

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

**Інженерно-технологічний факультет**

Кафедра інжинірингу технічних систем

**П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а**

до дипломної роботи

освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ МЕТОДІВ НЕРУЙНІВНОГО КО-  
НТРОЛЮ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНИХ  
ДВИГУНІВ**

**Виконав:** студент 2 курсу, групи МгМз-1-23  
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

\_\_\_\_\_ Колосов Станіслав Анатолійович

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Толстенко Олександр Васильович

**Рецензент:** \_\_\_\_\_

Дніпро 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: Інжинірингу технічних систем

Освітній ступінь: "Магістр"

Спеціальність: 208 "Агроінженерія"

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

К.Т.Н. ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024 р.

**З А В Д А Н Н Я**

**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Колосову Станіславові Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Обґрунтування раціональних методів неруйнівного контролю поверхонь деталей автотракторних двигунів

керівник роботи к.т.н. доц. Толстенко О.В.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від \_\_\_\_\_ 11.11.2024 року  
№ 3769

2. Строк подання студентом роботи до 1.10.2024

3. Вихідні дані до роботи Основи теорії тертя, зношування та пошкоджень поверхонь деталей автотракторних двигунів, Аналіз методів неруйнівного контролю. Визначення найчастіших дефектів та пошкоджень у деталей автотракторних двигунів, що виникають у процесі експлуатації. Огляд сучасного обладнання, що застосовується для методів неруйнівного контролю. Огляд сучасного обладнання, що застосовується для методів неруйнівного контролю.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Огляд літератури. 2. Моделювання напружено-деформованого стану основних деталей ДВЗ та умов виникнення тріщин і методів їх виявлення 3. Методичне забезпечення результатів експериментальних досліджень. 4. Безпека праці. 5. Економічна оцінка роботи. Загальні висновки. Література. Додатки

## 5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема (1 слайд, А4). 2. Мета і задачі досліджень (1 слайд, А4). 3. Переваги і недоліки дефектоскопії (1 слайд, А4). 4. Моделювання напружено-деформованого стану кривошипів (1 слайд, А4). 5. Сили, що діють на феромагнітну частинку (1 слайд, А4). 6. Методика проведення експериментальних досліджень (1 слайд, А4). 7. Експериментальна установка (1 слайд, А4). 8, 9. Результати експериментальних досліджень (2 слайд, А4). 10. Візуалізація способів намагнічування (1 слайд А4). 11. Небезпечні та шкідливі фактори (1 слайд, А4). 12. Економічні показники (1 слайд, А4). 13. Висновки (1 слайд, А4)

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ         | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|----------------|---|----------------|------------------|
|                |   | завдання видав | завдання прийняв |
| 1, 2,3, 4, 5   | Толстенко О.В., к.т.н., доцент            |                |                  |
| Нормоконтролер | Івлєв В.В., к.т.н., доцент                |                |                  |
|                |   |                |                  |
|                |   |                |                  |

7. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного проекту                | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--|-------------------------------|----------|
| 1     | Аналітичний розділ дослідження                 | до 2.10.2024                  |          |
| 2     | Теоретична основа дослідження                  | до 26.10.2024                 |          |
| 3     | Практичне підтвердження результатів            | до 16.11.2024                 |          |
| 4     | Розділ з охорони праці та забезпечення безпеки | до 21.11.2024                 |          |
| 5     | Економічний аналіз ефективності                | до 26.11.2024                 |          |
| 6     | Презентація результатів дослідження            | до 2.12.2024                  |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |
|       |  |                               |          |

Студент

\_\_\_\_\_ Колосов С.А. \_\_\_\_\_  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ Толстенко О.В. \_\_\_\_\_  
 (підпис) (прізвище та ініціали)

|                 |      |                      |                |                         |  |                            |          |          |         |
|-----------------|------|----------------------|----------------|-------------------------|--|----------------------------|----------|----------|---------|
| Керів. приміток |      | 46ДР.012 000. 000 ВР |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      | № п/п                | Формат         | Позначення              | Найменування                             | Кіл.аркуші<br>В            | № аркуша | Примітка |         |
| Слайд №         |      | 1                    |                |                         | Текстові документи                       |                            |          |          |         |
|                 |      | 2                    |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      | 3                    | A4             | 46ДР.012 0000.<br>000ПЗ | Пояснювальна<br>записка                  | 89                         |          |          |         |
|                 |      | 4                    |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      | 5                    |                |                         | Демонстраційні<br>матеріали              |                            |          |          |         |
| Лист і дата     |      |                      |                |                         | Слайди у форматі<br>Microsoft PowerPoint | 12                         |          |          |         |
|                 |      |                      |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      |                      |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      |                      |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      |                      |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      |                      |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      |                      |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      |                      |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      |                      |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      |                      |                |                         |  |                            |          |          |         |
| Лист і дата     |      | 46ДР.012 000. 000 ВР |                |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      | Ім'я                 | Лист           | № докум.                | Підп.                                    | Дата                       | Лист     | Масштаб  | Масштаб |
| №№ листів       |      | Розроб.              | Колосов С.А.   |                         |  | Відомість дипломної роботи |          |          | 1:1     |
|                 |      | Проб.                | Толстенко О.В. |                         |  |                            |          |          |         |
|                 |      | Т.контр.             |                |                         |  |                            | Лист     | Листів   | 1       |
|                 |      | Н.контр.             | Івлєв В.В.     |                         |  |                            | ДДАЕУ    |          |         |
|                 | Чтб. | Дієдін В.Ю.          |                |                         |  |                            |          |          |         |
| Копіював        |      |                      |                |                         |  | Формат А4                  |          |          |         |

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена дослідженню деталей двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) з акцентом на виявлення прихованих дефектів та методи їх усунення. Основною метою дослідження є моделювання напружено-деформованого стану ключових деталей ДВЗ, таких як колінчастий вал, а також аналіз умов, що сприяють утворенню тріщин, та ефективних методів їх виявлення.

У першому розділі представлено огляд літератури, що включає аналіз деталей ДВЗ та умови їх експлуатації, а також методи виявлення прихованих дефектів. Розділ завершується висновком щодо актуальності теми та необхідності подальших досліджень.

Другий розділ присвячено моделюванню напружено-деформованого стану колінчастого валу ДВЗ та фізичним основам магнітної дефектоскопії. У підрозділах детально розглянуто магнітостатичні поля, магнітні характеристики конструкційних сталей і чавунів, а також способи розмагнічування.

Третій розділ описує методику проведення досліджень, включаючи магнітопорошкову дефектоскопію та методику дефектації колінчастого валу. Наведено деталі експериментальної установки, порядок намагнічування деталей та результати експериментів.

Четвертий розділ охоплює аспекти охорони праці та безпеки під час проведення дефектувальних робіт, вивчає небезпечні фактори, що виникають при магнітопорошковій дефектоскопії, та заходи для захисту працівників.

У п'ятому розділі виконано техніко-економічну оцінку методів контролю. Проаналізовано чутливість методів, розраховано собівартість дефектоскопії, економію на ремонті та термін окупності додаткових капіталовкладень.

Завершується робота загальними висновками та рекомендаціями щодо вдосконалення методів контролю і забезпечення надійності деталей ДВЗ у складних умовах експлуатації.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП.....  | 8  |
| РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....  | 10 |
| 1.1. Деталі двигуна внутрішнього згорання та умови їх роботи .....  | 10 |
| 1.2. Методи виявлення прихованих дефектів.....  | 15 |
| 1.3. Висновок.....  | 25 |
| РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ<br>ОСНОВНИХ ДЕТАЛЕЙ ДВЗ ТА УМОВ ВИНИКНЕННЯ ТРІШИН І<br>МЕТОДІВ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ ..... | 27 |
| 2.1. Моделювання напружено-деформованого стану колінчастого валу ДВЗ<br>.....   | 27 |
| 2.2. Фізичні основи магнітної дефектоскопії .....   | 38 |
| 2.2.1 Розрахунок магнітостатичних полів розсіювання поверхневих дефектів<br>.....   | 39 |
| 2.2.2. Магнітні характеристики конструкційних сталей і чавунів .....  | 42 |
| 2.2.3. Сили, що діють на феромагнітну частинку .....  | 43 |
| 2.2.4. Способи розмагнічування.....   | 44 |
| 2.3. Висновок.....  | 47 |
| РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....  | 49 |
| 3.1 Загальні відомості.....   | 49 |
| 3.2. Методика проведення магнітопорошкової дефектоскопії.....   | 50 |
| 3.2.1. Послідовність операцій магнітопорошкової дефектоскопії .....   | 50 |
| 3.2.1. Методика дефектації колінчастого валу.....   | 53 |
| 3.3. Опис експериментальної установки.....  | 55 |
| 3.4. Порядок проведення намагнічування деталей .....  | 59 |

|  |    |
|--|----|
| 3.5. Результати експериментальних досліджень.....  | 61 |
| 3.6. Висновок.....   | 66 |
| 4. БЕЗПЕКА ПРАЦІ .....   | 68 |
| 4.1. Охорона та безпека праці при проведенні дефектувальних робіт.....                               | 68 |
| 4.2. Шкідливі та небезпечні фактори при магнітопорошковій дефектоскопії<br>.....                     | 68 |
| 4.3. Вимоги до безпечної організації робіт.....  | 70 |
| 4.4. Заходи щодо забезпечення захисту працівників від дії шкідливих та<br>небезпечних факторів ..... | 71 |
| 4.5. Висновок.....   | 74 |
| РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА .....  | 75 |
| 5.1. Чутливість методів контролю .....   | 75 |
| 5.2. Розрахунок собівартості дефектоскопії .....   | 77 |
| 5.3. Розрахунок економії на ремонті .....  | 78 |
| 5.4. Розрахунок терміну окупності додаткових капіталовкладень .....                                  | 80 |
| 5.5. Висновок.....   | 82 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....   | 84 |
| ЛІТЕРАТУРА.....  | 86 |
| ДОДАТКИ.....   | 89 |

## ВСТУП

Розвиток сучасного машинобудування та автотракторної індустрії вимагає від виробників забезпечення високої надійності та довговічності деталей і вузлів автотракторних двигунів [1, 2]. Ефективність роботи таких двигунів значною мірою залежить від якості виготовлення та своєчасного виявлення дефектів на різних етапах виробництва й експлуатації. З цією метою важливе місце займає неруйнівний контроль, який дозволяє перевіряти стан поверхонь деталей без їх пошкодження, що дає можливість уникнути аварійних ситуацій та підвищити експлуатаційні показники техніки .

Методи неруйвної дефектоскопії охоплюють широкий спектр підходів, таких як візуально-оптичний контроль, ультразвукова, капілярна та вихрострумова дефектоскопія. Проте для діагностики феромагнітних матеріалів, з яких виготовляються ключові вузли двигунів (колінчатий вал, шатун, гільза циліндрів), найбільш ефективною є магнітопорошкова дефектоскопія. Вона дозволяє виявляти поверхневі та підповерхневі тріщини, включення та інші дефекти, що не завжди можна знайти іншими методами [1, 3, 4].

Актуальність теми роботи обумовлена зростаючими вимогами до надійності автотракторних двигунів у сучасних умовах експлуатації, де важливим є своєчасне виявлення дефектів та мінімізація ризиків поломок. У зв'язку з цим, обґрунтування раціональних методів неруйнівного контролю набуває особливого значення. Правильний вибір методики дозволяє значно знизити витрати на ремонт і технічне обслуговування, а також підвищити ресурс і безпеку експлуатації техніки.

Метою цієї роботи є аналіз існуючих методів неруйнівного контролю та обґрунтування доцільності використання магнітопорошкової дефектоскопії для контролю критично важливих деталей автотракторних двигунів. Особливу увагу буде приділено дослідженню колінчатого валу, шатуна та гільзи циліндрів, оскільки їхній стан безпосередньо впливає на ефективність роботи двигуна.



Таким чином, результати дослідження допоможуть визначити оптимальні методи контролю, що сприятимуть підвищенню якості та надійності автотракторних двигунів, а також скороченню простоїв та витрат на технічне обслуговування.

**Предметом дослідження** є раціональні методи неруйнівного контролю поверхонь деталей автотракторних двигунів, зокрема методи дефектоскопії. Особлива увага приділяється можливостям магнітопорошкової дефектоскопії, як однієї з найефективніших технологій для виявлення дефектів у феромагнітних матеріалах. Досліджуються способи контролю таких характеристик, як наявність тріщин, мікропор, включень та інших дефектів на поверхні або під нею, які можуть впливати на працездатність вузлів двигуна. Важливим аспектом є оцінка ефективності різних методів неруйнівного контролю з метою визначення їх доцільності на різних етапах експлуатації та ремонту.

**Об'єктом дослідження** є конструктивні елементи автотракторних двигунів, зокрема:

- **Колінчатий вал** – ключовий компонент двигуна, який піддається великим навантаженням під час роботи. Стан його поверхні та можливі дефекти (тріщини, надриви) безпосередньо впливають на надійність двигуна.

**Апробація роботи:** Колосов, С., (2024). Обґрунтування ефективних методів дефектоскопії деталей автотракторних двигунів: *Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу*, 15 листопада 2024, Дніпро, Україна. Дніпро: ДДАЕУ. с. 95–97..

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Деталі двигуна внутрішнього згорання та умови їх роботи

Двигун внутрішнього згорання (ДВЗ) складається з багатьох вузлів і деталей, які виконують взаємопов'язані функції для перетворення енергії згорання палива в механічну роботу. Вони працюють в умовах високих температур, значних навантажень і циклічного зносу, що вимагає надійності кожного компонента. В основному це два механізми і чотири системи (рис. 1.1). Розглянемо основні деталі, які мають критичне значення для працездатності та довговічності ДВЗ, і умови їхньої роботи [5].

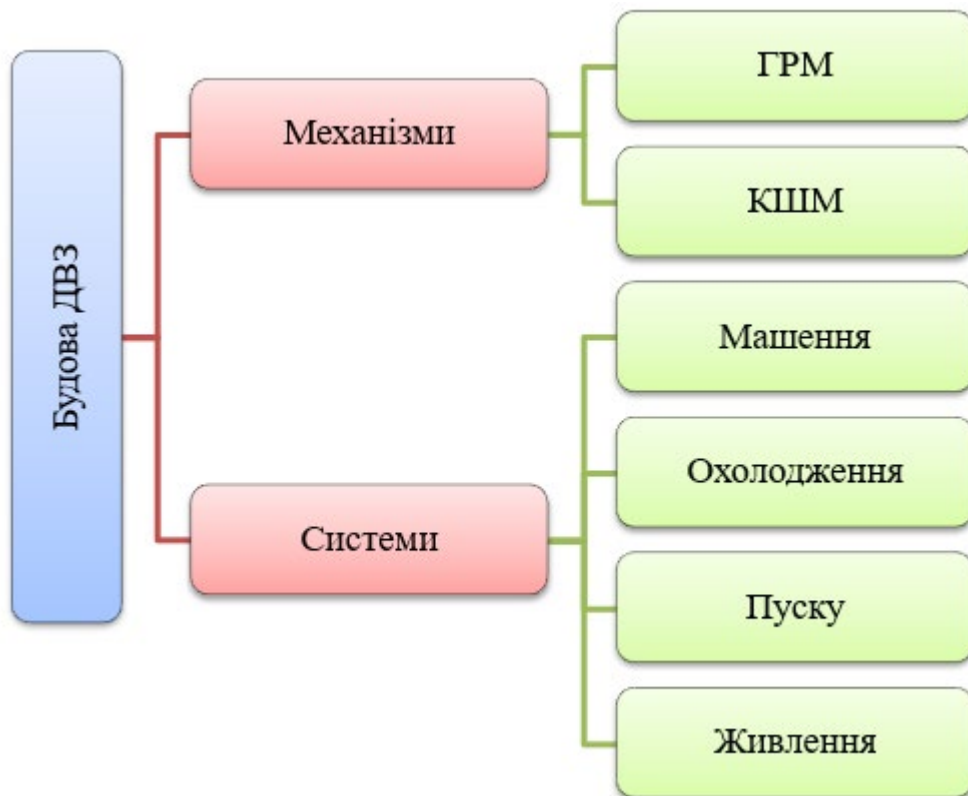


Рисунок 1.1 – Будова двигуна внутрішнього згорання

**Кривошипно-шатунний механізм (КШМ) (рис. 1.2).** КШМ – це ключовий вузол, що включає шатун, циліндр, маховик, колінчастий вал, а також шатунні та корінні підшипники. Його основна функція полягає в перетворенні зворотно-поступального руху поршня в обертальний рух колінчастого вала.

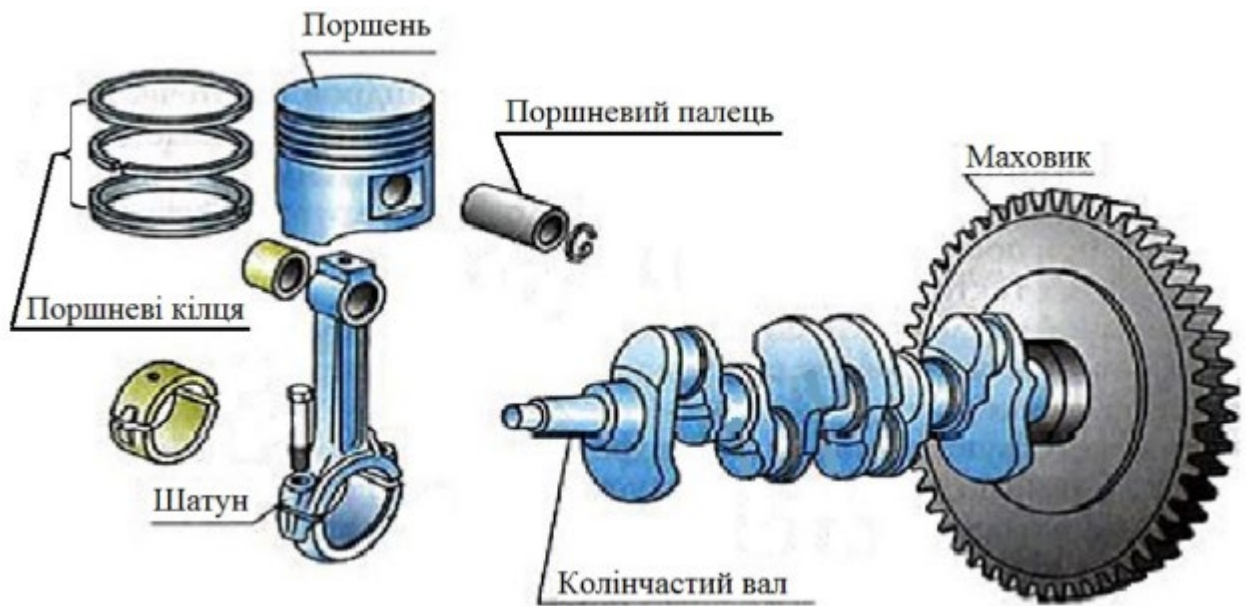


Рисунок 1.2 – КШМ ДВЗ

**Газорозподільний механізм (ГРМ) (рис. 1.3).** ГРМ застосовується в чотиритактних двигунах (детальний принцип їх роботи буде описано у відповідному розділі). Від злагодженої роботи цього механізму залежить точність синхронізації між обертами колінчастого вала та відкриттям і закриттям клапанів. ГРМ відповідає за своєчасне впорскування паливної суміші в камеру згоряння та випуск відпрацьованих газів, що забезпечує стабільну роботу двигуна та максимальну ефективність процесу згоряння [5].

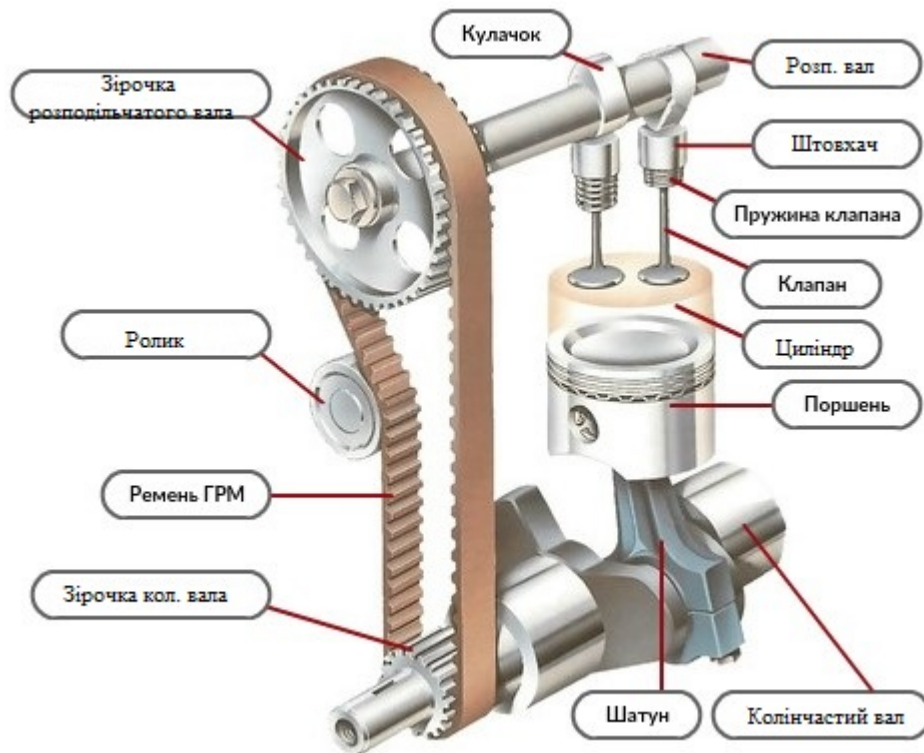


Рисунок 1.3 – ГРМ ДВЗ

### 1. Колінчатий вал

Функція: Колінчатий вал перетворює зворотно-поступальний рух поршня на обертальний рух, який передається на трансмісію. Він є основним вузлом кривошипно-шатунного механізму (КШМ).

Матеріал: Зазвичай виготовляється зі сталі або високоміцного чавуну, піддається термічній обробці для підвищення міцності.

Умови роботи.

- Працює під впливом змінних навантажень від згорання палива.
- Заходи проти втомних тріщин та надривів надзвичайно важливі, оскільки саме ці дефекти найчастіше викликають поломки вала.

- Зони ризику: шийки вала та філетки (місця переходу між шийками і щоками).

### 2. Розподільний вал

Функція: Здійснює синхронізацію відкриття і закриття клапанів шляхом управління їхнім рухом через штовхачі або коромисла.

Матеріал: Виготовляється зі сталі або чавуну з високою зносостійкістю.

