі кромки деталей |

Продовження табл.4.2

| 1       | 2                                    |
|---------|--------------------------------------|
| Фізичні | Шум, вібрація, недостатнє освітлення |

|                   |                                                        |
|-------------------|--------------------------------------------------------|
| Хімічні           | Мастильно-охолоджувальні рідини, аерозолі              |
| Психофізіологічні | Зорове напруження, монотонність, статичні навантаження |

Особливу небезпеку становлять механічні фактори, пов'язані з можливістю травмування при контакті з деталями або вимірювальними пристроями. Психофізіологічні фактори, у свою чергу, призводять до втоми оператора, що може викликати помилки при зчитуванні показів і зниження достовірності вимірювань.

#### Оцінювання рівня ризиків

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно оцінити рівень професійних ризиків, пов'язаних з виконанням вимірювальних операцій. Оцінювання ризиків дозволяє визначити пріоритетні напрями впровадження захисних заходів.

Таблиця 4.3 – Оцінка професійних ризиків при вимірювальних роботах

| Небезпечний фактор | Ймовірність виникнення | Тяжкість наслідків | Рівень ризику |
|--------------------|------------------------|--------------------|---------------|
| Механічні травми   | Середня                | Висока             | Підвищений    |
| Вплив шуму         | Висока                 | Середня            | Середній      |

Продовження табл.4.3

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|

|                       |        |         |            |
|-----------------------|--------|---------|------------|
| Зорове перенапруження | Висока | Середня | Підвищений |
| Контакт з МОР         | Низька | Низька  | Допустимий |

Аналіз показує, що найбільш значущими є ризики, пов'язані з механічними травмами та психофізіологічним перенапруженням, які потребують першочергового впровадження профілактичних заходів.

Вплив умов праці на точність вимірювань

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори впливають не лише на безпеку персоналу, але й на метрологічну якість вимірювань. Підвищений рівень шуму та вібрації, нестабільність температури та недостатнє освітлення призводять до зростання похибок вимірювань і зниження повторюваності результатів.

Таким чином, забезпечення безпечних і комфортних умов праці при виконанні вимірювальних робіт є необхідною умовою реалізації запропонованих у третьому розділі заходів з підвищення точності вимірювань. Усунення або мінімізація дії небезпечних і шкідливих факторів дозволяє не лише знизити виробничий травматизм, але й підвищити достовірність та стабільність результатів контролю при ремонті пар тертя.

4.2. Заходи з охорони праці та безпеки при виконанні вимірювальних робіт під час ремонту пар тертя

Забезпечення безпечних умов праці при виконанні вимірювальних робіт є обов'язковою складовою організації ремонтно-відновлювального виробництва. Висока точність вимірювань геометричних і мікрогеометричних параметрів пар тертя можлива лише за умови мінімізації

впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів на персонал та вимірювальні процеси.

Запропоновані заходи з охорони праці спрямовані на усунення або зниження рівня професійних ризиків, підвищення безпеки виконання вимірювальних операцій та створення умов, що забезпечують стабільність і достовірність результатів вимірювань.

#### Організаційні заходи з охорони праці

Організаційні заходи є основою системи безпеки праці та передбачають чітке регламентування вимірювальних операцій, розподіл відповідальності та контроль за дотриманням вимог охорони праці.

До основних організаційних заходів належать:

- розроблення та впровадження інструкцій з охорони праці для персоналу, що виконує вимірювальні роботи;
- проведення вступного, первинного та періодичного інструктажів з охорони праці;
- допуск до вимірювальних робіт лише працівників, які пройшли навчання та перевірку знань;
- організація раціонального режиму праці та відпочинку з урахуванням підвищеного зорового та психоемоційного навантаження.

Таблиця 4.4 – Основні організаційні заходи з охорони праці

| Захід                       | Призначення                | Очікуваний результат |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------|
| Інструктаж персоналу        | Ознайомлення з небезпеками | Зниження травматизму |
| Регламентація процедур      | Уніфікація вимірювань      | Підвищення безпеки   |
| Контроль допуску            | Запобігання помилкам       | Мінімізація ризиків  |
| Раціоналізація режиму праці | Зменшення втоми            | Підвищення точності  |

#### Технічні заходи безпеки

Технічні заходи спрямовані на зниження дії механічних і фізичних факторів шляхом удосконалення обладнання, організації робочих місць і застосування засобів колективного захисту.

Основними технічними заходами є:

- огороження рухомих частин обладнання та вимірювальних установок;
- застосування пристроїв фіксації деталей під час вимірювань;
- використання віброізоляційних опор і шумопоглинальних елементів;
- забезпечення стабільного мікроклімату та нормативного рівня освітлення.

Таблиця 4.5 – Технічні заходи зниження небезпечних факторів

| Небезпечний фактор    | Захід               | Ефект                        |
|-----------------------|---------------------|------------------------------|
| Рухомі частини        | Захисні огороження  | Усунення травм               |
| Вібрація              | Віброізоляція       | Підвищення точності          |
| Шум                   | Шумопоглинання      | Зниження навантаження        |
| Недостатнє освітлення | Локальне освітлення | Покращення зорового контролю |

Застосування технічних заходів безпеки не лише знижує ризик травмування, але й позитивно впливає на метрологічну якість вимірювань за рахунок зменшення зовнішніх впливів.

#### Засоби індивідуального захисту

У випадках, коли повністю усунути небезпечні фактори технічними засобами неможливо, необхідно застосовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ). Вони забезпечують додатковий рівень безпеки при виконанні вимірювальних операцій.

Таблиця 4.6 – Засоби індивідуального захисту при вимірювальних роботах

| Вид ЗІЗ          | Призначення        |
|------------------|--------------------|
| Захисні рукавиці | Захист від порізів |

Продовження табл.4.6

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| 1                       | 2                     |
| Захисні окуляри         | Захист органів зору   |
| Спецодяг                | Захист від забруднень |
| Антивібраційні рукавиці | Зниження вібрацій     |

Правильний вибір і використання ЗІЗ зменшує ризик професійних захворювань і сприяє безпечному виконанню робіт.

#### Пожежна та електробезпека

При виконанні вимірювальних робіт використовуються електричні вимірювальні прилади та допоміжне обладнання, що потребує дотримання вимог електробезпеки та пожежної безпеки. Основними заходами є заземлення обладнання, регулярна перевірка стану електропроводки та заборона використання несправних приладів.

Таблиця 4.7 – Заходи пожежної та електробезпеки

|                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| Захід                         | Призначення                  |
| Заземлення приладів           | Запобігання ураженню струмом |
| Перевірка кабелів             | Пожежна безпека              |
| Заборона пошкоджених приладів | Зниження аварій              |
| Наявність вогнегасників       | Ліквідація загорянь          |

Вплив заходів безпеки на точність вимірювань.

Запровадження комплексу заходів з охорони праці позитивно впливає не лише на безпеку персоналу, але й на точність і повторюваність результатів вимірювань. Зменшення фізичних і психофізіологічних навантажень дозволяє оператору зосередитися на виконанні вимірювальних операцій та знизити ймовірність помилок.

Таким чином, реалізація організаційних, технічних та індивідуальних заходів з охорони праці створює безпечні та комфортні умови виконання вимірювальних робіт при ремонті пар тертя і є необхідною умовою досягнення високої точності вимірювань та стабільної якості ремонтно-відновлювальних процесів.

#### 4.3. Пожежна та електробезпека під час виконання вимірювальних робіт при ремонті пар тертя

Виконання вимірювальних робіт у ремонтно-відновлювальних підрозділах пов'язане з використанням електричних вимірювальних приладів, освітлювального обладнання, допоміжних електроінструментів, а також з наявністю горючих матеріалів (мастильні матеріали, розчинники, промаслені ганчір'я). За таких умов дотримання вимог пожежної та електробезпеки є обов'язковою умовою безпечної організації праці та стабільності вимірювальних процесів.