Умови роботи:

- Взаємодіє з клапанами та штовхачами, що створює значний контактний тиск.
- Сильне тертя і вплив мастильних матеріалів.
- Можливе утворення корозії та тріщин у випадку недостатнього змащення або надмірних навантажень.

### 3. Шатун

Функція: Передає силу від поршня до колінчатого вала. Він забезпечує з'єднання між ними та перетворює зворотно-поступальний рух поршня в обертальний.

Матеріал: Зазвичай виготовляється зі сталі або титанових сплавів, що забезпечує високу міцність при низькій масі.

Умови роботи:

- Піддається циклічним навантаженням і динамічним ударам.
- Важливим є контроль тріщин, зокрема в зоні отворів для пальців та шийок.
- У разі дефектів у матеріалі шатуна можливе його руйнування під час роботи двигуна.

### 4. Гільза циліндра

Функція: Є частиною робочої камери згоряння, у якій переміщається поршень. Забезпечує ущільнення між поршнем і стінками циліндра для утримання тиску газів.

Матеріал: Виконується з чавуну або легованих сталей з високою стійкістю до зносу та тертя.

Умови роботи:

- Піддається впливу високих температур і тиску газів.
- Інтенсивний знос через тертя між гільзою та поршневыми кільцями.
- Зношеність гільзи призводить до зниження компресії та підвищеного витрату мастила й палива.

### 5. Поршень і поршневі кільця

Поршень виконує функцію передачі тиску газів згоряння на шатун.

- Матеріал: Алюмінієві сплави, стійкі до високих температур.
- Піддається сильному нагріванню та тертю.

Поршневі кільця ущільнюють зазор між поршнем і стінками гільзи, утримуючи гази та мастило в камері згоряння.

- Матеріал: Чавун або сталь з покриттям для зносостійкості.
- Зношення кілець призводить до підвищеного витрату мастила та втрати компресії.

#### 6. Клапанний механізм

Функція: Забезпечує своєчасне відкриття та закриття впускних і випускних клапанів для подачі паливної суміші та відведення відпрацьованих газів.

Умови роботи:

- Працює в умовах високих температур (особливо випускні клапани).
- Термічна деформація та знос можуть призвести до порушення герметичності.

#### 7. Корпусні деталі (блок циліндрів, головка блоку)

- Блок циліндрів утворює основу для всіх деталей двигуна і містить гільзи циліндрів та канали для охолодження.

- Головка блоку містить клапанний механізм та канали для охолодження й подачі паливної суміші.

Умови роботи:

- Постійний контакт з охолоджувальною рідиною та мастильними матеріалами.
- Важливий контроль герметичності та відсутності тріщин у корпусі.

Деталі ДВЗ працюють у складних умовах, піддаючись впливу високих температур, динамічних та статичних навантажень, а також агресивного середовища мастил і палив. Магнітопорошкова дефектоскопія дозволяє виявляти приховані дефекти в деталях із феромагнітних матеріалів (колінчатий і розподільний вал, шатун), які можуть стати причиною поломок. Використання ефек-

тивних методів неруйнівного контролю допомагає запобігти аваріям, продовжити ресурс двигуна та знизити витрати на ремонт.

## **1.2. Методи виявлення прихованих дефектів**

Методи неруйнівного контролю (НК) використовуються для виявлення дефектів у матеріалах та конструкціях без їх пошкодження. Нижче розглянуто основні методи неруйнівного контролю: капілярний метод, рентгенографічний метод, ультразвуковий метод і магнітопорошковий метод.

### **1.2.1. Капілярний метод дефектоскопії**

Капілярний метод дефектоскопії є одним із найпопулярніших методів неруйнівного контролю, який дозволяє виявляти поверхневі дефекти у різних матеріалах, таких як метали, сплави, кераміка тощо. Цей метод ґрунтується на властивості рідин (капілярних рідин) проникати в найменші зазори матеріалу завдяки капілярному ефекту. Метод є ефективним, простим, швидким та відносно дешевим способом виявлення дефектів у конструкціях.

Капілярний метод широко застосовується у багатьох галузях промисловості, де важливо перевірити поверхневі дефекти матеріалів. Основні сфери застосування включають:

- **Машинобудування:** Виявлення тріщин у деталях двигунів, шасі, металевих сплавах тощо.
- **Авіаційна промисловість:** Перевірка літаків та компонентів на наявність дефектів.
- **Нафтохімічна промисловість:** Контроль цілісності трубопроводів, що знають високого тиску.
- **Будівельна галузь:** Перевірка зварних швів, залізобетонних конструкцій на наявність дефектів.
- **Медицина та стоматологія:** Перевірка медичних імплантів та протезів.

- Електроніка: Перевірка металевих контактів, плат і компонентів на наявність дефектів.

Капілярний метод заснований на використанні спеціальних капілярних рідин, які мають властивість проникати в поверхневі дефекти за рахунок капілярного ефекту. Ці дефекти можуть бути різного походження: тріщини, пори, шви, невеликі зазори тощо. Виявлення таких дефектів відбувається через спостереження за поширенням рідин у місцях, де є дефект.

Капілярний метод є поверхневим методом, тобто він не дозволяє виявити дефекти, що знаходяться в глибших шарах матеріалу.

Капілярний ефект — це фізичне явище, за якого рідина здатна проникати в дрібні зазори або пори під дією поверхневого натягу. Цей ефект дозволяє рідині "підніматися" або проникати в місця, де на поверхні є навіть найменші тріщини або дефекти.

Кроки при застосуванні методу:

1. Підготовка поверхні

Поверхня об'єкта очищується від бруду, масла, пилу або інших забруднень, щоб забезпечити ефективний контакт капілярної рідини зі специфічними дефектами.

2. Нанесення капілярної рідини

На поверхню об'єкта наноситься спеціальна рідина, що має властивість проникати через дефекти. Ця рідина може бути кольоровою або флуоресцентною.

3. Час на проникнення

Капілярна рідина дається час для проникнення в дефекти, що знаходяться на поверхні об'єкта.

4. Змивання зайвої рідини

Після того, як рідина проникла в дефекти, надлишки рідини видаляються, щоб забезпечити чіткість візуалізації дефекту.

5. Візуалізація дефектів



Дефекти виявляються за допомогою відповідних засобів: звичайного світла, ультрафіолетового світла (якщо рідина флуоресцентна) або спеціалізованого обладнання.

Таблиця 1.1 - Переваги та недоліки капілярного методу дефектоскопії

| Переваги   | Недоліки   |
|--|--|
| 1. Простота у використанні: Не вимагає складного обладнання.   | 1. Лише поверхневі дефекти: Не виявляє дефекти, що знаходяться глибше.                       |
| 2. Швидкість перевірки: Швидке виконання перевірки, особливо при великому обсязі робіт.                    | 2. Підготовка поверхні: Поверхня повинна бути ретельно очищена перед застосуванням.          |
| 3. Економічність: Капілярні рідини та обладнання недорогі.   | 3. Обмеження залежно від рідин: Не всі матеріали сумісні з капілярними рідинами.             |
| 4. Ефективність для поверхневих дефектів: Мікротріщини, пори та інші поверхневі дефекти легко виявляються. | 4. Вплив зовнішніх факторів: Забруднення, окислення можуть впливати на точність результатів. |

### 1.2.2. Ультразвуковий метод дефектоскопії

Ультразвуковий метод дефектоскопії є одним із найефективніших методів неруйнівного контролю, що використовує звукові хвилі високої частоти для виявлення дефектів у матеріалах. Цей метод дозволяє визначати внутрішні дефекти, тріщини, пори, включення, корозію, а також оцінювати фізико-механічні властивості матеріалу.

Ультразвуковий метод застосовується у багатьох галузях промисловості:

- Авіаційна промисловість: Перевірка наявності дефектів у крилах, з'єднаннях та інших критично важливих елементах.
- Машинобудування: Перевірка зварних швів, металевих компонентів на дефекти.

- Нафтова і газова промисловість: Контроль цілісності трубопроводів та резервуарів.
- Будівельна галузь: Виявлення корозії та дефектів у залізобетоні.
- Електроніка: Аналіз композитів та металевих контактів на дефекти.

Ультразвуковий метод ґрунтується на застосуванні високочастотних звукових хвиль (зазвичай у діапазоні 1-100 МГц). Принцип його роботи полягає в тому, що ультразвукові хвилі поширюються у матеріалі та відбиваються від дефектів або неоднорідностей. Аналіз часу, амплітуди та характеру відбитих сигналів дозволяє визначити наявність дефекту, його розташування, розміри та глибину.

#### Принцип дії ультразвукового методу

1. Генерація ультразвукових хвиль: Ультразвукові хвилі генеруються за допомогою спеціального ультразвукового перетворювача (датчика).
2. Поширення хвиль у матеріалі: Хвилі поширюються через матеріал і взаємодіють з його внутрішніми дефектами.
3. Відбиття від дефекту: У випадку наявності дефекту або неоднорідності хвиля відбивається назад до перетворювача.
4. Приймання відбитого сигналу: Перетворювач приймає сигнал, а вимірювання часу між передачею та прийомом дозволяє визначити глибину та місцезнаходження дефекту.

Ультразвуковий метод використовує два основних способи роботи: тіньовий метод та ехоімпульсний метод.

#### Тіньовий спосіб

Тіньовий метод заснований на виявленні дефектів за допомогою зменшення амплітуди ультразвукового сигналу, що виникає внаслідок поглинання або відбиття хвиль від дефекту.

#### Принцип дії

1. Ультразвукові хвилі спрямовуються до матеріалу через перетворювач.

2. Якщо в матеріалі є дефект (наприклад, тріщина або пори), хвилі відбиваються від нього, створюючи "тінь", тобто область зі зменшеною амплітудою сигналу.
3. Ця знижена амплітуда сприймається перетворювачем і дає змогу визначити місцезнаходження дефекту.

#### Ехоімпульсний спосіб

Ехоімпульсний метод дозволяє визначати місцезнаходження дефектів у матеріалі та оцінювати їх глибину за допомогою вимірювання часу, протягом якого ультразвукові хвилі поширюються до дефекту та назад.

#### Принцип дії

1. Перетворювач (датчик) генерує ультразвукові імпульси.
2. Хвилі поширюються через матеріал.
3. Якщо хвиля досягає дефекту, вона відбивається назад до перетворювача.
4. Час між генерацією імпульсу та прийняттям відбитого сигналу дозволяє розрахувати відстань до дефекту та його глибину.

Таблиця 1.2 - Переваги та недоліки ультразвукового методу дефектоскопії

| Переваги   | Недоліки   |
|--|--|
| 1. Можливість виявлення внутрішніх дефектів: Дефекти, які знаходяться всередині матеріалу, легко визначаються. | 1. Потребує професійного застосування: Потрібна висока кваліфікація персоналу.                           |
| 2. Швидкий час аналізу: Метод дозволяє швидко перевіряти великий обсяг матеріалу.                              | 2. Складність при роботі з неоднорідними матеріалами: Результати можуть бути спотворені.                 |
| 3. Висока точність визначення глибини дефекту: Ехоімпульсний метод дозволяє точно вимірювати глибину дефекту.  | 3. Вимагає підготовки поверхні: Поверхня матеріалу повинна бути підготовлена для ефективності перевірки. |
| 4. Можливість роботи з різними   | 4. Складність застосування в   |

|  |  |
|--|--|
| типами матеріалів: Ефективно застосовується до багатьох видів металів, сплавів і композитів. | особливих умовах: Під час роботи з певними типами середовищ метод може бути обмежений. |
|--|--|

### 1.2.3. Рентгенографічний метод дефектоскопії

Рентгенографічний метод дефектоскопії (РГ метод) є одним із найефективніших методів неруйнівного контролю, що використовує рентгенівське випромінювання для виявлення внутрішніх дефектів у різних матеріалах, таких як метали, сплави, кераміка, композити тощо. Цей метод дозволяє оцінити структуру матеріалу, виявити пори, тріщини, включення, корозію та інші дефекти, що виникають у процесі виробництва або експлуатації.

Рентгенографічний метод широко застосовується у багатьох галузях промисловості:

- Авіаційна промисловість: Перевірка структур літаків, крил, деталей двигунів на тріщини та дефекти.
- Машинобудування: Аналіз зварних швів, деталей на наявність внутрішніх дефектів.
- Нафтова та газова галузі: Перевірка трубопроводів на корозію, тріщини, пори.
- Будівельна галузь: Оцінка залізобетонних конструкцій на цілісність.
- Медицина: Контроль медичних протезів та імплантів.
- Електроніка: Аналіз напівпровідникових матеріалів та плат.

Рентгенографічний метод базується на здатності рентгенівських променів проходити через матеріали з різною густиною. Дефекти у матеріалі (пори, тріщини, включення тощо) мають іншу густину, що призводить до різної здатності пропускати рентгенівське випромінювання. Аналіз результату дає змогу виявити ці дефекти.

Принцип дії рентгенографічного методу

Рентгенографічний метод працює за наступним принципом:

1. Випромінювання рентгенівських променів: Рентгенівські промені спрямовуються через об'єкт, який перевіряється.
2. Поглинання променів: У матеріалі рентгенівські промені поглинаються по-різному залежно від його складу та структури. Дефекти, такі як тріщини, пори, включення, поглинають більше променів, ніж здорові ділянки.
3. Формування зображення: Промені, які пройшли крізь матеріал, фіксуються на фотопластині або цифровому детекторі, утворюючи рентгенівське зображення.
4. Аналіз зображення: Результуюче зображення аналізується на наявність дефектів.

Таблиця 1.3 - Переваги та недоліки рентгенографічного методу дефектоскопії

| Переваги  | Недоліки   |
|---|--|
| 1. Висока точність: Можливість виявлення найдрібніших дефектів, таких як мікротріщини, пори та включення.                 | 1. Висока вартість обладнання та операцій: Системи рентгенографічного контролю є дуже дорогі.                            |
| 2. Виявлення внутрішніх дефектів: Можливість виявляти дефекти всередині матеріалу, які неможливо побачити іншим способом. | 2. Підвищена небезпека: Рентгенівські промені становлять небезпеку для здоров'я та вимагають дотримання заходів безпеки. |
| 3. Широка сфера застосування: Може застосовуватись для багатьох видів матеріалів і галузей промисловості.                 | 3. Складність інтерпретації: Потрібна висока кваліфікація спеціалістів для читання рентгенівських зображень.             |
| 4. Повна картина внутрішньої структури об'єкта: Допомагає оцінити структуру матеріалу та дефекти в ньому.                 | 4. Неможливість перевірки певних матеріалів: Деякі матеріали можуть поглинати рентгенівські промені повністю.            |
| 5. Ефективність у складних умовах: Застосовується у багатьох критичних  | 5. Потреба в підготовці зразків: Деякі матеріали потребують спеціальної під-   |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| галузях, таких як авіація, нафтова промисловість та будівництво. | готовки перед перевіркою. |
|--|---------------------------|

#### 1.2.4. Магнітопорошковий метод дефектоскопії

Магнітопорошковий метод дефектоскопії — це метод неруйнівного контролю, що використовує властивості магнітного поля для виявлення дефектів на поверхні та у підповерхневих шарах матеріалу. Метод застосовується переважно для перевірки сталевих та залізвмісних сплавів на наявність дефектів, таких як тріщини, пори, включення, корозія тощо.

Метод заснований на магнітному намагнічуванні об'єкта, після чого на його поверхні розподіляються магнітопорошки. Дефекти виявляються на основі порушення магнітного поля в місцях дефектів.

Суть методу полягає в наступному:

1. Створення магнітного поля: Магнітне поле створюється через намагнічування об'єкта, який перевіряється.
2. Поширення магнітопорошків по поверхні: Магнітопорошки рівномірно розподіляються по поверхні деталі.
3. Переривання магнітного поля дефектами: У місцях наявності дефектів (наприклад, тріщини чи пори) магнітне поле деформується, що призводить до концентрації магнітопорошків у цих місцях.
4. Виявлення дефектів: Аналіз розподілу порошків дозволяє виявити місця, де виникають дефекти.

У магнітопорошковій дефектоскопії використовуються різні методи намагнічування, залежно від характеру перевірки та геометрії об'єкта. Основні методи намагнічування:

##### 1. Метод постійного магніту

- Постійні магніти використовуються для створення статичного магнітного поля, що дозволяє виявити дефекти на поверхні або неглибоко під поверхнею.

## 2. Електромагнітне намагнічування

- Застосування електричного струму через об'єкт для створення магнітного поля.
- Використовується у формі токів через котушки або проводи, що створюють змінне або постійне магнітне поле.

## 3. Магнітне намагнічування за допомогою постійного струму (DC)

- При цьому методі використовується **постійний струм**, що пропускається через об'єкт або навколо нього, щоб створити статичне магнітне поле.

## 4. Магнітне намагнічування за допомогою змінного струму (AC)

- Використання змінного струму дає змогу створювати змінні магнітні поля, що є особливо ефективними для виявлення дефектів у поверхневих шарах.

Таблиця 1.4 - Переваги та недоліки магнітопорошкового методу дефектоскопії

| Переваги   | Недоліки  |
|--|---|
| 1. Швидкість роботи: Дозволяє швидко перевіряти великий об'єм матеріалу.         | 1. Ефективність лише для магнітних матеріалів: Працює тільки зі сталлю та залізовмісними сплавами.                  |
| 2. Ефективність у виявленні поверхневих та підповерхневих дефектів.              | 2. Не дозволяє виявляти дефекти на великій глибині: Метод обмежений у виявленні дуже глибоких дефектів.             |
| 3. Простота застосування: Не потребує складного та дорогого обладнання.          | 3. Потребує належної підготовки персоналу: Оператори повинні мати навички для правильної інтерпретації результатів. |
| 4. Можливість виявлення дрібних тріщин та включень.                              | 4. Залежність від правильної підготовки поверхні: Недостатня підготовка може вплинути на результати.                |
| 5. Низька вартість обладнання порівняно з іншими методами неруйнівного контролю. | 5. Обмеження у складних конструкціях: Метод не завжди ефективний у випадку складної геометрії.                      |

Магнітопорошковий метод дефектоскопії є швидким, ефективним і відносно простим способом виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів. Застосування цього методу обмежується лише магнітними матеріалами, проте його точність, швидкість та простота роблять його дуже популярним у багатьох галузях промисловості.

Узагальнена таблиця переваг і недоліків неруйнівного контролю наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Переваги і недоліки методів неруйнівного контролю

| Переваги   | Недоліки  |
|--|---|
| <b>Капілярний метод</b>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Підходить для виявлення поверхневих дефектів з високою точністю.</li> <li>- Простий у виконанні та не вимагає дорогого обладнання.</li> <li>- Може використовуватися для контролю складних за формою деталей.</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ефективний лише для виявлення дефектів, що виходять на поверхню.</li> <li>- Вимагає чистої та гладкої поверхні для якісного контролю.</li> <li>- Неможливість застосування на пористих матеріалах через поглинання індикатора.</li> </ul>    |
| <b>Рентгенографічний метод</b>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Дозволяє виявляти внутрішні дефекти, включаючи порожнини, тріщини та інші структурні аномалії.</li> <li>- Надає точні візуальні дані про форму та розмір дефектів.</li> <li>- Підходить для контролю великих та щільних деталей.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Високі вимоги до безпеки через іонізуюче випромінювання.</li> <li>- Необхідність складного та дорогого обладнання.</li> <li>- Вимагає наявності кваліфікованого персоналу для інтерпретації зображень.</li> </ul>                            |
| <b>Ультразвуковий метод</b>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока чутливість до виявлення внутрішніх дефектів, таких як тріщини, включення та розшарування.</li> <li>- Підходить для деталей великої товщини.</li> <li>- Більш безпечний у порівнянні з рентгенографічним методом.</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Вимагає рівної поверхні та особливо го з'єднання з матеріалом для кращого передачі хвиль.</li> <li>- Ефективність залежить від форми та матеріалу деталі.</li> <li>- Складність у трактуванні сигналів від різних типів дефектів.</li> </ul> |



| Магнітопорошковий метод   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Дуже ефективний для виявлення поверхневих та приповерхневих дефектів.</li> <li>- Підходить для великих деталей складної форми.</li> <li>- Досить простий у виконанні та не потребує великого об'єму обладнання.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Використовується тільки для феромагнітних матеріалів.</li> <li>- Вимагає ретельної підготовки поверхні перед початком контролю.</li> <li>- Може бути менш точним при виявленні дуже дрібних або глибоких дефектів.</li> </ul> |

Аналіз основних методів неруйнівного контролю показує, що кожен метод має свої унікальні переваги та обмеження. Вибір методу залежить від характеристик деталі, типу матеріалу, а також від глибини та розташування можливих дефектів.

### 1.3. Висновок

Деталі двигуна та в цілому машин сприймають значні навантаження і досить часто це бувають знакозмінні або ударні навантаження, а досить часто комбінацію цих навантажень. В результаті дії таких навантажень у деталях можливо виникнення тріщин.

Також особливо небезпечними для поверхонь деталей є їх відновлення такими методами як наплавлення, зварювання, електролітичне покриття слюсарно-механічна обробка. При використанні цих методів дуже висока ймовірність появи тріщин. Тому після відновлення деталей обов'язково необхідно проводити їх дефектоскопію.

Метод магнітопорошкової дефектоскопії є оптимальним вибором для контролю феромагнітних матеріалів з метою виявлення поверхневих і приповерхневих дефектів. Завдяки своїй точності та простоті у застосуванні, а також можливості контролювати деталі великого розміру та складної форми, магнітопорошковий метод вважається найактуальнішим для дефектації деталей ма-

шин. Тому мета роботи дослідження методів неруйнівного контролю та обґрунтування і розробка оптимальних.

Щоб досягти поставлену мету необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати існуючі методи неруйнівного контролю,
- провести моделювання колінчастого валу та визначити навантаження та напруження які виникають в деталі.
- розробити методику експериментальних досліджень дефектації поверхонь деталей методом магнітопорошкової дефектоскопії.
- визначити залежності між рівнем струму та намагніченсті деталей,
- дослідити різні способи намагнічування та розробити рекомендації для випадків коли які способи використовувати.

## РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОСНОВНИХ ДЕТАЛЕЙ ДВЗ ТА УМОВ ВИНИКНЕННЯ ТРІЩИН І МЕ- ТОДІВ ЇХ ВИЯВЛЕННЯ

### 2.1. Моделювання напружено-деформованого стану колінчастого ва- лу ДВЗ

Під час експлуатації колінчастого валу (КВ) на нього діють радіальні та тангенціальні складові сили, які прикладаються до його шатунних шийок. До цього також додаються відцентрові сили, що виникають від обертання мас, реактивні сили від опор, а також момент опору обертанню трансмісії. Періодична дія всіх цих сил призводить до виникнення пружних коливань КВ, що проявляються у вигляді вигинальних та крутильних коливань.