Порушення вимог пожежної або електробезпеки може призвести не лише до травмування персоналу чи аварійних ситуацій, але й до виходу з ладу високоточних засобів вимірювання, втрати результатів контролю та зниження достовірності вимірювань.

##### Аналіз пожежної небезпеки при вимірювальних роботах

Пожежна небезпека при ремонті пар тертя обумовлена поєднанням джерел займання та горючих матеріалів. Особливу небезпеку становить

використання електричних приладів у безпосередній близькості до мастильних матеріалів і пилу металевго походження.

Таблиця 4.8 – Основні джерела пожежної небезпеки

| Джерело небезпеки     | Характер загрози  |
|-----------------------|-------------------|
| Електрообладнання     | Коротке замикання |
| Освітлювальні прилади | Перегрів          |
| Мастильні матеріали   | Займання          |
| Промаслені матеріали  | Самозаймання      |
| Металевий пил         | Підтримка горіння |

Для зменшення пожежної небезпеки необхідно мінімізувати кількість горючих матеріалів у зоні вимірювань, забезпечити регулярне прибирання робочих місць та дотримання вимог пожежного режиму.

#### Заходи пожежної безпеки

Система пожежної безпеки повинна включати комплекс організаційних, технічних та профілактичних заходів, спрямованих на запобігання виникненню пожеж і мінімізацію їх наслідків.

Таблиця 4.9 – Основні заходи пожежної безпеки

| Захід                     | Призначення              |
|---------------------------|--------------------------|
| Заборона відкритого вогню | Усунення джерел займання |

| 1                              | 2                               |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Регулярне прибирання           | Зменшення горючого навантаження |
| Контроль стану електропроводки | Запобігання замиканню           |
| Зберігання МОР у тарі          | Локалізація загрози             |
| Інструктаж персоналу           | Підвищення готовності           |

Важливим елементом пожежної безпеки є забезпечення приміщень первинними засобами пожежогасіння та вільний доступ до них.

Таблиця 4.10 – Первинні засоби пожежогасіння

| Засіб                      | Сфера застосування   |
|----------------------------|----------------------|
| Вогнегасники порошкові     | Електрообладнання    |
| Вогнегасники вуглекислотні | Точні прилади        |
| Пожежні щити               | Загальні потреби     |
| Пісок                      | Локалізація займання |

#### Аналіз електробезпеки при вимірювальних роботах

Електробезпека є критичною складовою охорони праці, оскільки вимірювальні прилади, що застосовуються при ремонті пар тертя, працюють від електричної мережі та мають підвищені вимоги до надійності живлення.

Основні ризики електробезпеки пов'язані з можливим ураженням електричним струмом у разі пошкодження ізоляції, неправильного підключення приладів або порушення правил експлуатації.

Таблиця 4.11 – Основні небезпечні фактори електробезпеки

| Фактор                | Потенційна небезпека |
|-----------------------|----------------------|
| Пошкоджена ізоляція   | Ураження струмом     |
| Волога                | Коротке замикання    |
| Перевантаження мережі | Перегрів             |
| Несправні прилади     | Аварійні ситуації    |

#### Заходи забезпечення електробезпеки

Для забезпечення електробезпеки при виконанні вимірювальних робіт необхідно суворо дотримуватися вимог експлуатації електрообладнання та застосовувати профілактичні заходи.

Таблиця 4.12 – Заходи з електробезпеки

| Захід                         | Призначення             |
|-------------------------------|-------------------------|
| Заземлення приладів           | Захист від ураження     |
| Періодична перевірка          | Виявлення несправностей |
| Використання ПЗВ              | Аварійне відключення    |
| Заборона ремонту під напругою | Запобігання травмам     |
| Допуск навченого персоналу    | Зниження ризиків        |

Особливу увагу слід приділяти використанню стабілізованих джерел живлення, що дозволяють захистити високоточні вимірювальні прилади від перепадів напруги та підвищити надійність результатів вимірювань.

Вплив пожежної та електробезпеки на точність вимірювань

Дотримання вимог пожежної та електробезпеки безпосередньо впливає на стабільність роботи вимірювальних систем. Відсутність аварійних ситуацій, перепадів напруги та перегріву обладнання забезпечує збереження метрологічних характеристик засобів вимірювання та підвищує повторюваність результатів контролю.

Таким чином, реалізація комплексу заходів з пожежної та електробезпеки є необхідною умовою безпечного виконання вимірювальних робіт при ремонті пар тертя, збереження працездатності вимірювального обладнання та досягнення високої точності вимірювань.

#### 4.4. Санітарно-гігієнічні вимоги, мікроклімат і ергономіка робочих місць при виконанні вимірювальних робіт

Виконання високоточних вимірювальних робіт при ремонті пар тертя висуває підвищені вимоги до санітарно-гігієнічних умов праці, параметрів мікроклімату та ергономіки робочих місць. Недотримання нормативних вимог у цій сфері призводить не лише до погіршення стану здоров'я персоналу, але й до зростання похибок вимірювань, зниження повторюваності результатів і підвищення ймовірності помилок оператора.

Особливістю вимірювальних робіт є тривала статична поза, значне зорове напруження та необхідність концентрації уваги на дрібних елементах деталей, що робить фактори мікроклімату й ергономіки критично важливими для забезпечення якості ремонтно-відновлювальних процесів.

Вимоги до мікроклімату виробничих приміщень

Мікроклімат робочих приміщень визначається сукупністю параметрів температури повітря, відносної вологості, швидкості руху повітря та теплового випромінювання. Для виконання вимірювальних робіт необхідно забезпечити стабільні параметри мікроклімату, оскільки температурні коливання безпосередньо впливають на лінійні розміри деталей і засобів вимірювання, а також на фізіологічний стан працівників.

Таблиця 4.13 Нормативні параметри мікроклімату при вимірювальних роботах

| Параметр                    | Оптимальне значення | Допустиме значення |
|-----------------------------|---------------------|--------------------|
| Температура повітря, °С     | 18–22               | 16–25              |
| Відносна вологість, %       | 40–60               | 30–70              |
| Швидкість руху повітря, м/с | $\leq 0,2$          | $\leq 0,3$         |
| Температурні коливання      | Мінімальні          | Обмежені           |

Підтримання стабільного мікроклімату зменшує температурні деформації деталей і приладів, що позитивно впливає на точність вимірювань та знижує невизначеність результатів.

#### Освітлення робочих місць

Освітлення є одним із ключових санітарно-гігієнічних факторів, що визначають умови виконання вимірювальних робіт. Недостатній рівень освітлення або наявність блисків і тіней призводять до зорового

перенапруження, швидкої втоми та зростання кількості помилок при зчитуванні показів вимірювальних приладів.

Для вимірювальних операцій доцільно застосовувати комбіноване освітлення, яке поєднує загальне рівномірне та локальне спрямоване освітлення.

Таблиця 4.14 – Вимоги до освітлення робочих місць

| Вид освітлення | Рівень освітленості, лк |
|----------------|-------------------------|
| Загальне       | 300–500                 |
| Локальне       | 500–1000                |
| Комбіноване    | До 1500                 |

Застосування локального освітлення з регульованим напрямком світлового потоку дозволяє покращити видимість мікрогеометрії поверхонь та підвищити точність візуального контролю.

#### Ергономічні вимоги до робочих місць

Ергономіка робочого місця має суттєвий вплив на безпеку праці та якість вимірювальних операцій. Нераціональна організація робочого простору призводить до надмірного м'язового напруження, зорової та психоемоційної втоми, що негативно позначається на точності вимірювань.

Основними ергономічними вимогами є зручне розташування засобів вимірювання, інструментів і контрольованих деталей у межах досяжності оператора, а також можливість регулювання положення робочої поверхні та сидіння.