Найбільш навантаженими є шатунні шийки і щоки колінчастого валу. Характер руйнувань елементів КВ вказує на переважну дію згинальних моментів і меншу дію крутного моменту. Втомні руйнування (тріщини) починаються в ділянці концентраторів напружень (галтелі, отвори для змащення, брудозуловлювачі). Наростання ступеня втомних руйнувань в елементах КВ у процесі експлуатації має переважно стохастичний характер.

Найчастіше втомне руйнування вала відбувається по щоці в зоні перекриття шатунних і корінних шийок (рис. 2.1), яке для двигунів Cummins становить 27,5 мм за номінального розміру шийок.

Для нормальних напружень  $\sigma$  від згинального навантаження справедливо:

$$\sigma_{зг} = \frac{M_{зг}}{W} \quad (2.1)$$

де  $M_z$  - згинальний момент (у процесі експлуатації практично не змінюється);

$W$  - момент опору перерізу на вигин.

Під час перешліфовування корінних і шатунних шийок на останній ремонтний розмір перекриття скорочується на 2 мм (7,2%). Розрахунки показують, що рівень напружень вигину підвищується при цьому в середньому на 8%.

Істотно знижується несучий переріз у процесі експлуатації завдяки поширенню втомних тріщин від вогнищ (у цьому разі галтелей), що показано на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Форма втомного руйнування шийки колінчатого валу

Під час ремонту колінчастого валу й обґрунтування способів його відновлення необхідно враховувати особливості втомних руйнувань.

Це насамперед стосується недопущення холодного правлення валів, що знижує втомну міцність на 30% і більше [1, 7]. Аналогічну дію чинить сітка мікротріщин у зоні роз'єму штампа (на 20-40%) [6, 8]. Накатка галтелей роли-

ком підвищує втомну міцність на 15% [6, 7, 8]. Усі ці фактори слід враховувати і під час розроблення технологій відновлення вала.

Наявність втомних руйнувань колінчастих валів викликає необхідність дослідження напруженого стану валів, а також матеріалів, з яких вони виготовляються.

У результаті побудови картин зміни конструкцій колінчастих валів дизелів під впливом напружень від вигину і кручення виявляються найбільш оптимальні місця появи втомних руйнувань.

Моделювання проведено для щоки колінчастого вала дизельного двигуна (рис. 2.2).

Для порівняння результатів моделювання методом скінченних елементів і моделювання з використанням систем із розподіленими параметрами, розглянуто обидва методи на щоці колінчастого вала дизеля і проведено порівняння точок максимального напруження.

Під час проведення моделювання методом скінченних елементів побудовано тривимірну модель щоки колінчастого вала і зроблено накладення трикутної сітки для подальшого розрахунку навантажень за допомогою пакета програм систем автоматизованого проектування [9, 10].

Для проведення моделювання задано: матеріал щоки колінчастого вала, робоча температура і сили, що діють на щоку.

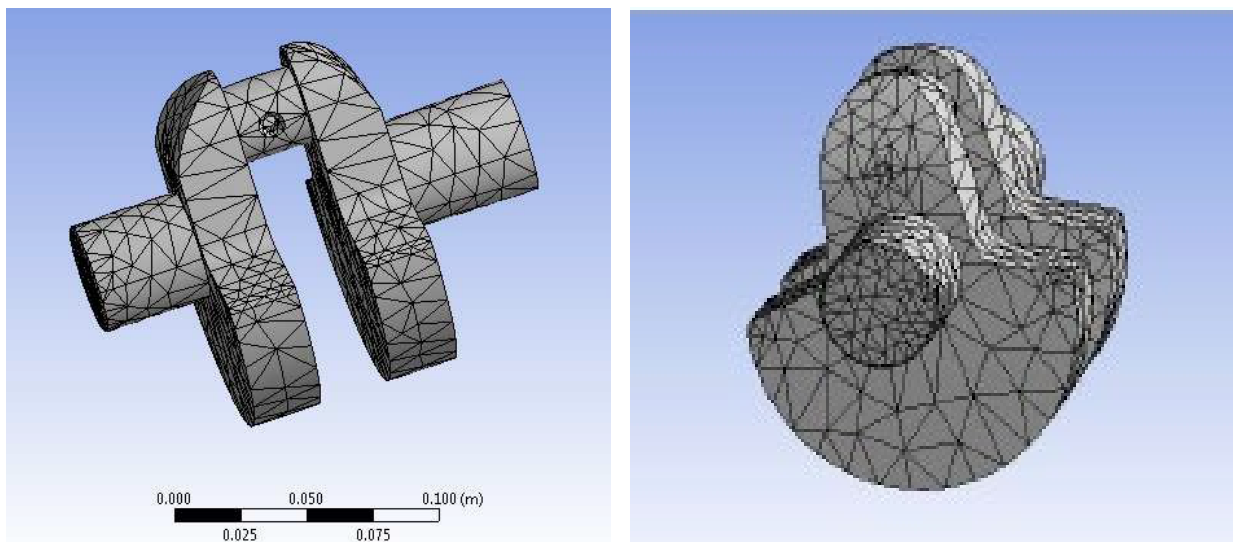


Рисунок 2.2 – Щока колінчастого вала вид спереду та збоку

Після введення даних, програмний пакет Ansys проводить моделювання навантажень на ділянці колінчастого вала і отримує результат у вигляді кольорової схеми моделі, на якій певними кольорами відображаються діючі навантаження.

Результати моделювання навантаження на щоку колінчастого вала представлено на рис. 2.3, 2.4.

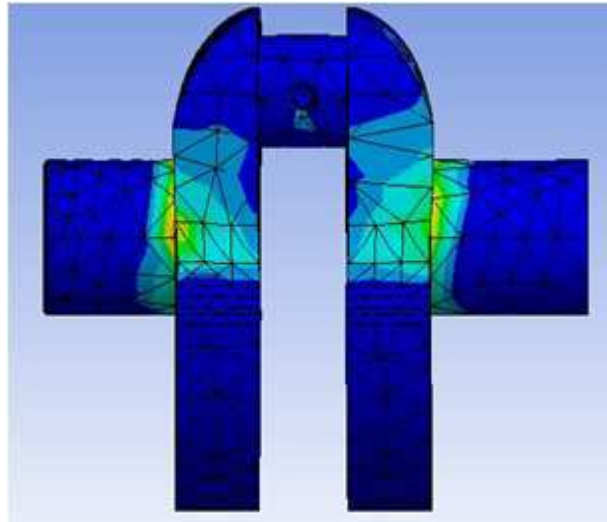


Рисунок 2.3 - Напруження за Мізесом, фронтальна зона щоки колінчастого вала

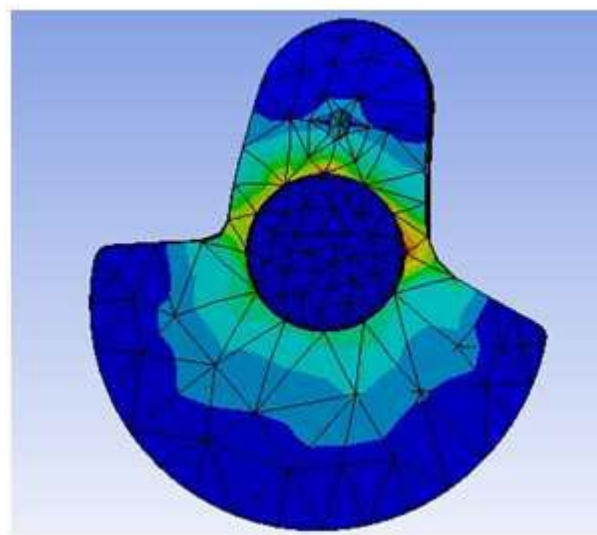


Рисунок 2.4 - Напруження за Мізесом бокова зона щоки колінчастого вала

З моделі видно, що найбільше напруження щока відчуває в області з'єднання опорного циліндра з противагою, особливо в крайових місцях сполучення і по краях противаги.

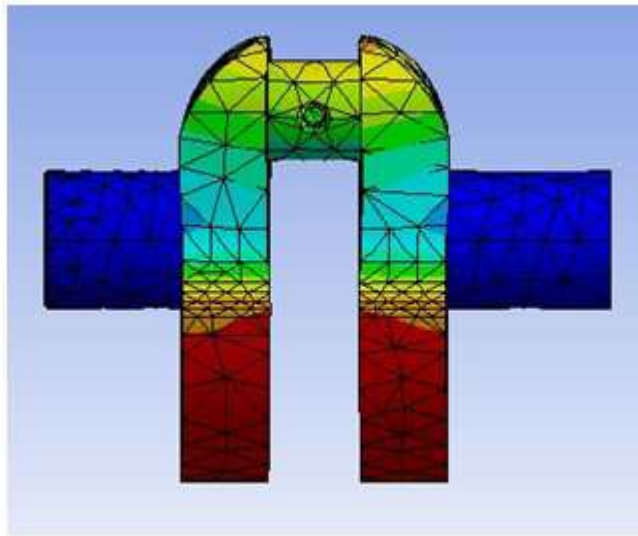


Рисунок 2.5 - Деформація, вид спереду

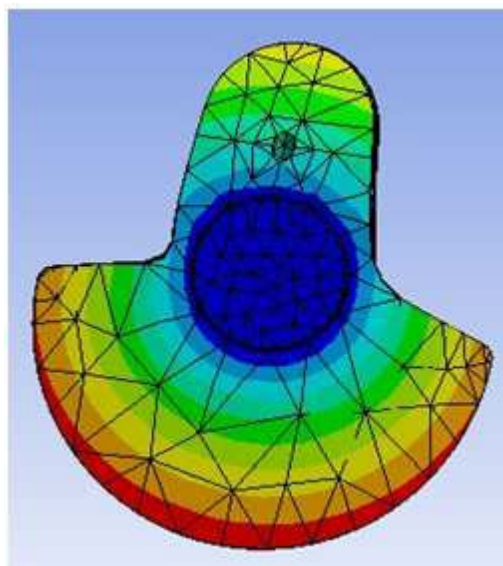


Рисунок 2.6 - Деформація, вид збоку

Для розроблення моделі щоки з використанням систем із розподіленими параметрами підбрано диференціальні рівняння, що описують фізичні процеси, що відбуваються з колінчастим валом дизеля в ході роботи. Задано початкові та граничні умови, у яких зазначено геометричні параметри щоки колінчастого вала, властивості матеріалу колінчастого вала, а також умови роботи [10].

Згідно з принципом роботи дизеля і розглянутими літературними джерелами законом зміни зовнішнього впливу визначено закон зміни потужності.

У результаті проведеного обґрунтування ідентифіковано диференціальне рівняння такого виду:

$$\frac{\partial Q(r, \Theta, z, t)}{\partial t} - a^2 \left( \frac{\partial^2 Q(r, \Theta, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q(r, \Theta, z, t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 Q(r, \Theta, z, t)}{\partial \Theta^2} + \frac{\partial^2 Q(r, \Theta, z, t)}{\partial z^2} \right) = f(r, \Theta, z, t) \quad (2.2)$$

де  $f(r, \Theta, z, t)$  - потужність, Вт.

$Q(r, \Theta, z, t)$  - напруження від моменту крутіння і вигину, Н/м<sup>2</sup>;

$a$  - коефіцієнт пропорційності, м<sup>2</sup>/Н<sup>2</sup>-с<sup>2</sup>.

Під час моделювання щока колінчастого вала розбивалася на ділянки, що дають змогу точніше описати початкові та граничні умови диференціального рівняння.

Для розв'язання диференціального рівняння (1) з довідкової літератури підібрано:

стандартизуюча функція:

$$\begin{cases} \omega(r, \Theta, t) = f(r, \Theta, t) + Q_0(r, \Theta) \cdot \delta(t) \\ \omega(r, \Theta, z, t) = f(r, \Theta, z, t) - a^2 \delta(r) \cdot q(\Theta(z, t) + Q_0(r, \Theta, z) \cdot \delta(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

Функція Гріна

$$G(r, \Theta, \rho, \sigma, t) = \frac{1}{4 \cdot a^2 \cdot \pi \cdot t} \cdot \left\{ \exp \left[ -\frac{r^2 - \rho^2 + 2r\rho \cdot \cos(\Theta - \sigma)}{4 \cdot a^2 \cdot t} \right] \right\} \quad (2.4)$$



У результаті отримано вирази для розрахунку напружень на ділянках щоби колінчастого вала дизеля:

$$\left\{ \begin{aligned} Q_1(N) &= \int_0^{0,198} \int_0^{2,094} G(r, \Theta, \rho, \sigma, t) \cdot \left( 51,32 \frac{d\omega}{dt} + N \right) d\rho d\sigma \\ Q_2(N) &= \int_0^{0,198} \int_0^{2,094} \int_0^{1,023} G(r, \Theta, z, \rho, \sigma, \zeta, t) \cdot \left( 51,321 \frac{d\omega}{dt} + N \right) d\rho d\sigma d\zeta \\ Q_3(N) &= \int_0^{0,33} \int_0^{2,094} G(r, \Theta, \rho, \sigma, t) \cdot \left( 42,768 \frac{d\omega}{dt} + N \right) d\rho d\sigma \\ Q_4(N) &= \int_0^{0,33} \int_0^{2,094} \int_0^{0,264} G(r, \Theta, z, \rho, \sigma, \zeta, t) \cdot \left( 42,768 \frac{d\omega}{dt} + N \right) d\rho d\sigma d\zeta \end{aligned} \right. \quad (2.5)$$

Із графіків, представлених на рисунках 2.7 і 2.8, випливає, що найнавантаженою ділянкою є ділянка колінчастого вала, де виникають найнебезпечніші концентрації напруження під дією крутного моменту і напруження вигину.

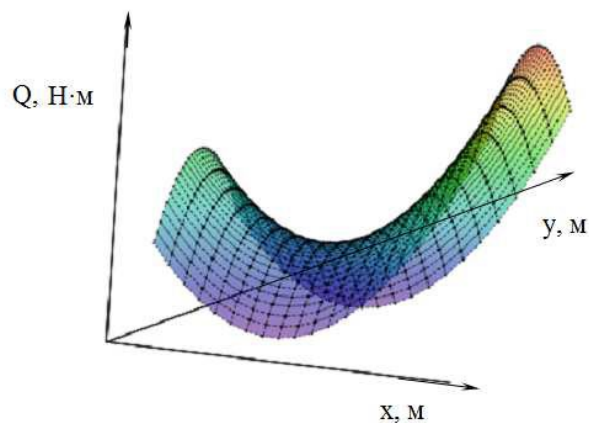


Рисунок 2.7 - Поширення концентрації напружень на ділянці щоби колінчастого вала: Q - концентрація напруження від вигину та кручення, Н-м; x, y - значення, що описують поверхню фігури, м.

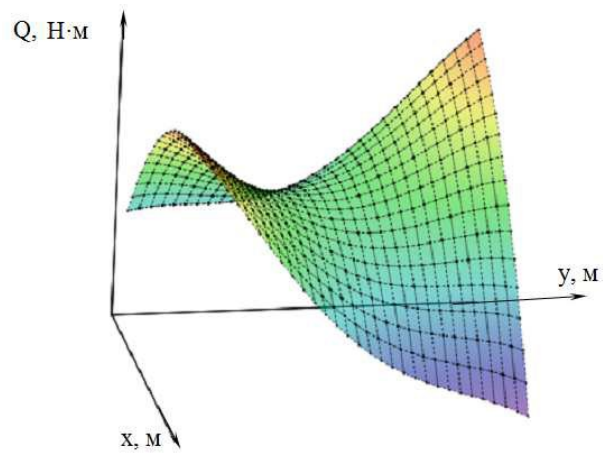


Рисунок 2.8 - Поширення концентрації напружень на ділянці щоки колінчастого вала:  $Q$  - концентрація напруження від вигину та кручення, Н-м;  $x$ ,  $y$  - значення, що описують поверхню фігури, м

Під час моделювання методом скінченних елементів, точками щоки колінчастого вала дизеля найбільш навантаженими є точки А, В і С. Їх положення вказано на малюнку 2.9.

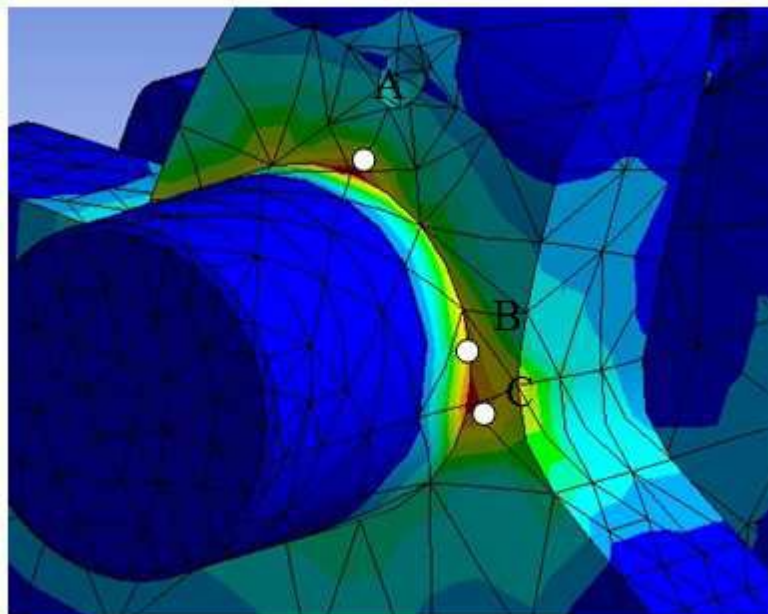


Рисунок 2.9 - Поширення концентрації напружень на ділянці щоки колінчастого вала

З представлених картин навантаження випливає, що найбільш навантаженою ділянкою буде ділянка сполучення щоби і шийки колінчастого вала, де виникають найнебезпечніші концентрації напруження під дією крутного моменту і напруження вигину.

Розглянута модель щоби колінчастого вала має характеристики реального колінчастого вала.

Для порівняння отриманих результатів моделювання складено таблиці, що відображають величини концентрацій напружень у певних точках (таблиця 2.1 і таблиця 2.2).

Таблиця 2.1 - Значення критичних точок у найбільш навантаженій ділянці колінчастого вала (метод кінцевих елементів)

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| A | $Q = 720 \text{ Н}\cdot\text{м}$ |
| B | $Q = 723 \text{ Н}\cdot\text{м}$ |
| C | $Q = 719 \text{ Н}\cdot\text{м}$ |

Таблиця 2.2 - Значення критичних точок у найбільш навантаженій ділянці колінчастого вала (система з розподіленими параметрами)

|                 |                                    |
|-----------------|------------------------------------|
| A(0,62; -1,6)   | $Q = 720,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ |
| B(-2,25; 1,15)  | $Q = 723,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ |
| C (-3,66; 4,89) | $Q = 719,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$ |

Порівняння чисельних показників результатів моделювання показало, що моделювання з використанням систем із розподіленими параметрами дає практично однакові значення за меншого обсягу робіт. На підставі даних моделей можна зробити висновок, що моделювання з використанням систем із розподіленими параметрами може бути використано для визначення критичних точок навантаження, дає змогу отримати точні результати, при цьому даючи змогу істотно знизити обсяг праці під час розрахунку певного типу навантаження. Однак метод скінченних елементів, реалізований спеціальними програмними

засобами представляє більш наочну картину ділянок моделі, що навантажуються.

Порівняльний аналіз даних, представлених на рис. 2.10, показує, що вал був наплавлений, прошліфований і пройшов експлуатаційні випробування до моменту руйнування. Руйнування відбулося в двох місцях: поперек четвертої кривошипної шийки зі сторони заднього торця деталі та в зоні прилеглої щоки з боку переднього фланця вала.

На рис. 2.11, з обох правих сторін (зі сторони заднього торця вала) спостерігається характерна S-подібна зона, що проходить поперек кривошипної шийки.