Таблиця 4.15 – Основні ергономічні параметри робочого місця

| Параметр                    | Рекомендоване значення |
|-----------------------------|------------------------|
| Висота робочої поверхні, мм | 700–800                |
| Висота сидіння, мм          | 420–550                |
| Кут огляду                  | 15–30°                 |
| Зона досяжності рук         | До 500 мм              |

Раціональна ергономіка сприяє зниженню втоми оператора та забезпечує стабільність виконання вимірювальних операцій протягом робочої зміни.

Санітарно-гігієнічні вимоги та чистота робочої зони

Високоточні вимірювання при ремонті пар тертя вимагають підтримання чистоти робочих поверхонь і повітряного середовища. Наявність пилу, абразивних частинок і залишків мастильних матеріалів призводить до спотворення результатів вимірювань і підвищення зносу вимірювальних приладів.

Таблиця 4.16 – Санітарно-гігієнічні заходи забезпечення чистоти

| Захід                          | Призначення            |
|--------------------------------|------------------------|
| Регулярне прибирання           | Зменшення пилу         |
| Вологе очищення                | Усунення абразиву      |
| Місцева вентиляція             | Видалення аерозолів    |
| Зберігання приладів у футлярах | Захист від забруднення |

## Вплив санітарно-гігієнічних умов на точність вимірювань

Дотримання санітарно-гігієнічних вимог і ергономічних принципів безпосередньо впливає на точність, повторюваність і достовірність результатів вимірювань. Стабільний мікроклімат, достатній рівень освітлення та раціональна організація робочих місць знижують вплив зовнішніх факторів і людського чинника, що є особливо важливим при контролі параметрів пар тертя.

Таким чином, забезпечення належних санітарно-гігієнічних умов, оптимального мікроклімату та ергономіки робочих місць є необхідною складовою системи охорони праці при виконанні вимірювальних робіт і створює умови для досягнення високої точності вимірювань при ремонті пар тертя.

## Висновки до розділу 4

У четвертому розділі дипломної роботи виконано комплексний аналіз питань охорони праці, пожежної та електробезпеки, санітарно-гігієнічних умов і ергономіки робочих місць при виконанні вимірювальних робіт під час ремонту пар тертя. Розглянуті аспекти безпеки праці безпосередньо пов'язані з досягненням високої точності та стабільності результатів вимірювань.

У результаті аналізу умов праці встановлено, що вимірювальні роботи при ремонті пар тертя характеризуються наявністю комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких найбільш суттєвими є механічні небезпеки, вплив шуму та вібрації, зорове і психофізіологічне перенапруження персоналу, а також ризики, пов'язані з використанням електричного вимірювального обладнання.

Обґрунтовано доцільність впровадження системи організаційних і технічних заходів з охорони праці, спрямованих на мінімізацію професійних

ризиків. Показано, що чітка регламентація вимірювальних операцій, проведення інструктажів, застосування захисних огорожень, засобів індивідуального захисту та раціональна організація робочих місць істотно знижують імовірність травматизму та аварійних ситуацій.

У розділі доведено важливість дотримання вимог пожежної та електробезпеки при експлуатації вимірювальних приладів і допоміжного обладнання. Реалізація заходів з пожежної профілактики, заземлення електрообладнання, використання захисних пристроїв та регулярного контролю технічного стану електромереж забезпечує безпечні умови праці та сприяє збереженню працездатності високоточних засобів вимірювання.

Проаналізовано вплив санітарно-гігієнічних умов, параметрів мікроклімату та ергономіки робочих місць на фізіологічний стан працівників і точність виконання вимірювальних операцій. Встановлено, що забезпечення стабільного температурно-вологісного режиму, нормативного освітлення, чистоти робочої зони та ергономічного розміщення обладнання є необхідною умовою зниження похибок вимірювань і підвищення повторюваності результатів.

Таким чином, результати четвертого розділу підтверджують, що охорона праці та безпека виробничої діяльності є невід'ємною складовою системи забезпечення точності вимірювань при ремонті пар тертя. Реалізація запропонованих заходів створює безпечні та комфортні умови праці, знижує виробничі ризики, підвищує надійність вимірювального контролю та забезпечує стабільну якість ремонтно-відновлювальних робіт.