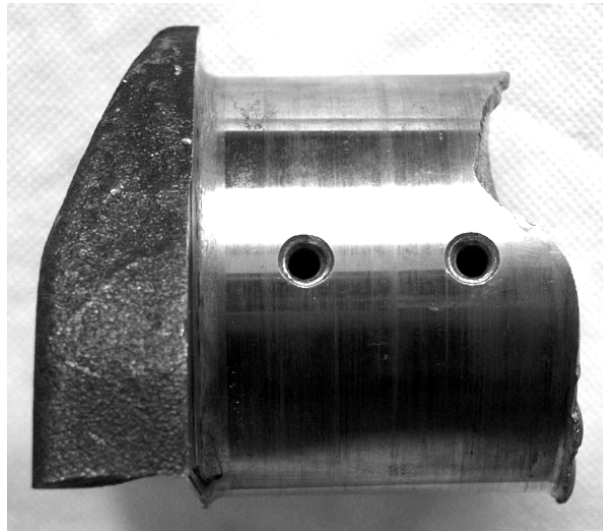
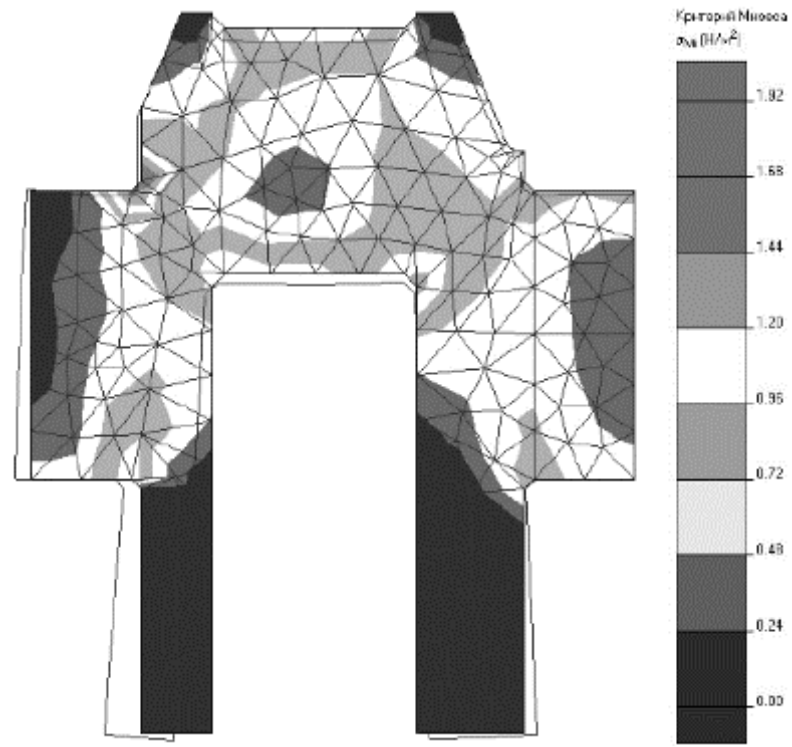
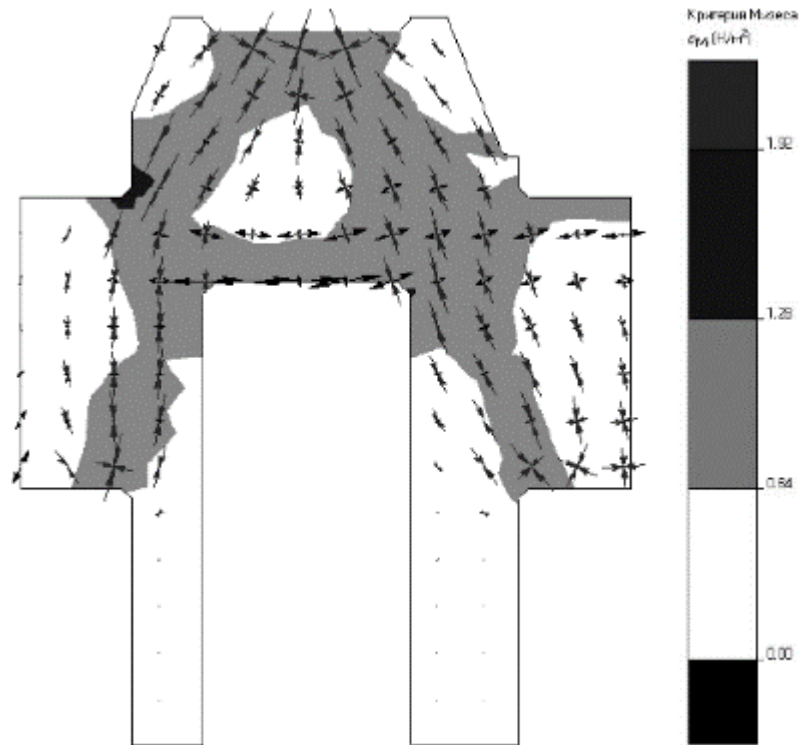


Рисунок 2.10 – Характерний вид руйнування шийки КВ



а



б

Рисунок 2.11 - Результати розрахунку (а) і зони найбільших напружень кривошипа (б)

На рис. 2.11 а область напруженого стану, розташована ліворуч від кривошипної шийки (з боку переднього торця вала), має схожість із характерним профілем зламу, представленим на рис. 2.10.

При зниженні роздільної здатності результатів аналізу можна виділити конкретні ділянки, де виникають значні напруження (Рис. 2.11 б). Виявлення та ідентифікація цих ділянок є важливим етапом для проведення досліджень вторинних тріщин під час дефектоскопії колінчастого вала в процесі його ремонту.

## 2.2. Фізичні основи магнітної дефектоскопії

Одним із головних завдань магнітної дефектоскопії є визначення просторового розподілу магнітного поля в зоні дефекту (з урахуванням глибини залягання, величини дефекту тощо) [1, 11, 12, 13, 14]. У загальному вигляді її можна сформулювати так: у феромагнітному тілі, намагніченому зовнішнім постійним полем  $H_0(x, y, z)$ , є чужорідне тіло (дефект) довільної форми та розмірів із магнітними характеристиками, відмінними від характеристик навколишньої його області. Потрібно розрахувати, які зміни вносить дефект у первинне поле в просторі над феромагнетиком, тобто необхідно знайти

$$\vec{H}_d(x, y, z) = \vec{H}_p(x, y, z) - \vec{H}_0(x, y, z) \quad (2.6)$$

де  $\vec{H}_p(x, y, z)$  - вектор напруженості результуючого поля в будь-якій точці простору поза феромагнетиком;

$\vec{H}_0(x, y, z)$  - вектор напруженості зовнішнього поля в тій самій точці;

$\vec{H}_d(x, y, z)$  - вектор напруженості поля дефекту в тій самій точці.

Визначення  $H_0(x, y, z)$  зводиться до розв'язання нелінійних рівнянь з урахуванням граничних умов. Точний розв'язок цього завдання практично неможливий через непереборні математичні труднощі. Тому зазвичай обмежуються розглядом задачі в лінійному наближенні, тобто припускають, що на фе-

ромагнетик із дефектом впливає таке за величиною однорідне магнітне поле, що магнітна проникність  $\mu = \text{const}$  (магнітна проникність матеріалу ОК і дефекту не залежать від напруженості магнітного поля). Навіть за такого допущення завдання не вирішується в загальному випадку. Тому в більшості робіт викладаються магнітостатичні методи наближеного розрахунку полів для конкретних форм дефектів із прийнятними для практики припущеннями.

### **2.2.1 Розрахунок магнітостатичних полів розсіювання поверхневих дефектів**

**Основні передумови.** Для успішного контролю ферромагнітних виробів необхідно мати досить повну інформацію про просторовий розподіл магнітних полів розсіювання, обумовлених різними дефектами. У загальному випадку розрахунок магнітостатичних полів розсіювання дефектів являє собою вельми складну математичну задачу і практично нездійснений, тому що дефекти мають вельми складну геометричну форму і можуть відрізнятися за фізичною природою.

Однак у низці випадків дефекти мають просту форму і створювані ними поля можуть бути апроксимовані полями еквівалентних магнітних диполів. Тоді розрахунок поля дефекту у вигляді локальної вм'ятини можна провести, уподібнивши його полю точкового диполя, а дефект у вигляді риски - апроксимувавши його лінійним диполем із базою, що дорівнює ширині дефекту.

Дефекти недопустимі відрізняються тим, що у них глибина набагато більша за ширину. Поле розсіювання такого дефекту можна уподібнити полю стрічкового диполя, ширина якого дорівнює ширині дефекту.

Елементарні джерела магнітостатичних полів.

У магнітостатиці вельми зручно користуватися поняттям «магнітний заряд». Поняття це фіктивне, однак, у низці випадків із ним можна оперувати як із поняттям реальним, зокрема за  $\mu = \text{const}$ . Умовно називатимемо точковим «магнітним зарядом» заряд  $m$  скінченної величини, зосереджений у нескінчен-

но малому об'ємі. «Магнітний заряд» характеризується величиною  $m$  і знаком (+) або (-), відповідно, позначаємо  $N$  і  $S$ . Точковий «магнітний заряд»  $+m$  або  $-m$ , перебуваючи у вакуумі, створює в деякій точці  $A$  навколишнього простору поле напруженістю  $H$ :

$$\vec{H} = \pm m \frac{\vec{R}}{R^3}, \quad (2.7)$$

де  $\vec{R}$  - радіус-вектор, проведений із точки  $m$  у точку  $A$ .

«Магнітний заряд» називається поверхневим, якщо він розподілений у нескінченно тонкому шарі по деякій кінцевій поверхні. Поверхневою густиною  $\sigma_n$  «магнітного заряду» називають величину цього «заряду», що припадає на одиницю площі,  $\sigma_n \left[ \frac{A}{M} \right]$

**Топографія поля розсіювання дефекту, еквівалентного точковому диполю.** Визначимо складові поля двох зарядів протилежного знака, розташованих на відстані  $2b$  один від одного (магнітний диполь із базою  $2b$ ).

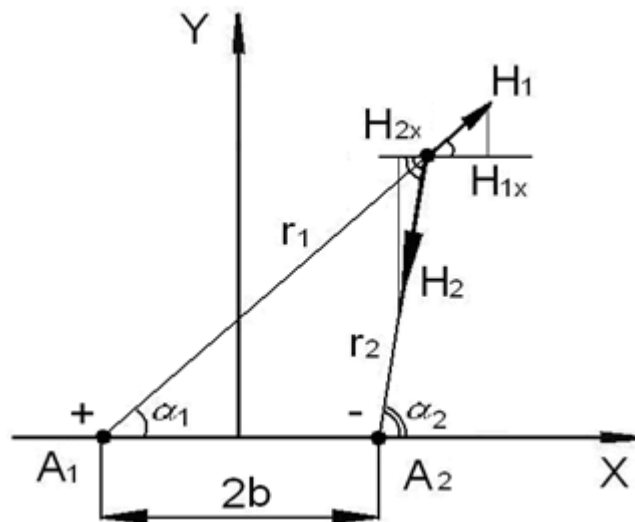


Рисунок 2.12 - Розрахункова схема

Горизонтальна складова напруженості магнітостатичного поля точкового диполя в точці  $M$  визначається з виразу:



$$H_x = |H_1| \cos \alpha_1 - |H_2| \cos \alpha_2, \quad (2.8)$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{x+b}{r_1}; \quad \cos \alpha_2 = \frac{x-b}{r_2}; \quad (2.9)$$

$$|H_1| = \frac{m}{r_1^2}; \quad |H_2| = \frac{m}{r_2^2}, \quad (2.10)$$

$$r_1 = \sqrt{(x+b)^2 + y^2}; \quad r_2 = \sqrt{(x-b)^2 + y^2}. \quad (2.11)$$

Підставляючи вирази 2.8 – 2.11 у вираз 2.7 отримаємо:

$$H_x = m \left( \frac{x+b}{r_1^3} - \frac{x-b}{r_2^3} \right) = m \left( \frac{x+b}{\left[ (x+b)^2 + y^2 \right]^{3/2}} - \frac{x-b}{\left[ (x-b)^2 + y^2 \right]^{3/2}} \right), \quad (2.12)$$

$$H_y = m \left( \frac{y}{\left[ (x+b)^2 + y^2 \right]^{3/2}} - \frac{y}{\left[ (x-b)^2 + y^2 \right]^{3/2}} \right). \quad (2.13)$$

**Топографія поля косорозташованого дефекту.** Топографія поля похилого до поверхні виробу дефекту залежить від напруженості прикладеного поля. У царині слабких полів (там, де напруженість не перевищує  $H(\mu_{\max})$  напруженість) топографія поля такого дефекту ( $H_x$ ) має симетричний вигляд і не відрізняється від топографії поля дефекту, нормального до поверхні, тобто має вигляд (рис. 2.13):

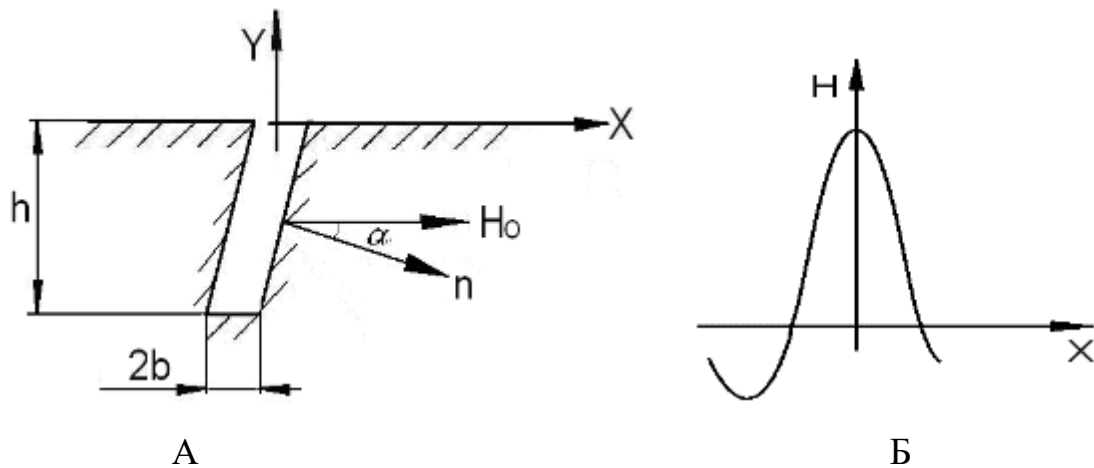


Рисунок 2.13 – А - Вид косорозташованого дефекту, Б - До пояснення топографії магнітного поля косорозташованого дефекту

У ділянці сильних полів вона має несиметричний вигляд, що полягає в появі поблизу гострого кута негативного екстремуму.

Ступінь асиметрії поля тим більший, чим більша величина прикладеного поля.

### 2.2.2. Магнітні характеристики конструкційних сталей і чавунів

Значення індукції для сталей і чавунів деяких марок за напруженості намагнічувального поля 35000 А/м.

| Марка сталі чи чавуну | У стані поставки |      |      |      |      |      |      |      |      |      |          |
|-----------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
|                       | 10               | 15   | 30   | 45   | 20X  | Ст3  | 09Г2 | 40X  | ШХ5  | УДГ  | СЧ 24-44 |
| В, Тл                 | 2,07             | 2,06 | 2,04 | 1,32 | 2,04 | 2,12 | 2,06 | 1,92 | 1,65 | 1,34 | 1,415    |

| Марка сталі  | 45               | 45  |
|--------------|------------------|---|
| Термообробка | У стані поставки | Загартування з 820°C у маслі, відпуск при 160°C |

|  |          |           |
|--|----------|-----------|
| Коерцитивна сила, $H_c$                    | 480 А/м  | 2160 А/м  |
| Залишкова індукція, $B_r$ , Тл             | 0,86 Тл  | 1,18 Тл   |
| Напруженість необхідна для отримання $B_r$ | 3200 А/м | 15200 А/м |

### 2.2.3. Сили, що діють на феромагнітну частинку

Переміщення відокремленої частинки магнітного порошку, що перебуває в околицях дефекту, відбувається під впливом рівнодіючої зтягувальноїponderomotorної сили, сили тяжіння частинки, архімедової виштовхувальної сили та сили тертя. Цю рівнодіючу силу зображено на рис. 2.14.

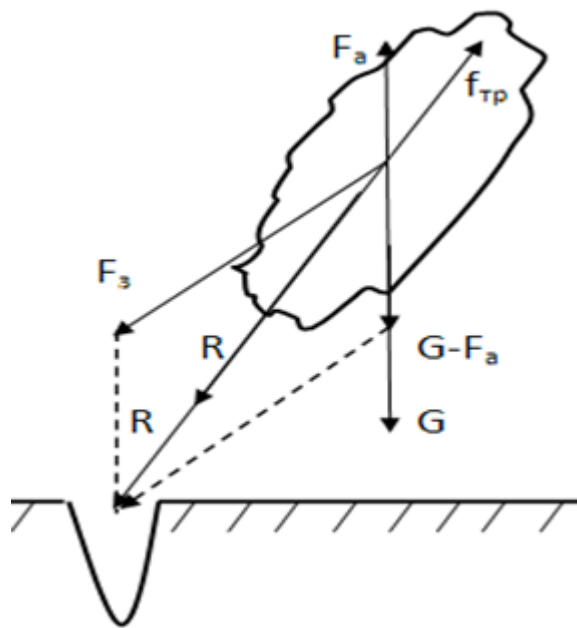


Рисунок 2.14 - Сили, що діють на відокремлену частинку магнітного порошку

$$F_3 = \mu_0 \cdot \varepsilon_{\square} V H \text{grad} H, \quad (2.14)$$

де  $\mu_0$  - магнітна постійна;

$\varepsilon_{\square}$  - магнітна сприйнятливості частинки;

$V$  - її об'єм;

$H$  - напруженість магнітного поля;

$gradH$  - градієнт напруженості магнітного поля.

Окремі частинки магнітного порошку з плином часу утворюють ланцюжки або конгломерати. Це явище називається автокоагуляцією. У присутності магнітного поля процес коагуляції прискорюється. На частинку в ланцюжку діють також магнітні сили з боку інших частинок і сили електростатичного відштовхування, зумовлені наявністю в магнітній суспензії поверхнево-активних речовин.

У формуванні індикаторних малюнків дефектів беруть участь здебільшого як поодинокі частинки порошку, так і короткі ланцюжки. Довгі ланцюжки створюють загальний фон у зоні структурної неоднорідності металу, грубої обробки поверхні тощо.

Щоб у магнітній суспензії внаслідок автокоагуляції було менше довгих ланцюжків феромагнітних частинок і конгломератів, до неї додають емульгатор (ОП-7, ОП-10), який представляє собою поляризовані електричні частки, що, огортаючи окремі частинки в ланцюжку, за рахунок сил електростатичного відштовхування розривають ланцюжки. Крім того, магнітну суспензію періодично пропускають через соленоїд, що розмагнічує, а також через сито.

#### **2.2.4. Способи розмагнічування**

Термін служби різних виробів, таких як підшипники кочення, значно скорочується за наявності залишкової намагніченості. Це пояснюється тим, що в місцях контакту притягуються найдрібніші феромагнітні частинки, які порушують нормальний режим функціонування виробу.

Крім цього, через додаткові витрати енергії на подолання магнітних сил та збільшені сили тертя значно зростають енергетичні витрати, що призводить до зниження вихідної потужності обладнання. В деяких випадках залишкова намагніченість може істотно вплинути на ефективність навігаційного обладнання.

На сьогодні застосовують два основні методи для розмагнічування:

1. Нагрівання об'єкта вище точки Кюрі;
2. Вплив на об'єкт змінним магнітним полем зі спадаючою амплітудою, що прямує до нуля.

Перший метод використовується рідко, оскільки нагрівання до високих температур призводить до зниження механічних властивостей матеріалу.

Під час розмагнічування за допомогою змінних магнітних полів максимальна амплітуда встановлюється не нижче від напруженості поля, в якому об'єкт був намагнічений. Частота таких розмагнічувальних полів зазвичай знаходиться в діапазоні від 1 до 50 Гц.

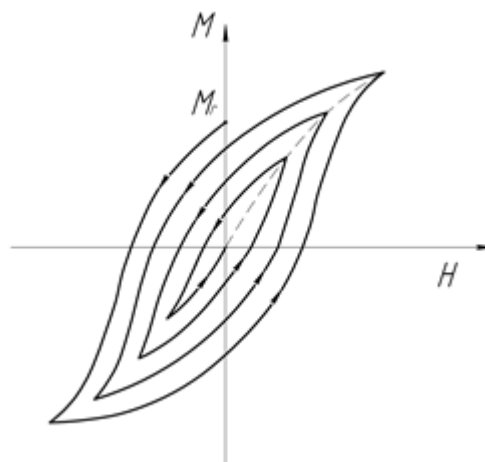


Рисунок 2.15 – Порядок зміни намагніченості

Для якісного розмагнічування деталі кількість циклів перемагнічування повинна бути не менша за 40. Існує кілька методів розмагнічування у змінному магнітному полі. Один із них передбачає використання демагнітизатора у вигляді соленоїда, де напруженість змінного поля зменшується автоматично від максимального значення до нуля. Інший спосіб полягає в тому, що об'єкт віддаляють зі соленоїда, який живиться джерелом змінного струму з постійною напругою. Під час віддалення об'єкта його положення змінюється у різних площинах, і відстань до соленоїда повинна становити 3-5 внутрішніх діаметрів або діагональ, якщо соленоїд має прямокутний переріз.

Іншим методом є видалення деталі з міжполюсного простору електромагніту, що живиться від джерела змінного струму. Також застосовують метод, за

якого через деталь пропускають змінний струм зі спадаючою амплітудою до нуля.

Глибина проникнення розмагнічувального поля залежить від частоти, магнітної проникності матеріалу та його питомої електричної провідності. Чим вища частота розмагнічувального поля, тим менша глибина проникнення. Наприклад, при частоті 50 Гц можна розмагнітити деталь завтовшки 2 мм, якщо матеріал має коерцитивну силу 10-15 А/см. У разі зниження частоти до 1 Гц можна розмагнітити деталі завтовшки до 30 мм зі схожими властивостями.

Деталь вважається розмагніченою, якщо її залишкова намагніченість не перевищує намагніченість поля Землі більше ніж у три рази. Слід також врахувати, що під час ударних навантажень намагніченість зменшується через дезорієнтацію доменів. У деяких випадках можливо ефективно розмагнітити деталь за один цикл, якщо підібрати відповідну напруженість розмагнічувального поля.

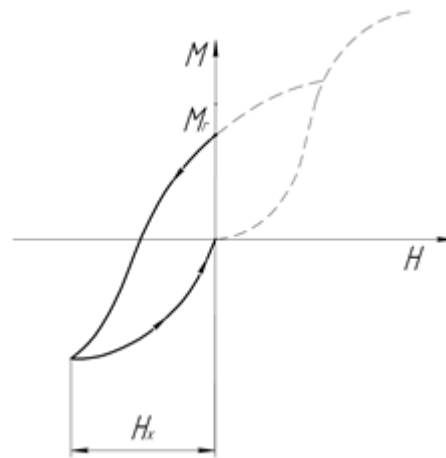


Рисунок 2.16 – Графічне пояснення розмагнічування деталі одним етапом

Для визначення якості розмагнічування деталі визначають показник розмагніченості  $K$ .

$$K = C_s \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2}, \quad (2.15)$$

де  $C_B$  - коефіцієнт, що визначається за таблицею і залежить від географічного місця контролю;

$\alpha_1$  і  $\alpha_2$  - показання приладу під час вимірювання напруженості магнітного поля біля деталі.

Здебільшого вважають, що деталь розмагнічена, якщо  $K < 3$ . Якщо ж  $K > 3$ , то деталь слід піддати розмагніченню, наприклад шляхом видалення із соленоїда, який живиться від джерела змінного струму. При цьому максимальна швидкість переміщення деталі визначається за формулою:

$$V_{\max} = \frac{H_{\max}(1-c) \cdot f}{\left(\frac{dH}{dx}\right)_{\max}} \quad (2.16)$$

де  $H_{\max}$  - максимальна напруженість магнітного поля всередині соленоїда.

$C$  - коефіцієнт, що дорівнює відношенню амплітуди напруженості поля наступного циклу до амплітуди попереднього циклу.

### 2.3. Висновок

Проведене моделювання напружено-деформованого стану шийок колінчастого валу методом скінчених елементів дало змогу визначити найбільш навантажені ділянки колінчастого валу та умови до виникнення тріщин. Найбільш навантажені частини це галтелі шийки валу та сама шийка. При проведенні відновлення колінчастого валу методом наплавлення виникають великі напруження у шийках які з високою ймовірністю можуть викликати утворення тріщин. Тому колінчасті вали після відновлення обов'язково повинні проходити дефектоскопію на предмет виявлення тріщин.

Найбільш раціональним методом для цього є метод магнітопорошкової дефектоскопії. Наведено теоретичні розрахунки методів намагнічування та поводження магнітної часточки порошку.





## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Загальні відомості

**Магнітопорошковий метод дефектоскопії** — це неруйнівний метод контролю, який застосовується для виявлення поверхневих та підповерхневих дефектів у феромагнітних матеріалах (наприклад, сталь чи чавун). Принцип методу базується на намагнічуванні об'єкта та нанесенні на його поверхню магнітного порошку. Якщо у матеріалі є тріщини чи інші дефекти, вони створюють магнітне розсіювання, що спричиняє накопичення порошку в цих місцях, роблячи дефекти видимими [1, 12, 13, 14].

Тріщини можуть виникати внаслідок заводського браку, а в ремонтному виробництві досить часто тріщини з'являються після операцій наплавлення та термообробки. Згідно досліджень [15, 16] 70% деталей відновлюються наплавленням, що потенційно може викликати появу тріщин але також 8% це відновлення електролітичними покриттями, які також досить часто утворюють тріщини і 1% це відновлення деталей пластичним деформуванням (рис. 3.1).

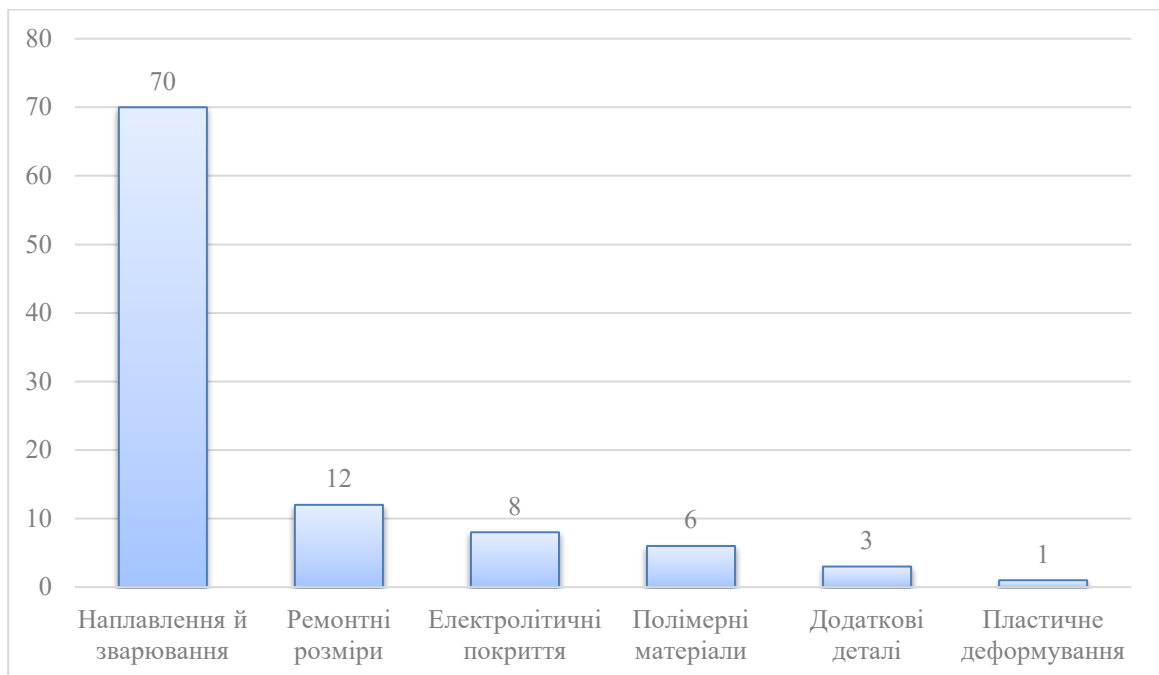


Рисунок 3.1 – Методи відновлення деталей машин, що потрапляють в ремонт

Саме ці методи схильні до утворення тріщин на відновленій поверхні тому для якісного ремонту треба поверхні відновлені даними методами перевіряти на наявність тріщин. Тому питання визначення оптимального способу виявлення тріщин є актуальним.

Актуальність впровадження методу магнітопорошкової дефектоскопії в ремонтному виробництві:

1. Швидкість і точність: дозволяє швидко виявляти дефекти, що важливо при ремонті техніки.
2. Низька вартість: економічно вигідний у порівнянні з іншими методами контролю.
3. Простота використання: не потребує складного обладнання або тривалого навчання персоналу.
4. Підвищення безпеки: вчасне виявлення дефектів знижує ризики аварій та підвищує надійність техніки.
5. Адаптивність: підходить для перевірки великогабаритних деталей і складних конструкцій, часто використовуваних у сільськогосподарській техніці.

Цей метод є особливо важливим у виробництві та ремонті, де контроль якості впливає на довговічність та безпечну експлуатацію техніки.

## **3.2. Методика проведення магнітопорошкової дефектоскопії**

### **3.2.1. Послідовність операцій магнітопорошкової дефектоскопії**

Цей процес виконується послідовно, щоб забезпечити якісний контроль та точне виявлення дефектів. Нижче наведені основні етапи таблиця 3.1 та рисунок 3.2.

Таблиця 3.1 – Етапи магнітопорошкової дефектоскопії

| Етап   | Операції етапу  |
|--|---|
| Очищення поверхні                              | <p>Видаляються всі забруднення (масло, бруд, іржа), що можуть вплинути на точність контролю.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Використовуються знежирювачі, розчинники або механічні засоби (щітки, шліфування).</li> <li>- Важливо досягти чистої та сухої поверхні, щоб магнітний порошок добре розподілявся і проявляв дефекти.</li> </ul>                                   |
| Підготовка суспензії або магнітного порошку    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Використовується сухий порошок або суспензія (порошок у рідині, наприклад, у маслі чи воді).</li> <li>- Концентрація порошку має бути оптимальною для чіткого проявлення дефектів.</li> <li>- При використанні суспензії перед застосуванням її слід добре перемішати для рівномірного розподілу частинок.</li> </ul>                              |
| Намагнічування деталі                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Обирається метод намагнічування (поздовжнє чи поперечне), залежно від форми деталі та напрямку очікуваних дефектів.</li> <li>- Використовуються магнітні котушки, переносні електромагніти або постійні магніти.</li> <li>- Важливо забезпечити достатнє магнітне поле для надійного виявлення тріщин, зазвичай 800–1200 А/м для сталі.</li> </ul> |
| Проявка тріщини (нанесення магнітного порошку) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Під час намагнічування на поверхню деталі наноситься порошок або суспензія.</li> <li>- У місцях з дефектами виникають магнітні полюси, що притягують порошок, утворюючи чіткі лінії вздовж тріщин.</li> <li>- Нанесення має бути рівномірним, щоб уникнути</li> </ul>  |

|                        |   |
|------------------------|---|
|                        | хибних результатів.   |
| Виявлення дефектів     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Після нанесення порошку деталь оглядають візуально або за допомогою спеціальних ламп (УФ-ламп для флуоресцентного порошку).</li> <li>- Виявлені дефекти фіксуються у вигляді накопичення порошку у вигляді ліній або плям.</li> <li>- Оцінюється розмір і форма дефектів для подальшого прийняття рішення щодо ремонту або заміни деталі.</li> </ul> |
| Розмагнічування деталі | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Після завершення контролю деталь розмагнічується для усунення залишкового магнетизму.</li> <li>- Використовуються спеціальні розмагнічувальні пристрої або змінні магнітні поля.</li> <li>- Це запобігає негативному впливу залишкового магнетизму на подальшу експлуатацію або роботу інших компонентів.</li> </ul>                                 |

Цей процес дозволяє швидко та ефективно виявляти дефекти на критично важливих поверхнях, забезпечуючи високу надійність деталей у виробництві та ремонті техніки.



Рисунок 3.2 – Послідовність операцій магнітопорошкової дефектоскопії

### 3.2.1. Методика дефектації колінчатого валу

Колінчастий вал встановлюється на центрувальні опори, шийки які підлягають дефектації ретельно очищаються від забруднень та залишків мастила. Далі проводиться підготовка магнітного порошка. Як магнітні порошки слугують порошки магнетиту або оксиду заліза  $Fe_2O_3$ . Перший має темний колір, і застосовується для аналізу світлих деталей, другий вирізняється бурочервоним кольором, і служить для дефектоскопії деталей з поверхнею темного кольору.

Порошок досить дрібний, від 5 до 10 мкм його зернистість. Суспензія на основі гасу або трансформаторного мастила, при співвідношенні 30-50 грам

порошку на 1 літр рідини, дає змогу успішно проводити магнітну дефектоскопію. Останнім часом розповсюджується аерозольний метод контролю. Використовується три види порошку:

- сухий для виконання сухого контролю;
- мокрий де у трансформаторне масло додається порошок і ретельно перемішується;
- аерозоль – це вже готова суспензія яка залита в спеціальний балончик під тиском.

Матеріали магнітної дефектоскопії наведено на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Порошки для дефектоскопії  
а - порошок, б - аерозоль

Потім проводиться підготовка магнітного дефектоскопа, виставляється інтенсивність намагнічування та вмикається установка рис. 3.4.

Суспензія за допомогою пензля (або наноситься аерозольно) наноситься на шийку яка підлягає дефектації, далі за допомогою виносних контактів проводиться намагнічування шийки. Під час намагнічування часточки магнітного порошку які зноходились в хаотичному порядку на шийці валу і тримались завдяки масла, починають притягуватись до тріщини і утворюють лінію, що ко-

пiює трiщину. При використаннi сухого методу, на шийку вала пiсля намагнiчування порошок просто посипається i там де є трiщин утворює лiнiю.

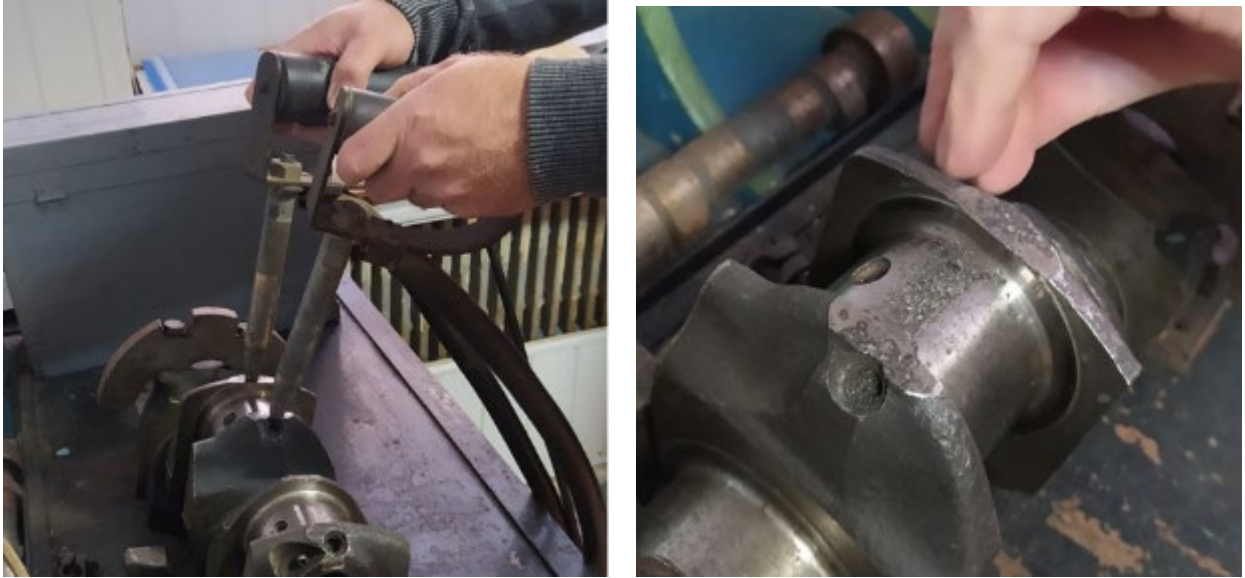


Рисунок 3.4 – Процес намагнiчування шийки колiнчатого валу та використання сухого методу контролю

Пiсля виявлення дефекту або не виявлення деталь розмагнiчується, шляхом змiни полярностi виносних контактiв.

### 3.3. Опис експериментальної установки

Магнiтопорошковий дефектоскоп М-217 (рис. 3.5) призначений для контролю рiзноманiтних деталей виконаних iз феромагнiтних матерiалiв.

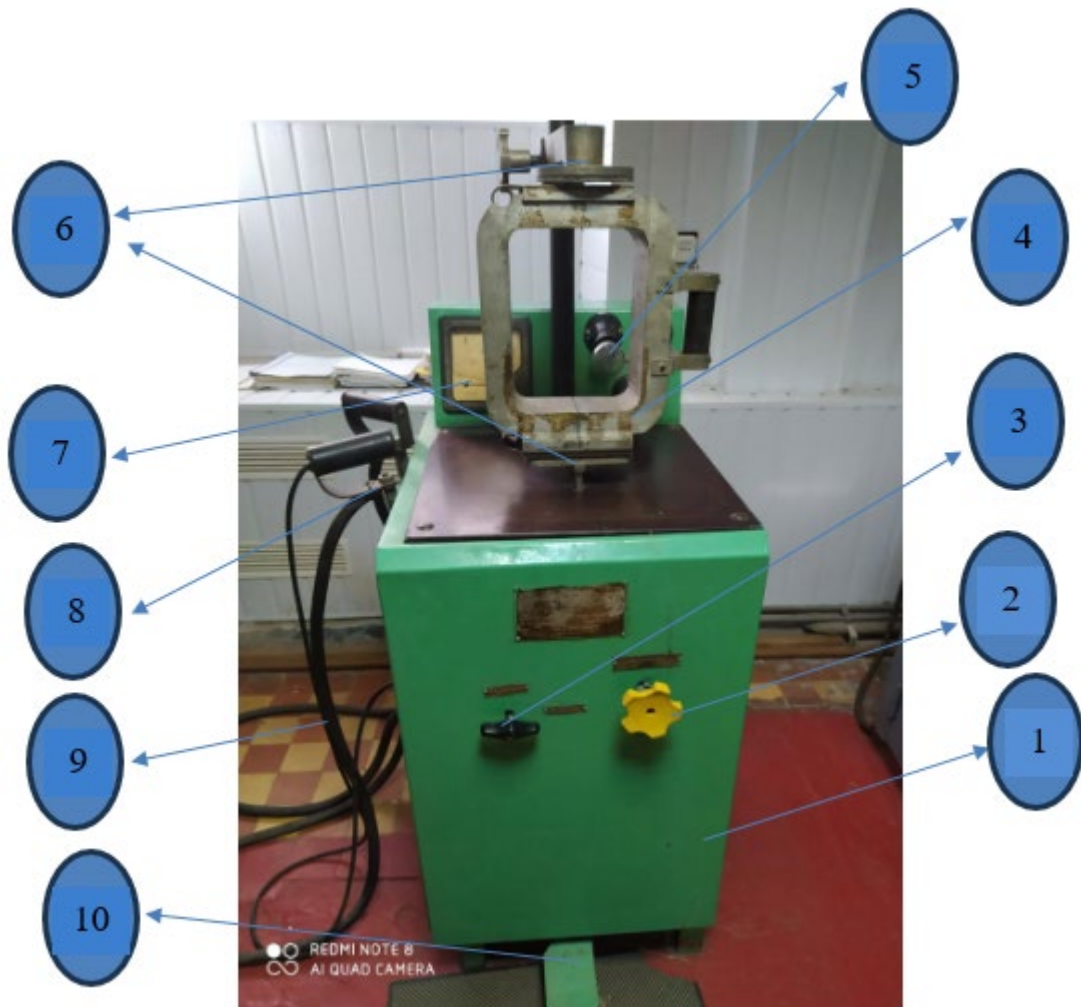


Рисунок 3.5 – Магнітний дефектоскоп моделі М-217

1- дефектоскоп, 2 – регулятор інтенсивності намагнічування, 3 – вмикач установки, 4 – силеноїд, 5 – контрольна лампа, 6 – контакти силеноїда, 7 – амперметр, 8 – виносні контакти, 9 – силові кабелі, 10 – педаль замикання контактів силеноїда

Намагнічувальний пристрій дефектоскопа виконано у двох виконаннях:

- 1 – виносні контакти (для намагнічування великогабаритних деталей;
- 2 – силеноїд (для намагнічування дрібних деталей).

Виносні контакти виконано у вигляді рукояток покритих діелектричним матеріалом, у нашому випадку ебонітом. До рукояток приєднано сталеві наконечники зі свинцевим сердечником і силові кабелі. Також на рукоятці встановлено кнопку яка подає струм на контакти.



Силуноід виконано у вигляді прямокутника заокругленої форми з робочим отвором діаметром 200 x 300 мм. Магнітне поле в міру віддалення від торців корпусу соленоїда симетрично зменшується. Поміщені всередину соленоїда протяжні деталі постійного перерізу намагнічуються симетрично щодо торців корпусу соленоїда.

Дефектоскоп М-217 (рисунок 3.4) використовують для виявлення поверхневих тріщин та виявлення підповерхневих дефектів. Дефектуванню можуть піддаватись різноманітні деталі машин, які виготовлені з феромагнітних матеріалів.

Електрична схема дефектоскопа представлена на рис. 3.6. Вона складається з таких основних частин:

- силова частина, до якої входить силовий трансформатор 220/6В потужністю 7 кВт, автотрансформатор, понижувальний трансформатор 220/36 В,
- прилади ввімкнення, вимірювання, сигналізації та управління,
- намагнічувальна частина, що включає пересувний контакт, контактний майданчик, ручні виносні контакти і соленоїд,
- облицьована ванна для суспензії.

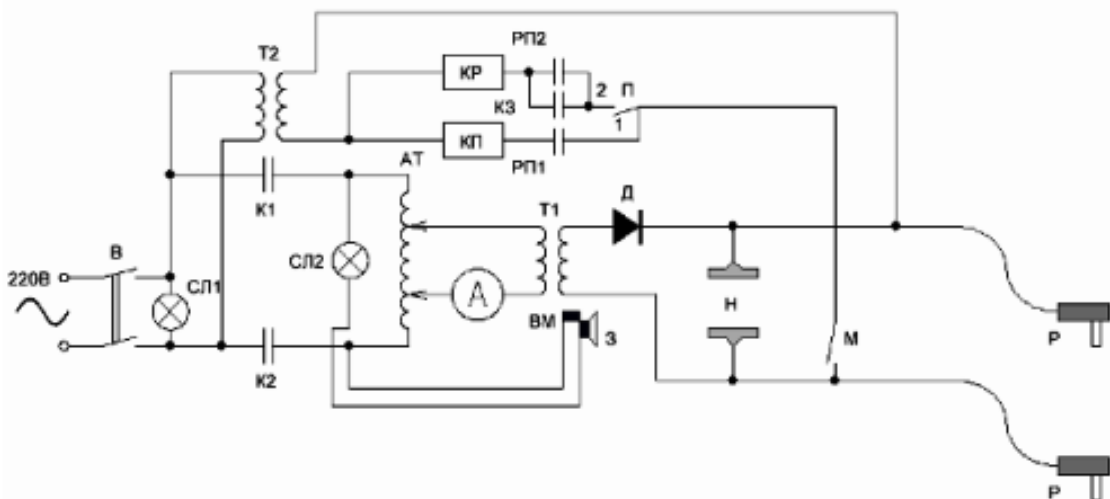


Рисунок 3.6. Електрична схема дефектоскопа М-217

В - пакетний вимикач, К1 і К2 - контакти магнітного пускача, РП1 і РП2 - контакти, П - перемикач, АТ - автотрансформатор, Т1 і Т2 - понижувальні трансформатори, КП - котушка управління магнітного пускача, КР - котушка проміжного реле, ВМ - вимикач магнітний, СЛ1 і СЛ2 - сигнальні лампи, Р - ручні

намагнічувальні контакти, Н - намагнічувальні контакти затискні, М - мікрореле, А - амперметр, З - дзвінок, Д - діод.

При замиканні реле В, через контакти К1 і К2 струм подається на автотрансформатор АТ. Автотрансформатор АТ живить понижувальний трансформатор Т1 220В на 6В, із вторинної обмотки якого випрямлену напругу подають на затискні намагнічувальні контакти Н, на ручні контакти Р і на котушку, що встановлюють у затискні контакти.

Оскільки трансформатор Т2 увімкнено паралельно з автотрансформатором, то під час замикання реле В струм піде і по первинній обмотці трансформатора Т2. Сигнальна лампа СЛ1 вказує на те, що реле увімкнено в мережу, сигнальна лампа СЛ2 свідчить про те, що силовий трансформатор Т1 також увімкнено. Реле Р має два можливих положення: у положенні 1 - тривале намагнічування для проведення дефектоскопії в прикладеному магнітному полі, у положенні 2 - миттєве намагнічування в полі залишкової намагніченості.

Коли реле Р перебуває в положенні 1, мікрореле М замикається, котушка керування магнітного пускача КП під'єднується до трансформатора Т1, вторинна обмотка якого живить її і контакти проміжного реле РП1. Ланцюг виявляється замкнутим. Пусковий пристрій призводить до замикання контактів К1 і К2, силова частина і разом з нею намагнічувальні пристрої отримують живлення.

Коли реле Р перебуває в положенні 2, паралельно котушці пускача замикається котушка проміжного реле КР. Під час замикання мікрореле замикається і контакт К3, що призводить до увімкнення проміжного реле, контакти РП2 замикаються, контакти РП1 розмикаються, відмикаючи магнітний пускач, і контакти К1 і К2 розмикаються. Процес триває 0,3 секунди. Поки мікрореле не буде замкнений, реле так і буде відключено, оскільки контакт К3 блокує контакти РП2. Після розмикання мікрореле система повертається в початковий стан.

Струм пристроїв намагнічування можна регулювати за допомогою автотрансформатора АТ, регулюючи величину струму від 0 до 5 кА. Під час намагнічування дзвінок З подає звуковий сигнал. Якщо струм намагнічування йде безперервно, сигнал буде безперервним, в аналогічному режимі працюватиме і сигнальна лампа СЛ2. У разі короткочасної подачі струму дзвінок і лампа спрацюють також короткочасно.

### 3.4. Порядок проведення намагнічування деталей

1 З урахуванням характеристики деталі вибрати спосіб намагнічування, схему намагнічування і розрахувати величину струму.

$$I = 3DH, \quad (3.1)$$

де D - діаметр контрольованої деталі, мм.

H - задана напруженість магнітного поля, А/см.

2 Підготувати магнітний дефектоскоп М-217 до роботи, увімкнути прилад у мережу, установити перемикач характеру намагнічування в положення «тривале намагнічування», установити за допомогою ручки автотрансформатора, розташованої на передній частині приладу, розрахункову величину струму.

3) Намагнітити деталь, для цього потрібно таке:

а) перенести перемикач «характер намагнічування» в положення «коротко-тимчасове намагнічування»;

б) встановити деталь між стаціонарними (ручними) контактами дефектоскопа,

в) натиснути кнопку рукоятки дефектоскопа і тим самим намагнітити деталь.