## Загальні висновки

У дипломній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу удосконалення точності вимірювання при ремонті пар тертя, що має важливе значення для підвищення якості ремонтно-відновлювальних робіт, надійності та довговічності машин і механізмів.

У ході виконання роботи проаналізовано сучасний стан проблеми вимірювального контролю при ремонті пар тертя та встановлено, що недостатня точність і нестабільність результатів вимірювань є одними з основних причин зниження якості ремонту, передчасного зношування відновлених вузлів і зростання експлуатаційних витрат. Показано, що традиційні методи й засоби вимірювання не завжди забезпечують необхідний рівень точності в умовах ремонтного виробництва.

На основі аналізу теоретичних засад метрологічного забезпечення обґрунтовано необхідність системного підходу до підвищення точності вимірювань, який поєднує удосконалення засобів вимірювання, методик вимірювання та організації вимірювального контролю. Встановлено, що лише комплексна реалізація зазначених складових дозволяє досягти стабільних і достовірних результатів вимірювань при ремонті пар тертя.

У роботі виконано детальний аналіз факторів, що впливають на точність вимірювання геометричних і мікрогеометричних параметрів пар тертя, та визначено основні джерела похибок і невизначеності. Обґрунтовано доцільність застосування сучасних цифрових і автоматизованих засобів вимірювання, комбінування контактних і безконтактних методів контролю, а також стандартизації умов проведення вимірювань.

Розроблено удосконалені методичні підходи до виконання вимірювальних операцій при ремонті пар тертя, які передбачають багатоточковий контроль параметрів, регламентацію послідовності

вимірювань, оцінювання похибок і невизначеності результатів. Показано, що впровадження запропонованих методик дозволяє зменшити вплив випадкових і систематичних похибок та підвищити повторюваність результатів вимірювань.

Особливу увагу приділено удосконаленню організації вимірювального контролю. Запропоновано заходи щодо інтеграції вимірювальних операцій у технологічний процес ремонту, забезпечення стабільності та простежуваності результатів вимірювань, впровадження системи документування та контролю стану засобів вимірювання. Доведено, що зазначені заходи сприяють зниженню метрологічних ризиків і підвищенню керованості ремонтного процесу.

Виконано оцінювання технічної, організаційної та економічної ефективності запропонованих заходів. Показано, що підвищення точності вимірювань забезпечує зменшення кількості повторних ремонтів, зниження рівня браку, збільшення ресурсу відновлених пар тертя та скорочення експлуатаційних витрат. Отримані результати підтверджують економічну доцільність впровадження запропонованих рішень у практику ремонтних підприємств.

У роботі також розглянуто питання охорони праці, пожежної та електробезпеки, санітарно-гігієнічних умов і ергономіки робочих місць. Доведено, що створення безпечних і комфортних умов праці є необхідною умовою забезпечення високої точності та стабільності результатів вимірювань при ремонті пар тертя.

Таким чином, у магістерській кваліфікаційній роботі поставлену мету досягнуто, а всі завдання, визначені у вступі, виконано в повному обсязі. Отримані результати підтверджують доцільність і ефективність запропонованих напрямів удосконалення метрологічного забезпечення нестандартних засобів вимірювальної техніки та можуть бути використані в практичній діяльності метрологічних служб підприємств.

## Список використаних джерел

1. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 16 с.
2. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 29 с.
3. ДСТУ ISO 10012:2005. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 20 с.
4. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 35 с.
5. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» №1314-VII від 05.06.2014.
6. ДСТУ EN ISO 4287:2012. Геометричні характеристики поверхні. Параметри шорсткості. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014. – 23 с.
7. ДСТУ ISO 25178-2:2015. Геометричні характеристики поверхні. Тривимірні параметри. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 44 с.
8. ДСТУ 2681–94. Засоби вимірювальної техніки. Терміни та визначення. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 18 с.
9. ДСТУ ISO 5725-1:2005. Точність (правильність і прецизійність) методів і результатів вимірювання. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 30 с.
10. ДСТУ ISO 5725-2:2005. Основний метод визначення повторюваності та відтворюваності. – Київ, 2007. – 34 с.
11. ДСТУ ISO 14253-1:2015. Геометричні допуски. Принципи приймання. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 22 с.