4. Змочити деталь суспензією. Виявити наявність і характер дефектів. Дати висновок про ступінь придатності деталі.

5. Видалити ганчіркою з поверхні деталі магнітну суспензію.
6. Розмагнітити деталь.

Формування магнітного поля над дефектом

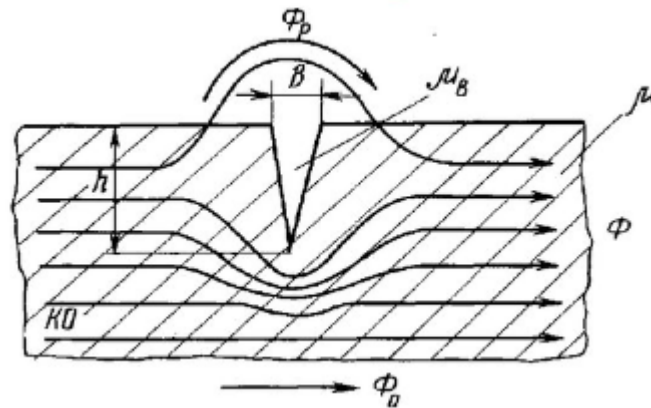


Рисунок 3.7 - Формування магнітного поля над дефектом

Для бездефектної ділянки [1, 12, 14, 17]

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{\Phi}{\mu \cdot S} \quad (3.2)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу бездефектної ділянки,

$S_d$  – площа поперечного перерізу дефекта,

$\Phi_p$  – магнітний потік для розсіювання,

$\Phi_0$  – зовнішнє магнітне поле,

$\Phi$  – магнітне поле, що формується в бездефектному матеріалі.

$$H = \frac{\Phi + \Phi_p}{\mu_b \cdot (S - S_d)}, \quad (3.3)$$

$$\mu_b \square \mu \Rightarrow H_d \square H$$

### 3.5. Результати експериментальних досліджень

Феромагнітні матеріали поділяються на дві основні групи залежно від величини роботи, необхідної для перемагнічування одиниці об'єму за один цикл перемагнічування. Ці групи — магнітом'які та магнітотверді.

Магнітом'які матеріали характеризуються вузькою петлею гістерезису, невеликою коерцитивною силою ( $H_c < 800$  А/м), високими значеннями відносної магнітної проникності. Вони легко намагнічуються та перемагнічуються у відносно слабких магнітних полях з напруженістю до сотень А/м.

Магнітотверді матеріали, навпаки, мають широку петлю гістерезису, високу коерцитивну силу ( $H_c \approx 800$  А/м) та намагнічуються до стану насичення в сильніших магнітних полях з напруженістю до десятків кА/м. До цієї групи належать вуглецеві та леговані конструкційні сталі (хромисті, вольфрамкові, кобальтові), а також спеціальні сплави, які використовуються для виготовлення постійних магнітів.

Конструкційні сталі зазвичай належать до групи феромагнітних матеріалів з нормальними петлями гістерезису. У таких матеріалах відношення залишкової індукції  $B_r$  до максимальної  $B_{max}$  на граничній петлі гістерезису майже постійне і знаходиться в діапазоні 0,5–0,7. Магнітотверді матеріали мають, як правило, більш низьке значення магнітної проникності у порівнянні з магнітом'якими матеріалами.

Магнітні характеристики феромагнітних матеріалів залежать не лише від хімічного складу сталі, а й від режиму її термообробки. На ремонтних підприємствах під час проведення магнітного контролю часто неможливо точно визначити попередній режим термообробки деталей. У таких випадках застосовуються спеціальні методи:

1. Коерцитиметр — прилад, що вимірює коерцитивну силу матеріалу;
2. Аналіз наявного зв'язку між твердістю та магнітними характеристиками сталі.

Ці методи допомагають встановити необхідні характеристики феромагнітних матеріалів, навіть якщо попередній термічний режим обробки невідомий.

Також хімічний склад сталей впливає на магнітні властивості деталі.

Вуглець вважається однією з найбільш «впливових» домішок. Зменшення кількості цього хімічного елемента знижує питомі втрати і збільшує магнітну індукцію матеріалів, а підвищення його вмісту погіршує магнітні властивості сплавів. На рис. 3.8 показано вплив домішки вуглецю на криві намагнічування заліза.

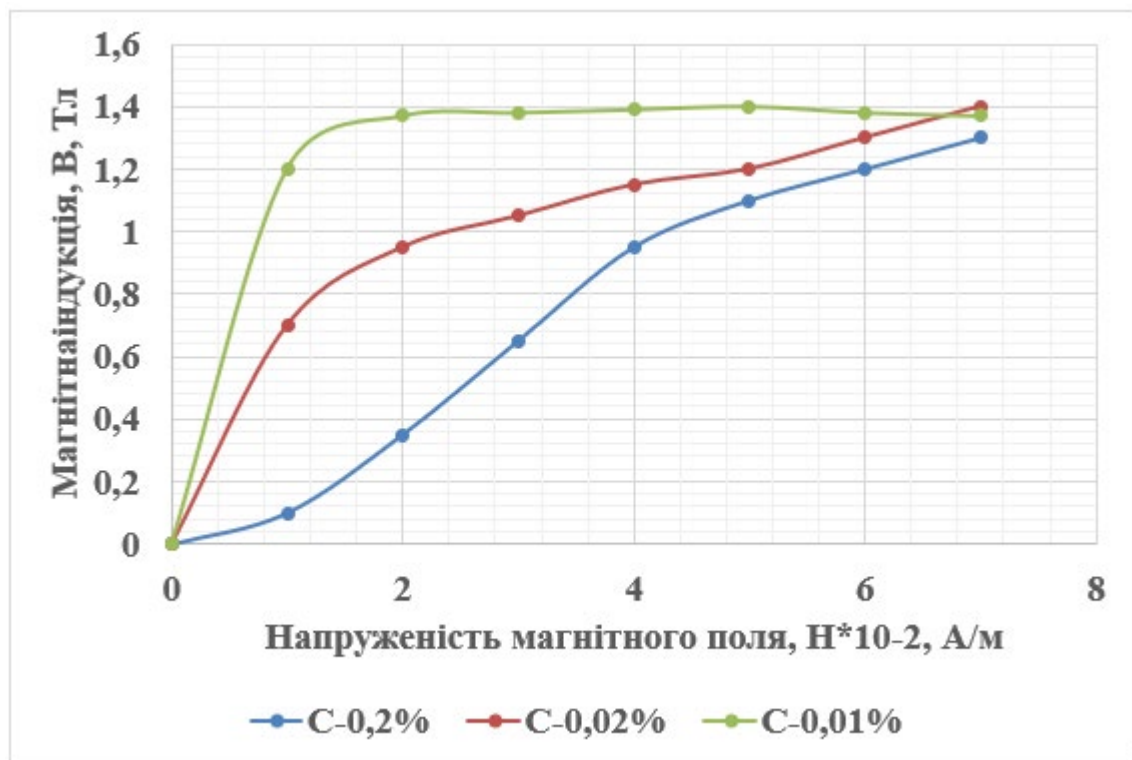


Рисунок 3.8 - Залежності магнітної індукції В від напруженості магнітного поля Н для феромагнітного матеріалу

Деталі двигуна виготовляються з різних марок сталі, під час еспериментальних досліджень проводили дослідження сталі 10, сталі 20ХГСА, сталі 30ХГСА та сталі 45Х.

Отримані точки наведено в додатку А. Згідно додатку А побудуємо залежність напруженості намагнічування поля та магнітної індукції рис. 3.9.

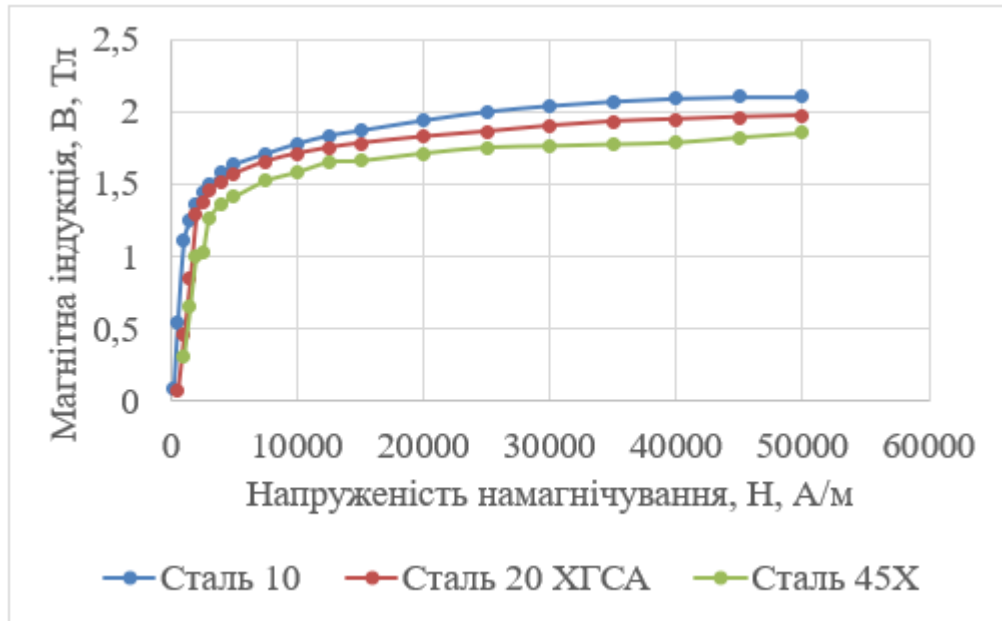
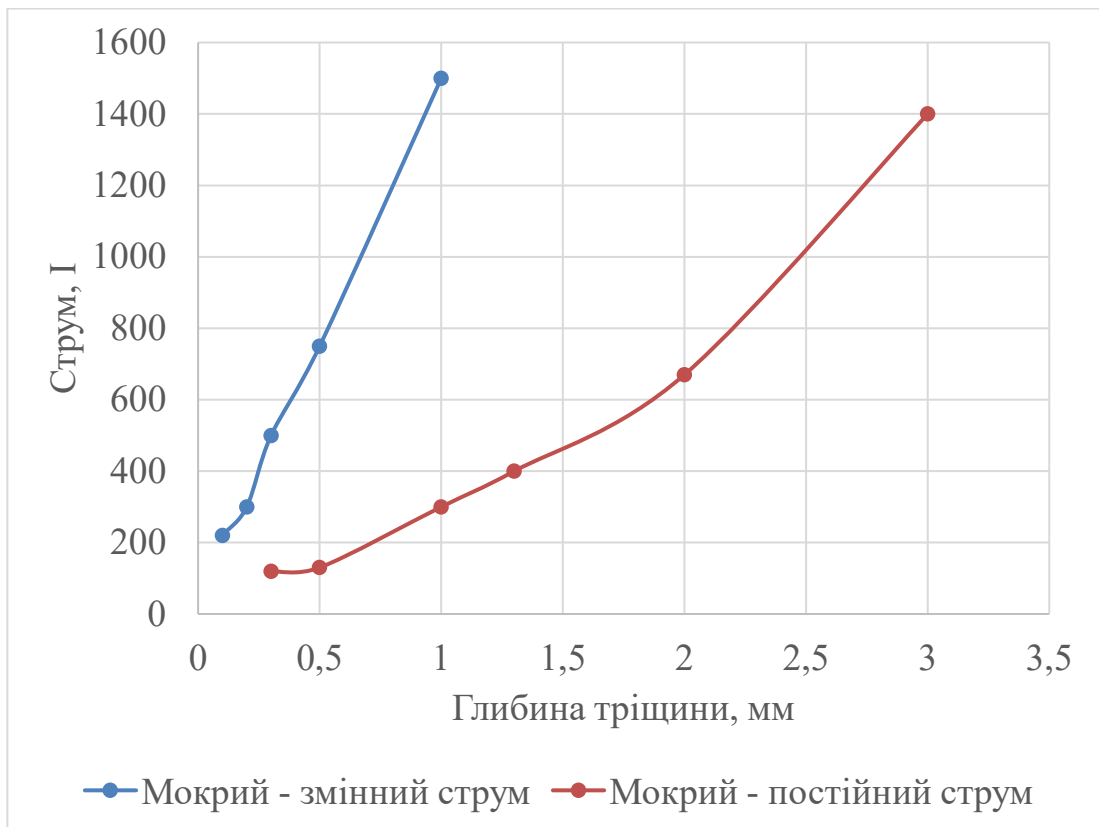
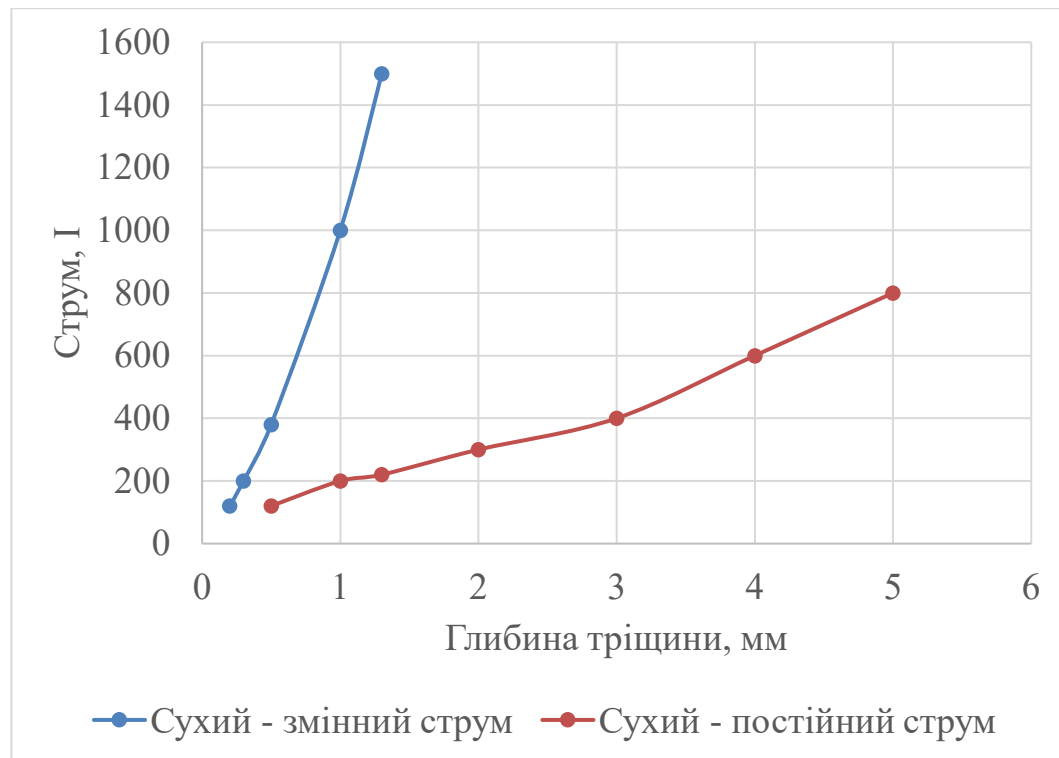


Рисунок 3.9 - Залежність напруженості намагнічування поля  $H$  та магнітної індукції  $B$

Також проводилось дослідження сили струму яка використовується при намагнічуванні в залежності від величини дефекту тобто глибини тріщини. Результати наведено на рис. 3.10.





б

Рисунок 3.10 – Залежність чутливості магнітопорошкового методу від виду струму і способу нанесення порошку  
а – мокрий спосіб, б – сухий спосіб

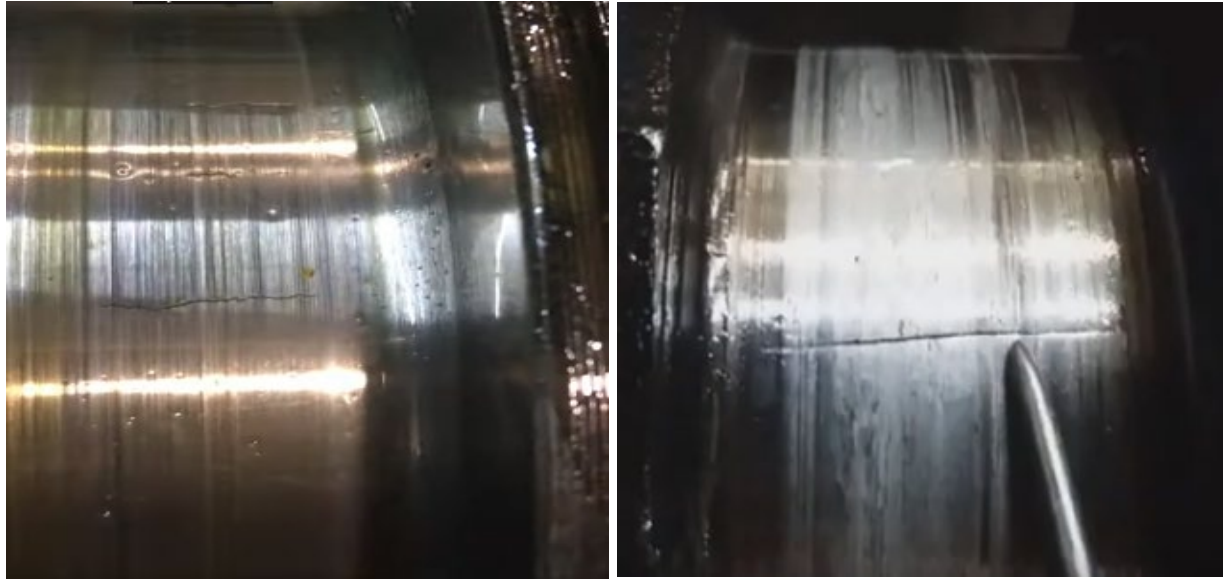
З графіка видно, що методи намагнічування постійним або змінним струмом, а також методи нанесення порошку — «сухий» або «мокрый» — практично не впливають на виявлення поверхневих дефектів. Однак рід струму, що використовується для намагнічування, а також метод нанесення порошку, значно впливають на виявлення підповерхневих дефектів.

У цьому контексті помітна перевага постійного струму перед змінним, що пояснюється рівномірністю щільності постійного струму по всьому перерізу провідника. Завдяки цьому магнітний потік залишається однорідним по всьому перерізу випробуваного виробу. На відміну від цього, при намагнічуванні змінним струмом виникає так званий **скін-ефект**, що призводить до концентрації струму та магнітного потоку ближче до поверхні виробу. Саме тому при намагнічуванні змінним струмом ефективніше виявляються лише поверхневі дефекти.

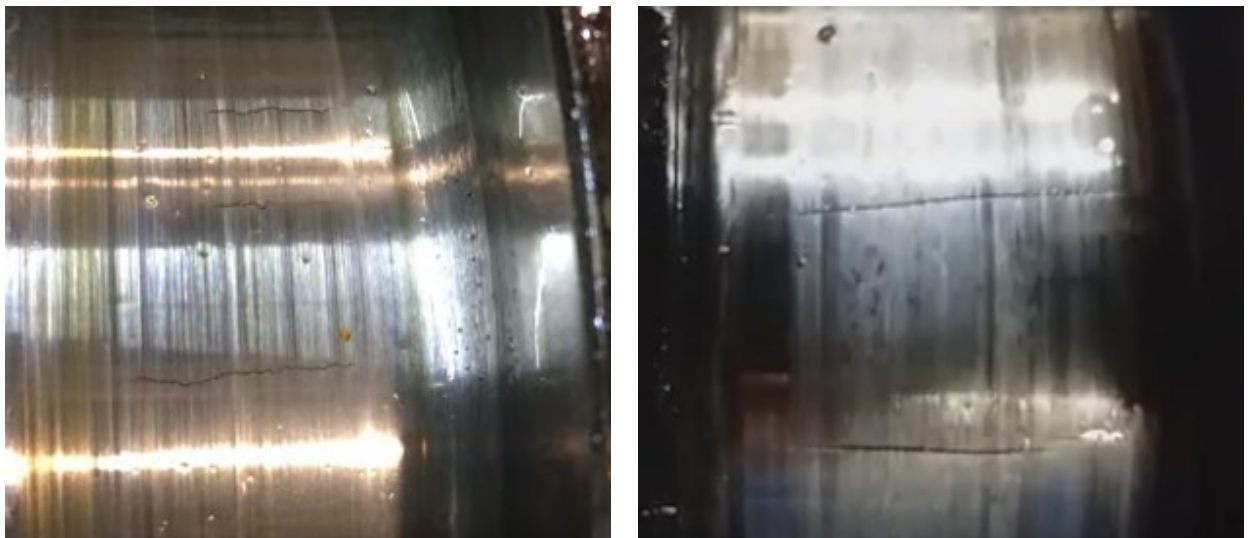


Також на графіку (рис. 3.9) помітна перевага «сухого» методу нанесення порошку над «мокрим» при виявленні підповерхневих дефектів. Це пояснюється в'язкістю рідини, яка використовується у «мокрому» методі. Через цю в'язкість для переміщення феромагнітних частинок у рідині потрібна значно більша сила впливу магнітного потоку, ніж при переміщенні тих самих частинок у повітряному середовищі.

Виявлені дефекти колінчатого валу наведено на рис. 3.11-3.12.



а



б

Рисунок 3.11 – Використання мокрого методу контролю

а – при змінному струмі, б – при постійному струмі



а

б

Рисунок 3.12 - Використання сухого методу контролю

а – при змінному струмі, б – при постійному струмі

### 3.6. Висновок

Під час застосування магнітних методів контролю найбільш ефективно виявляють площинні дефекти, такі як тріщини, непровари та несплавлення. Ці дефекти зазвичай мають найбільший розмір, орієнтований під прямим або майже прямим кутом до напрямку магнітного потоку.

Дефекти округлої форми (пори, шлакові включення, раковини) не можуть створювати достатнього потоку розсіювання і, як правило, під час контролю виявляються погано. Практикою встановлено, що магнітопорошковим методом виявляються поверхневі та підповерхневі (на глибині не більше 2 мм) тріщини з розкриттям від 0,01 мм, глибиною (висотою дефекту) від 0,05 мм і довжиною 0,5 мм і більше. Зі збільшенням глибини залягання дефектів зменшується швидкість скупчення магнітного порошку і збільшується ширина лінії порошку, що ускладнює виявлення дефектів і визначення їхнього характеру. Задовільна чіткість скупчення порошку досягається над дефектами, що залягають на глибині не більше 5-8 мм.

Найбільша чутливість магнітопорошкового методу досягається під час контролю гладко оброблених поверхонь. Якщо на поверхні контрольованого виробу є різкі переходи або великі шорсткості (наприклад, посилення валика шва, лускатість, подрізи), то магнітний порошок інтенсивніше накопичується не над дефектами, а в місцях переходів і заглиблень. Тому під час контролю зварних швів із посиленням або грубою лускатістю не можна однозначно судити про наявність внутрішніх дефектів.

## **4. БЕЗПЕКА ПРАЦІ**

### **4.1. Охорона та безпека праці при проведенні дефектувальних робіт**

Проведення дефектувальних робіт, зокрема магнітопорошкової дефектоскопії, пов'язане з певними ризиками для здоров'я працівників. Тому важливо врахувати шкідливі та небезпечні фактори, а також організувати роботу відповідно до вимог безпеки [21, 22].

Магнітопорошкова дефектоскопія: основні етапи та небезпечні фактори.

Магнітопорошкова дефектоскопія використовується для виявлення поверхневих та приповерхневих дефектів у металевих деталях. Процес передбачає:

1. Намагнічування об'єкта (постійним або змінним магнітним полем).
2. Нанесення суспензії з магнітним порошком.
3. Виявлення дефектів шляхом утворення скупчень частинок порошку в зонах порушення суцільності металу.

### **4.2. Шкідливі та небезпечні фактори при магнітопорошковій дефектоскопії**

При проведенні дефектоскопії виникають наступні шкідливі і небезпечні фактори (рис. 4.1) [21, 22].



Рисунок 4.1 – Шкідливі та небезпечні фактори при дефектації деталей

#### 1. Електромагнітне поле

- Тривала дія змінного магнітного поля може викликати шкідливий вплив на нервову та серцево-судинну систему.

- Існує ризик коротких замикань або ураження електрострумом через використання потужних джерел струму для намагнічування.

#### 2. Токсичні речовини

- Використання суспензій або порошків, що містять леткі органічні розчинники, може спричинити подразнення дихальних шляхів, алергічні реакції або отруєння.

#### 3. Пил та аерозолі

- Вдихання дрібнодисперсного магнітного порошку може викликати професійні захворювання дихальної системи.

#### 4. Механічні ризики

- Робота з великими чи важкими деталями несе ризик травмування при їх транспортуванні або обробці.

#### 5. Недостатнє освітлення

- Ускладнює контроль якості, що може спричинити напругу зору та підвищити ризик виробничих помилок.

### **4.3. Вимоги до безпечної організації робіт**

#### 1. Захист від електромагнітних полів

- Встановлення санітарних зон для роботи з обладнанням високої напруги.

- Використання екранів, що знижують інтенсивність магнітних полів.

- Обмеження часу роботи під впливом магнітного поля.

#### 2. Індивідуальні засоби захисту (ІЗЗ)

- Респіратори для захисту органів дихання від порошків та аерозолів.

- Захисні окуляри для запобігання потраплянню частинок в очі.

- Антистатичний та ізолюючий спецодяг для роботи з електрообладнанням.

#### 3. Вентиляція приміщень

- Використання локальних витяжних систем для видалення пилу та парів.

- Підтримання нормативних показників температури та вологості в приміщенні.

#### 4. Організація робочого процесу

- Навчання персоналу безпечним методам роботи та регулярне проведення інструктажів.

- Періодичний медичний огляд працівників.

- Обмеження ручних операцій при роботі з важкими деталями – використання підйомних механізмів.

#### 5. Електробезпека

- Перевірка справності електрообладнання перед початком роботи.
- Заземлення установок для уникнення ураження струмом.

#### 4.4. Заходи щодо забезпечення захисту працівників від дії шкідливих та небезпечних факторів

Для ефективного захисту працівників при проведенні магнітопорошкової дефектоскопії та інших дефектувальних робіт необхідно впроваджувати комплексні заходи (рис. 4.2.). Вони включають інженерно-технічні рішення, використання індивідуальних засобів захисту (ІЗЗ), організаційні заходи та контроль за дотриманням норм охорони праці.



Рисунок 4.2 - Заходи щодо забезпечення захисту працівників від дії шкідливих та небезпечних факторів

##### 1. Інженерно-технічні заходи

Ці заходи спрямовані на мінімізацію впливу небезпечних факторів на працівників завдяки технічним рішенням.

- Автоматизація та механізація робочих процесів

Використання автоматизованих систем для подачі магнітного порошку та обробки деталей знижує ризик контакту працівників із небезпечними речовинами.

- Встановлення систем локальної вентиляції та фільтрації повітря

Видалення пилу та випарів безпосередньо в зоні роботи знижує ризик вдихання токсичних речовин.

- Захисне екранування

Екранування обладнання, що генерує магнітне поле, знижує його інтенсивність у робочій зоні.

- Заземлення та перевірка електрообладнання

Регулярна перевірка електромагнітних установок і контроль за їх заземленням для уникнення ураження електрострумом.

## 2. Індивідуальні засоби захисту (ІЗЗ)

Правильний підбір та використання ІЗЗ забезпечують безпеку працівників у випадках, коли неможливо повністю усунути шкідливі фактори.

- Засоби захисту органів дихання:

Респіратори чи фільтрувальні маски для роботи з пилом та аерозолями.

- Засоби захисту зору:

Захисні окуляри або екрани, які запобігають потраплянню частинок у очі та зменшують ризик впливу шкідливих випарів.

- Захисний одяг та рукавиці:

Спецодяг із антистатичними властивостями для захисту від електромагнітного випромінювання та шкідливих речовин.

- Взуття з антистатичною підошвою:

Запобігає накопиченню статичної електрики та знижує ризик ураження струмом.

## 3. Організаційні заходи



Організація робочого процесу повинна знижувати ризики для здоров'я працівників і сприяти ефективному виконанню робіт.

- Планування робочих змін:

Регламентування часу роботи в зоні підвищеного магнітного випромінювання (згідно з нормами) для запобігання перевтомі та шкідливому впливу на організм.

- Проведення інструктажів та навчань:

Регулярне навчання працівників безпечним методам роботи та правильному використанню ІЗЗ.

- Медичний контроль:

Періодичний медичний огляд працівників, які працюють з небезпечними речовинами чи обладнанням. Це допомагає вчасно виявляти професійні захворювання.

- Знаки безпеки та інструкції:

Усі небезпечні зони мають бути чітко позначені. Інструкції з охорони праці повинні бути доступними на робочих місцях.

#### 4. Контроль та моніторинг робочого середовища

Регулярний контроль за станом робочих місць допомагає оперативно виявляти відхилення від норм і вживати необхідних заходів.

- Моніторинг концентрації шкідливих речовин у повітрі:

Вимірювання концентрації пилу та аерозолів у приміщенні допомагає забезпечити дотримання нормативів.

- Контроль за рівнем магнітного поля:

Використання спеціальних приладів для вимірювання рівня електромагнітного випромінювання.

- Оцінка рівня освітленості:

Контроль за освітленням допомагає знизити ризик перевтоми зору та підвищити точність виконання робіт.

#### 5. Психофізіологічна підтримка працівників

- Ротація працівників:

Організація чергування робітників на складних операціях для уникнення перевтоми.

- Перерви та відпочинок:

Надання регулярних перерв, особливо для робіт із підвищеною концентрацією уваги.

- Психологічна підтримка:

Організація тренінгів із техніки безпеки та управління стресом.

#### **4.5. Висновок**

Дотримання правил охорони праці під час магнітопорошкової дефектоскопії є критично важливим для забезпечення безпеки працівників та запобігання нещасним випадкам. Організація роботи з урахуванням шкідливих та небезпечних факторів, застосування сучасних ІЗЗ і вентиляційних систем, правильна організація робочого місця, використання сучасних технічних рішень, а також систематичний контроль за дотриманням норм безпеки дозволяють знизити ризики для здоров'я працівників і забезпечити високу якість виконання робіт.

## РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

### 5.1. Чутливість методів контролю

Під час вибору методу дефектації слід враховувати комплекс чинників: виявлення дефектів, точність і достовірність, вартість апаратури і виконання робіт, оперативність, продуктивність і безпека. Жоден із методів не є універсальним, тому не здатний повною мірою адекватно вирішувати всі завдання об'єктивної реальності ремонтного виробництва. Виявлення дефектів характеризується можливістю їх фіксації діагностичними приладами, що відповідно залежить від виду дефекту, його розмірів, орієнтації та місця розташування у виробі. Достовірність контролю зумовлює ймовірність прийняття правильного рішення про ступінь придатності контрольованих виробів [23, 24].

Чутливість методу оцінюється найменшими розмірами виявлених дефектів: для поверхневих - шириною розкриття на поверхні, протяжністю в глиб і по поверхні деталі; для глибинних - розмірами дефекту і глибиною залягання.

Чутливість залежить від специфічних особливостей методу контролю, технічних можливостей апаратури, матеріалу і стану поверхні деталі, умов контролю. Похибка вимірювання є оцінкою якісного порівняння вимірювальних операцій, залежить від об'єктивних (клас точності приладу, налаштування, повірка) і суб'єктивних (кваліфікація виконавця, зовнішні умови) чинників рис. 5.1. Основні параметри методів неруйнівного контролю наведено в таблиці 5.1.

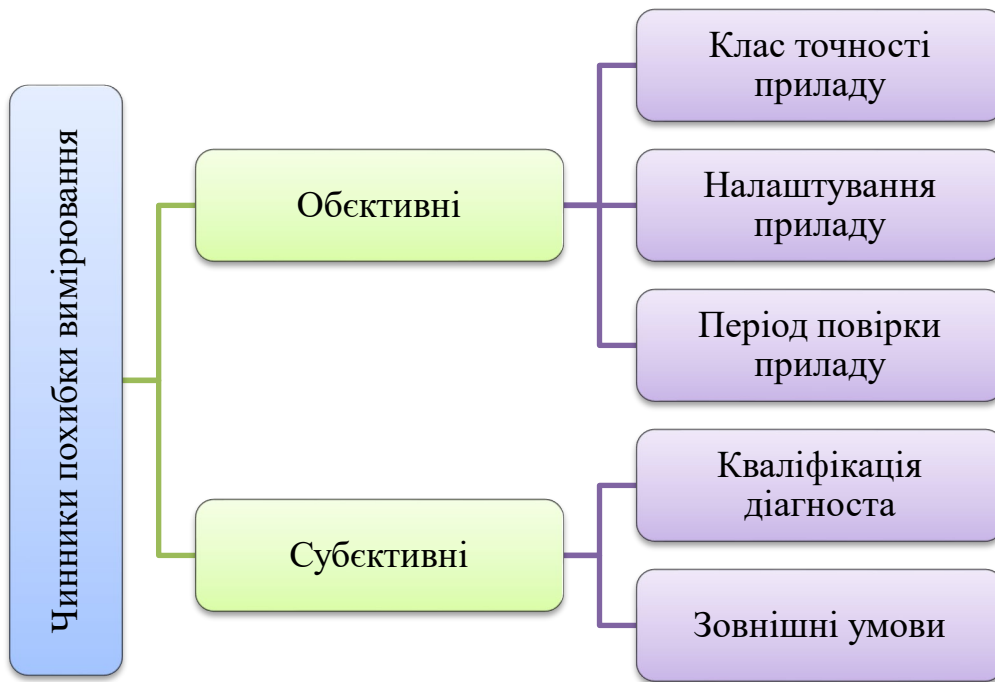


Рисунок 5.1 – Чинники похибки вимірювання

Таблиця 5.1 - Чутливість і похибка методів неруйнівного контролю

| Метод             | Мінімальні розміри тріщини, мм |                   |             | Середня точність, % |
|-------------------|--------------------------------|-------------------|-------------|---------------------|
|                   | Ширина розкриття               | Глибина розкриття | Протяжність |                     |
| Ультразвуковий    | 0,001                          | 0,1               | 0,5         | 11                  |
| Магнітопорошковий | 0,001                          | 0,01-0,03         | 0,5         | 12                  |
| Капілярний        | 0,001                          | 0,02-0,05         | 3           | 6                   |
| Рентгенівський    | 0,001                          | 0,01              | 0,1         | 8                   |

Як видно з таблиці всі методи досить чутливі і мають незначні похибки але враховуючи складність, високі вимоги безпеки використання та обмеженість використання у ремонтному виробництві тракторів і автомобілів, рентгенівський метод розглядати не будемо, а також виключимо капілярний метод із за низької точності і низької універсальності використання, а також неможливості виявлення підповерхневих дефектів на відміну від ультразвукового та магнітопорошкового.

Розглянемо економічний ефект на прикладі двигуна M11 Cummins.

Розглядати будемо два варіанти, коли виконується повністю капітальний ремонт двигуна і коли виконують ремонт конкретної деталі.

## 5.2. Розрахунок собівартості дефектоскопії

Собівартість включає:

- Зарплату працівників:

$$C_{\text{зар}} = Z \cdot T \cdot N_{\text{пр}}, \quad (5.1)$$

де  $Z$  - погодинна ставка працівника, грн;

$T$  - тривалість проведення дефектоскопії для одного колінчастого валу (в годинах), год.;

$N$  - кількість працівників, що беруть участь у дефектоскопії.

Для магнітопорошкового контролю

$$C_{\text{зар.мп}} = 255,6 \cdot 0,17 \cdot 1 = 43,45 \text{ грн.}$$

Для ультразвукового

$$C_{\text{зар.уз}} = 255,6 \cdot 0,5 \cdot 1 = 127,8 \text{ грн.}$$

- Витрати на матеріали та обладнання:

$$C_{\text{матер}} = C_{\text{вит.мат та обл}} + \frac{A_{\text{обл}}}{N_{\text{валів}}}, \quad (5.2)$$

де  $C_{\text{вит.мат. та обл.}}$  - витрати на матеріали для одного тестування, грн;

$A_{\text{обл}}$  – амортизація обладнання, грн.;

$N_{\text{валів}}$  - кількість валів, які обстежуються за рік.

Магнітопорошкова дефектоскопія

$$C_{\text{матер}} = 15 + \frac{7560}{200} = 52,8 \text{ грн.}$$

Для ультразвукового

$$C_{\text{матер}} = 0 + \frac{22050}{200} = 110,25 \text{ грн.}$$

Тоді повна собівартість дефектоскопії для одного колінчастого валу буде:

$$C_{\text{дефек.}} = C_{\text{матер.}} + C_{\text{зарп.}} \quad (5.3)$$

Для магнітопорошкового контролю

$$C_{\text{дефек.мп}} = 52,8 + 43,54 = 96,34 \text{ грн.}$$

Для ультразвукового

$$C_{\text{дефек.уз}} = 127,8 + 110,25 = 238,05 \text{ грн.}$$

### 5.3. Розрахунок економії на ремонті

Якщо дефектоскопія дозволяє виявити дефекти на ранньому етапі, то це знижує ймовірність більш дорогих ремонтів у майбутньому. Економічний ефект від дефектоскопії складається з:

**Зниження витрат на ремонт:**

$$E_{\text{рем.}} = (C_{\text{зр}} - C_{\text{пр}}) \cdot P, \text{ грн.} \quad (5.4)$$

де  $C_{\text{зр}}$  – вартість значного ремонту (якщо дефект не виявлено), грн;

$C_{\text{пр}}$  – вартість поточного ремонту (якщо дефект виявлено вчасно), грн;

$P$  – ймовірність виявлення дефекту, завдяки дефектоскопії.

$$E_{\text{рем.}} = (210000 - 150000) \cdot 0,98 = 58800 \text{ грн.}$$

### Подовження терміну служби двигуна:

$$E_{\text{терм.сл.}} = \left( \frac{T_{\text{з.деф.}}}{T_{\text{без.деф.}}} - 1 \right) \cdot C_{\text{двиг.}} \quad (5.5)$$

де  $T_{\text{з.деф.}}$  – середній термін служби двигуна з проведенням дефектоскопії, тис. км. пробігу.

$T_{\text{без.деф.}}$  – середній термін служби двигуна без дефектоскопії, тис. км. пробігу.

$C_{\text{двиг.}}$  - вартість двигуна, грн.

$$E_{\text{терм.сл.}} = \left( \frac{1600000}{1200000} - 1 \right) \cdot 723000 = 241000 \text{ грн.}$$

### • Зниження аварійності:

$$E_{\text{авар.}} = (P_{\text{ав.з.деф.}} - P_{\text{ав.без.деф.}}) \cdot C_{\text{ав.}} \cdot N_{\text{дв.}}, \quad (5.6)$$

де  $P_{\text{ав.з.деф.}}$ ,  $P_{\text{ав.без.деф.}}$  - ймовірності аварій без та з дефектоскопією відповідно,

$C_{\text{ав.}}$  - середня вартість ліквідації аварії, грн.;

$N$  - кількість двигунів, що обслуговуються.

$$E_{\text{авар.}} = (0,95 - 0,8) \cdot 95000 \cdot 1 = 14250 \text{ грн.}$$

Загальний економічний ефект:

$$E_{\text{заг.}} = E_{\text{рем.}} + E_{\text{терм.сл.}} + E_{\text{ав.}} = 58800 + 241000 + 14250 = 314050 \text{ грн.} \quad (5.7)$$

#### 5.4. Розрахунок терміну окупності додаткових капіталовкладень

Якщо для дефектоскопії були потрібні додаткові капіталовкладення (наприклад, на обладнання), то термін окупності можна обчислити за формулою:

$$T_{\text{окуп.}} = \frac{C_{\text{кап.вкл.}}}{(E_{\text{заг.}} - C_{\text{дефек.}}) \cdot N}, \text{ років.} \quad (5.8)$$

де  $C_{\text{кап.вкл.}}$  - додаткові капіталовкладення для впровадження дефектоскопії, грн.

$C_{\text{дефек.}}$  - собівартість дефектоскопії, грн.

$N$  - кількість обстежених валів за рік (згідно досліджень у 7% валів виникають тріщини, тому при програмі ремонту підприємства 200 двигунів на рік, розрахунок проведемо для 7% двигунів тобто 14).

Розрахунок додаткових капіталовкладень

$$C_{\text{кап.вкл.}} = C_{\text{обл.}} + C_{\text{дільн.}} + C_{\text{ін.}}, \text{ грн.} \quad (5.9)$$

де  $C_{\text{обл.}}$  - вартість обладнання, грн.

$C_{\text{дільн.}}$  - вартість робіт по організації ділянки, грн.

$C_{\text{ін.}}$  - невраховані роботи, складають 10% від вартості обладнання, грн.  
для магнітопорошкового контролю



$$C_{\text{кап.вкл.}} = 456000 + 768000 + 45600 = 1269600, \text{грн.}$$

Для ультразвукового

$$C_{\text{кап.вкл.}} = 556000 + 768000 + 55600 = 1379600, \text{грн.}$$

Розрахуємо термін окупності

Для магнітопорошкового контролю

$$T_{\text{окуп.}} = \frac{1269600}{(314050 - 96,34) \cdot 14} = 0,2 \text{року.}$$

Для ультразвукового

$$T_{\text{окуп.}} = \frac{1379600}{(314050 - 238,05) \cdot 14} = 0,3 \text{року.}$$

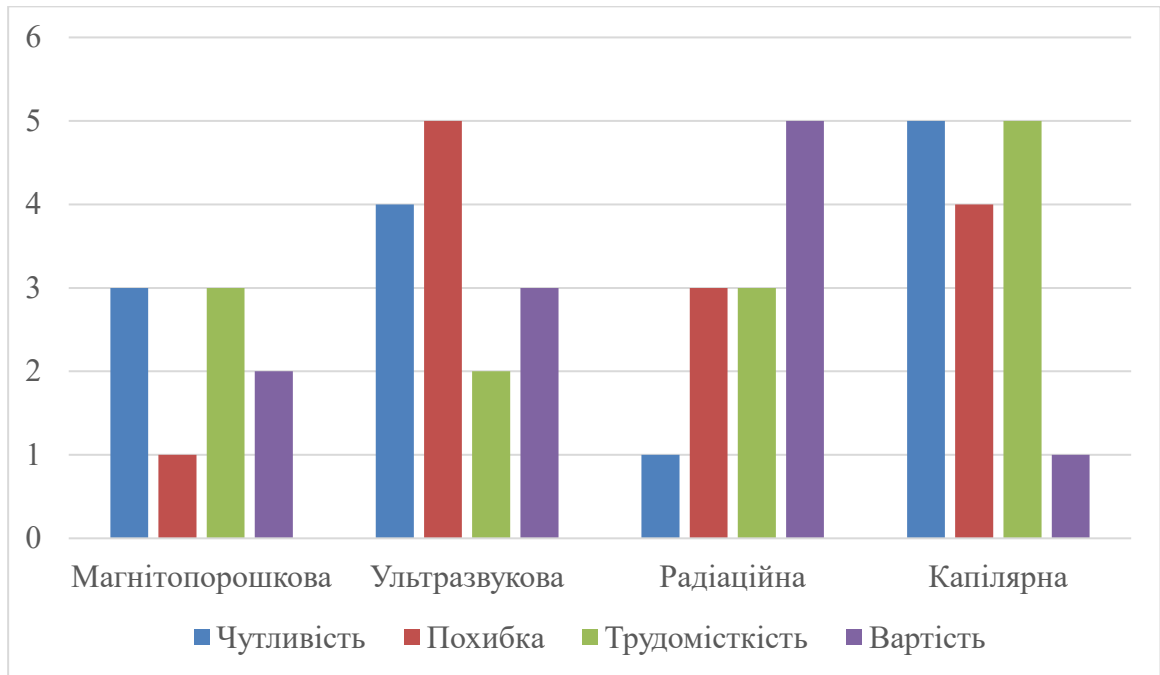
Результати розрахунків наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Результати розрахунків економічних показників

| № | Показник                                   | Магнітопорошкова<br>дефектоскопія | Ультразвукова<br>дефектоскопія |
|---|--|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | Вид робіт                                  | Дефектоскопія                     |                                |
| 2 | Програма робіт загальна/дефектна           | 200/14                            | 200/14                         |
| 3 | повна собівартість дефектоскопії, грн.     | 96,34                             | 238,05                         |
| 4 | Зниження витрат на ремонт, грн             | 58800                             |                                |
| 5 | Подовження терміну служби двигуна,<br>грн. | 241000                            |                                |
| 6 | Зниження аварійності, грн.                 | 14250                             |                                |
| 7 | Загальний економічний ефект, грн.          | 314050                            |                                |

|   |                         |         |         |
|---|-------------------------|---------|---------|
| 8 | Капіталовкладення, грн. | 1269600 | 1379600 |
| 9 | Термін окупності        | 0,2     | 0,3     |

На основі аналізу техніко-економічних характеристик методів проведено їх ранжування за рівнем ефективності виконання визначених завдань (рис.. 5.2).