12. ДСТУ ISO 14253-2:2015. Геометричні допуски. Принципи підтвердження. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 19 с.
13. ДСТУ ISO 15530-3:2017. Визначення невизначеності вимірювань координат. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 27 с.
14. ДСТУ ISO 1:2015. Стандартна температура для геометричних вимірювань. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 6 с.
15. Коваль О. В. Метрологічне забезпечення машинобудівного виробництва : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 312 с.
16. Соколовський О. Л. Основи метрології та вимірювальної техніки. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 356 с.
17. Рибалко І. М. Трибологія та зносостійкість машин. – Харків : ХНТУСГ, 2017. – 284 с.
18. Базалєєв В. П. Тертя, зношування і змащування. – Київ : Наукова думка, 2016. – 402 с.
19. Кузьменко А. О. Вимірювання параметрів поверхонь деталей машин. – Дніпро : НГУ, 2018. – 245 с.
20. Жук Ю. М. Технологія відновлення деталей машин. – Київ : Ліра-К, 2020. – 318 с.
21. Павленко І. В. Ремонт і відновлення машин. – Харків : ХНТУ, 2019. – 290 с.
22. ISO/TR 16015:2003. Geometrical Product Specifications – Verification. – ISO, Geneva.
23. ISO 1101:2017. Geometrical tolerancing. – ISO, Geneva.
24. ISO 14253-3:2011. Decision rules for proving conformance. – ISO, Geneva.
25. ISO 8785:1998. Surface roughness measurement instruments. – ISO, Geneva.
26. Taylor Hobson. Surface Metrology Guide. – Leicester, UK, 2018. – 96 p.

27. Whitehouse D. Handbook of Surface Metrology. – CRC Press, 2011. – 1040 p.
28. Stachowiak G., Batchelor A. Engineering Tribology. – Elsevier, 2014. – 876 p.
29. Bhushan B. Introduction to Tribology. – Wiley, 2013. – 720 p.
30. ASTM E177–20. Use of Precision and Bias Data. – ASTM International, 2020.
31. ASTM D4060–19. Abrasion Resistance Testing. – ASTM, 2019.
32. Montgomery D. Introduction to Statistical Quality Control. – Wiley, 2019. – 752 p.
33. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to uncertainty. – BIPM.
34. JCGM 200:2012. International Vocabulary of Metrology (VIM). – BIPM.
35. ISO 25178-6:2010. Areal surface texture – Classification. – ISO.
36. ISO 3274:1996. Surface roughness – Contact instruments. – ISO.
37. ISO 4288:1996. Surface texture – Rules and procedures. – ISO.
38. De Chiffre L. Industrial Metrology. – Wiley, 2014. – 352 p.
39. Bosch R. Automotive Handbook. – Wiley, 2018. – 1096 p.
40. Kalpakjian S. Manufacturing Processes. – Pearson, 2017. – 1200 p.
41. Groover M. Fundamentals of Modern Manufacturing. – Wiley, 2020. – 1104 p.
42. Totten G. Handbook of Lubrication and Tribology. – CRC Press, 2019. – 1700 p.
43. Blau P. J. Friction Science and Technology. – CRC Press, 2015. – 464 p.
44. Hutchings I., Shipway P. Tribology: Friction and Wear. – Elsevier, 2017. – 410 p.

45. ASM Handbook. Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology. – ASM, 2017.
46. ISO 2768-1:2015. General tolerances. – ISO, Geneva.
47. ISO 8015:2011. GPS – Fundamental concepts. – ISO.
48. DIN EN ISO 1101:2017. Geometrical tolerancing. – DIN.
49. Slocum A. Precision Machine Design. – SME, 2019. – 700 p.
50. NPL Measurement Good Practice Guide No. 11. Surface Measurement. – UK, 2018.