*Примітка: оцінки від 1 до 5 відповідають рівню від високого до низького*

Рисунок 5.2 - Ранжування за рівнем ефективності методів дефектоскопії

## 5.5. Висновок

У розділі проведено техніко-економічну оцінку різних методів дефектоскопії, зокрема магнітопорошкового та ультразвукового. Аналіз показав, що кожен метод має свої переваги і недоліки, що впливають на ефективність їх застосування в залежності від умов експлуатації та типу досліджуваних матеріалів.

Магнітопорошковий метод виявився економічно доцільним для перевірки деталей з феромагнітних матеріалів, оскільки він дозволяє з високою точністю виявляти поверхневі та підповерхневі дефекти. Незважаючи на вартість облад-

нання та витрати на підготовку до обстеження, цей метод окупається за рахунок зниження витрат на ремонт та подовження терміну служби обладнання.

Ультразвуковий метод показав себе як більш універсальний, оскільки може застосовуватися до матеріалів різного складу та структури, а також здатний виявляти дефекти на більшу глибину. Однак його собівартість вища через необхідність використання спеціального обладнання та більш тривалий час проведення обстеження.

Враховуючи результати економічного аналізу, доцільність використання того чи іншого методу залежить від специфіки деталей, умов експлуатації, фінансових можливостей підприємства та бажаного рівня надійності. Таким чином, оптимальний підхід до дефектоскопії може включати комбіноване застосування обох методів, що забезпечує найвищу якість контролю при помірних економічних витратах.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Деталі двигуна та в цілому машин сприймають значні навантаження і досить часто це бувають знакозмінні або ударні навантаження, а досить часто комбінацію цих навантажень. В результаті дії таких навантажень у деталях можливо виникнення тріщин. Тому після відновлення деталей обов'язково необхідно проводити їх дефектоскопію.

Проведене моделювання напружено-деформованого стану шийок колінчастого валу методом скінчених елементів дало змогу визначити найбільш навантажені ділянки колінчастого валу та умови до виникнення тріщин. Найбільш навантажені частини це галтелі шийки валу та сама шийка. При проведенні відновлення колінчастого валу методом наплавлення виникають великі напруження у шийках які з високою ймовірністю можуть викликати утворення тріщин. Тому колінчасті вали після відновлення обов'язково повинні проходити дефектоскопію на предмет виявлення тріщин.

Під час контролю магнітними методами найвпевненіше виявляють площинні дефекти: тріщини, непровари і несплавлення, найбільший розмір яких орієнтований під прямим або близьким до нього кутом щодо напрямку магнітного потоку. Дефекти округлої форми (пори, шлакові включення, раковини) не можуть створювати достатнього потоку розсіювання і, як правило, під час контролю виявляються погано. Практикою встановлено, що магнітопорошковим методом виявляються поверхневі та підповерхневі (на глибині не більше 2 мм) тріщини з розкриттям від 0,01 мм, глибиною (висотою дефекту) від 0,05 мм і довжиною 0,5 мм і більше. Зі збільшенням глибини залягання дефектів зменшується швидкість скупчення магнітного порошку і збільшується ширина лінії порошку, що ускладнює виявлення дефектів і визначення їхнього характеру. Задовільна чіткість скупчення порошку досягається над дефектами, що залягають на глибині не більше 5-8 мм.

Найбільша чутливість магнітопорошкового методу досягається під час контролю гладко оброблених поверхонь. Якщо на поверхні контрольованого

виробу є різкі переходи або великі шорсткості (наприклад, посилення валика шва, лускатість, подрізи), то магнітний порошок інтенсивніше накопичується не над дефектами, а в місцях переходів і заглиблень. Тому під час контролю зварних швів із посиленням або грубою лускатістю не можна однозначно судити про наявність внутрішніх дефектів.

Дотримання правил охорони праці під час магнітопорошкової дефектоскопії є критично важливим для забезпечення безпеки працівників та запобігання нещасним випадкам.

Враховуючи результати економічного аналізу, доцільність використання того чи іншого методу залежить від специфіки деталей, умов експлуатації, фінансових можливостей підприємства та бажаного рівня надійності. Таким чином, оптимальний підхід до дефектоскопії може включати комбіноване застосування обох методів, що забезпечує найвищу якість контролю при помірних економічних витратах.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Дирда В. І. Ремонт машин та обладнання. Підручник для вищих навчальних закладів [Текст] / В. І. Дирда, П. Т. Мельянцов, О. І. Кириленко та ін. – Днівськ, Журофонд, 2015. – 292 с.
2. Дорошенко О. В. Обґрунтування методів та параметрів діагностування паливних систем мобільних сільськогосподарських машин / О. В. Дорошенко, Є. В. Калганков. // Zbiór artykułow naukowych z Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej «Nowy sposób rozwoju Inżynieria i Technologia» Sp. Z o.o. «Diamond trading tour» Warszawa. – 2017. – С. 44–50
3. Калганков, Є.В. Технічне діагностування об’ємних гідроприводів трансмісії як об’єктивна необхідність / Є.В. Калганков // Сучасна наука: теорія і практика. – Запоріжжя, 2012. – Т. 2. – С. 88-90
4. Мельянцов П. Т. Організація використання техніки за умов дефіциту матеріально - технічних ресурсів / П. Т. Мельянцов, Є. В. Калганков. // Zbiór raportów naukowych. „Inżynieria i technologia. Teoria. Praktyk Sp. z o.o. «Diamond trading tou. – 2010. – С. 84–87.
5. Кисликов, В. та Лущик, В., (2006). *Будова й експлуатація автомобілів*. 6-те вид. Київ: Либідь.
6. A. Golovan, S. Rudenko, I. Gritsuk, A. Shakhov, et al., “Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals,” SAE Technical Paper 2018-01-1774, 2018, doi:10.4271/2018-01-1774.
7. Калганков, Є.В. Обґрунтування інформативних діагностичних параметрів технічного стану об’ємного гідроприводу трансмісії ГСТ-90 / Є.В. Калганков // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2009. – No 2. – С. 71-74
8. Волошин Р.В. Обґрунтування ефективних методів діагностування агрегатів мобільних сільськогосподарських машин / Р.В. Волошин, Є.В. Калганков // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції "Інтеграція

світових наукових процесів як основа суспільного прогресу": ГО «Інститут інноваційної освіти»; Науково-учбовий центр прикладної інформатики НАН України. – Київ. 2018. – С. 200-205.

9. Калініч М.О. Дослідження параметрів відновлення деталей типу вал методом наплавлення / Zbiorartykułownaukowych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej " Inżynieriaitechnologia. Współczesnetendencje w nauceiedukacji " Paris: Sp. z o.o. "Diamond trading tour". – 2020. – №34. – С. 36–40.

10. Овчаренко, В., Подлесний, С. та Зінченко, С., (2008). *Основи методу кінцевих елементів і його застосування в інженерних розрахунках*. Краматорськ: ДДМА.

11. Singh, U., Singh, M., & Singh, M. K. "Application of Magnetic Particle Testing in Indian Industry."

12. Gupta, M., & Khan, M. A. (2021). "Advances in Applications of Non-Destructive Testing (NDT): A Review." *International Research Journal of Engineering, IT & Scientific Research*.

13. Pelletier, A., & Marquié, P. (2024). "Industrial Application of AI-Based Assistive Magnetic Particle Inspection." *Applied Sciences*.

14. колосов

15. Інтелектуальні системи діагностики теплового стану електродвигуна : монографія / Д. Ю. Зубенко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 203 с.

16. Калганков Є.В. Розробка технологічного процесу відновлення деталі [Методичні рекомендації] / Калганков Є.В. – Дніпропетровськ: ДДАЕУ, 2013. – 75 с.

17. Калганков Є.В. Розробка ТПВД / Калганков Є.В. – ДДАЕУ, 2013. – 75 с.

18. Пат. № 144310 Україна, G01N 3/56 (2006.01) Машина тертя / Калганков Є.В.; Грачова В.М.; Косенко А.В. - u202001408; заявл. 20.03.2020; опубл. 25.09.2020, бюл. № 18; 4 с.

19. Калганков Є. В. Особливості фрактального аналізу поверхні руйнування гумових футерівок, що працюють в умовах абразивно-втомного зносу / Є. В. Калганков. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. - Дніпропетровск: ІГТМ НАНУ. – 2017. – №133. – С. 66–74

20. Калганков Е.В. Расчет долговечности резиновых футеровок шаровых рудоразмольных мельниц с учетом старения резины / Калганков Е.В. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. Праць, Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2013. – № 113. С. 181–202.

21. Gallardo, Gerald S. (2007). "Job Safety in Magnetic Particle Inspection." *Evaluator Journal*.

22. Magnaflux Corporation. *Magnetic Particle Inspection Safety Guidelines*. Magnaflux

23. Research on the Sensitivity of Magnetic Particle Testing in Aerospace Applications.

24. Dobmann, G., Altpeter, I., & Wolter, B. (2020). "Consistency in Material Properties Through NDT at Production Stages."

25. Kalhankov, Ye.V. (2013), "Calculation of the durability of rubber linings of ball ore grinding mills, taking into account the aging of rubber", *Geo-Technical Mechanics*, no. 113, pp. 181-202.

26. Kobets A.S., Dyrda V.I., Kalhankov Ye.V., Tsanidi I.M. and Chernii O.A. Abrasive fatigue wear rubber lining in the context of fractal analysis. *Geo-Technical Mechanics*. 2019, no. 144, pp. 103–110.

27. Калганков Є.В. Методичні рекомендації до виконання і оформлення дипломних проектів ОС "Бакалавр" за спеціальністю 208 "Агроінженерія" і дипломних робіт ОС "Магістр" за спеціальністю 208 "Агроінженерія" / Калганков Є.В. – Д.: ДДАЕУ, 2021. – 36 с.39.

28. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання



## **ДОДАТКИ**

|       | сталь 10 | сталь 20Х | Сталь 45Х |
|-------|----------|-----------|-----------|
| 200   | 0,09     |           |           |
| 500   | 0,535    | 0,066     |           |
| 1000  | 1,11     | 0,456     | 0,3       |
| 1500  | 1,25     | 0,852     | 0,65      |
| 2000  | 1,36     | 1,295     | 1,003     |
| 2500  | 1,445    | 1,375     | 1,03      |
| 3000  | 1,49     | 1,46      | 1,256     |
| 4000  | 1,575    | 1,515     | 1,362     |
| 5000  | 1,635    | 1,57      | 1,41      |
| 7500  | 1,71     | 1,6555    | 1,521     |
| 10000 | 1,78     | 1,71      | 1,58      |
| 12500 | 1,835    | 1,75      | 1,65      |
| 15000 | 1,87     | 1,78      | 1,66      |
| 20000 | 1,94     | 1,825     | 1,711     |
| 25000 | 2        | 1,86      | 1,752     |
| 30000 | 2,04     | 1,9       | 1,762     |
| 35000 | 2,07     | 1,93      | 1,773     |
| 40000 | 2,09     | 1,945     | 1,785     |
| 45000 | 2,1      | 1,96      | 1,82      |
| 50000 | 2,1      | 1,97      | 1,85      |

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра інжинірингу технічних систем

**ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ МЕТОДІВ  
НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ  
АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ**

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІз-1-23  
Колосов Станіслав Анатолійович

Керівник: доцент, к.т.н.  
Толстенко Олександр Васильович

Дніпро-2024

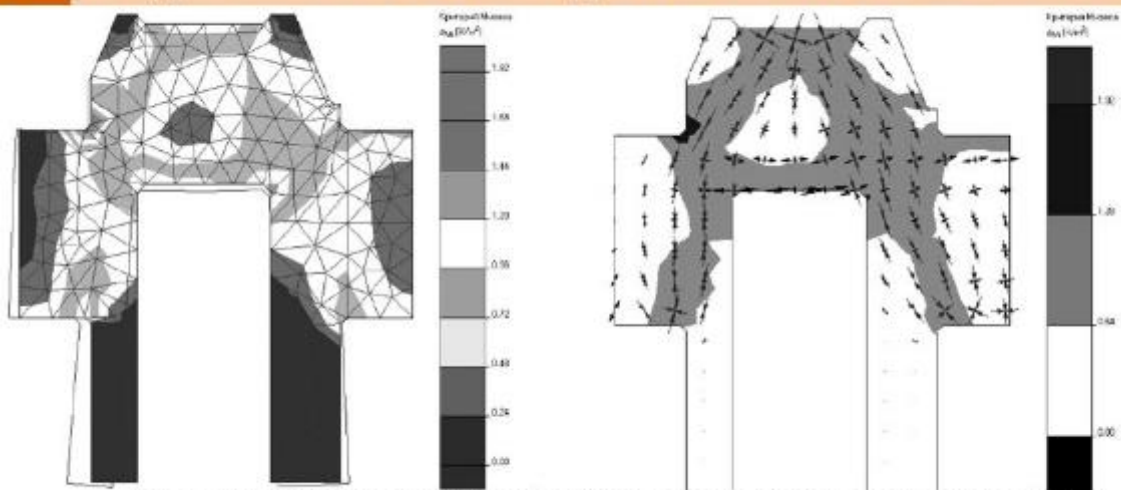
## МЕТА РОБОТИ

Дослідження методів неруйнівного контролю та обґрунтування і розробка  
оптимальних

## ЗАДАЧІ РОБОТИ

- проаналізувати існуючі методи неруйнівного контролю,
- провести моделювання колінчастого валу та визначити навантаження та напруження які виникають в деталі.
- розробити методику експериментальних досліджень дефектації поверхонь деталей методом магнітопорошкової дефектоскопії.
- визначити залежності між рівнем струму та намагніченості деталей,
- дослідити різні способи намагнічування та розробити рекомендації для випадків коли які способи використовувати.
- розробити заходи з охорони праці та провести техніко-економічну оцінку роботи.

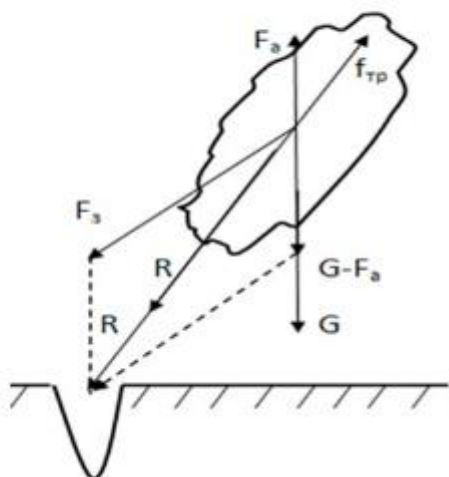
| Переваги   | Недоліки   |
|--|--|
| <b>Капілярний метод</b>  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Підходить для виявлення поверхневих дефектів з високою точністю.</li> <li>- Простий у виконанні та не вимагає дорогого обладнання.</li> <li>- Може використовуватися для контролю складних за формою деталей.</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ефективний лише для виявлення дефектів, що виходять на поверхню.</li> <li>- Вимагає чистої та гладкої поверхні для якісного контролю.</li> <li>- Неможливість застосування на пористих матеріалах через поглинання індикатора.</li> </ul>   |
| <b>Рентгенографічний метод</b>   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Дозволяє виявляти внутрішні дефекти, включаючи порожнини, тріщини та інші структурні аномалії.</li> <li>- Надає точні візуальні дані про форму та розмір дефектів.</li> <li>- Підходить для контролю великих та щільних деталей.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Високі вимоги до безпеки через іонізуюче випромінювання.</li> <li>- Необхідність складного та дорогого обладнання.</li> <li>- Вимагає наявності кваліфікованого персоналу для інтерпретації зображень.</li> </ul>                           |
| <b>Ультразвуковий метод</b>  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Висока чутливість до виявлення внутрішніх дефектів, таких як тріщини, включення та розшарування.</li> <li>- Підходить для деталей великої товщини.</li> <li>- Більш безпечний у порівнянні з рентгенографічним методом.</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Вимагає рівної поверхні та особливого з'єднання з матеріалом для кращого передачі хвиль.</li> <li>- Ефективність залежить від форми та матеріалу деталі.</li> <li>- Складність у трактуванні сигналів від різних типів дефектів.</li> </ul> |
| <b>Магнітопорошковий метод</b>   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Дуже ефективний для виявлення поверхневих та приповерхневих дефектів.</li> <li>- Підходить для великих деталей складної форми.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Використовується тільки для феромагнітних матеріалів.</li> <li>- Вимагає ретельної підготовки поверхні перед початком контролю.</li> </ul>  |



Характер  
руйнування  
шийки  
колінчастого вала  
в результаті  
експлуатаційних  
випробувань



Форма  
втомного  
руйнування  
шийки  
колінчастого  
вала



Сили, що діють на відокремлену частинку магнітного порошку

Визначення затягувальної пондеромоторної сили

$$F_3 = \mu_0 \cdot \varepsilon_{\text{ср}} V H \text{grad} H,$$

де  $\mu_0$  - магнітна постійна;

$\varepsilon_{\text{ср}}$  - магнітна сприйнятливність частинки;

$V$  - її об'єм;

$H$  - напруженість магнітного поля;

$\text{grad} H$  - градієнт напруженості магнітного поля.

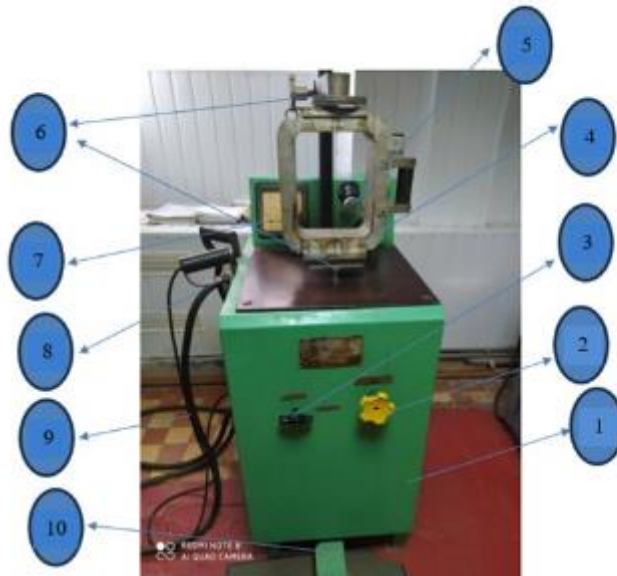


Порошки для дефектоскопії  
а - порошок, б - аерозоль

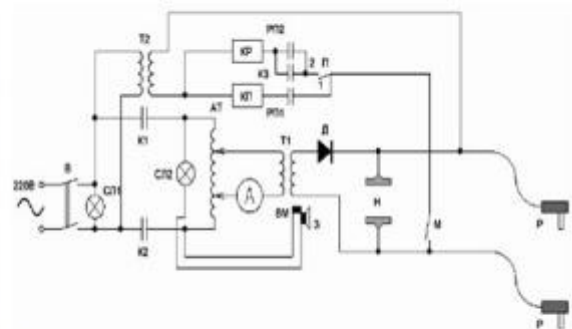


Процес намагнічування шийки колінчатого валу та використання сухого методу контролю

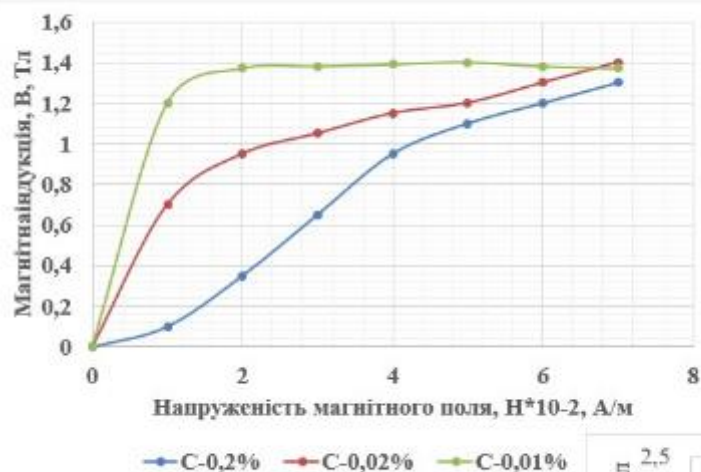




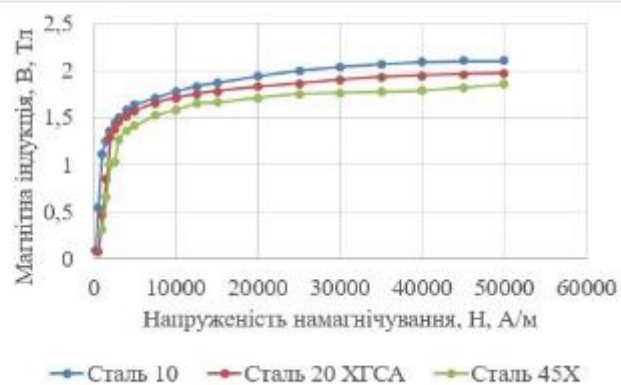
Магнітний дефектоскоп моделі М-217  
 1- дефектоскоп, 2 – регулятор інтенсивності намагнічування, 3 – вмикач установки, 4 – силеноїд, 5 – контрольна лампа, 6 – контакти силеноїда, 7 – амперметр, 8 – виносні контакти, 9 – силові кабелі, 10 – педаль замикання контактів силеноїда



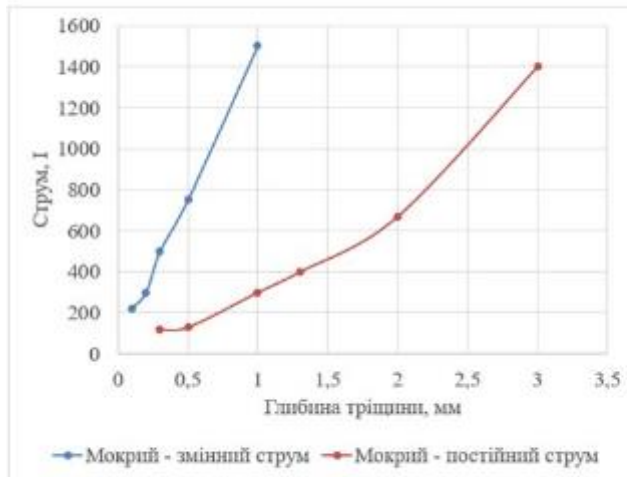
Електрична схема дефектоскопа М-217  
 В - пакетний вмикач, К1 і К2 - контакти магнітного пускача, РП1 і РП2 - контакти, П - перемикач, АТ - автотрансформатор, Т1 і Т2 - понижувальні трансформатори, КП - котушка управління магнітного пускача, КР - котушка проміжного реле, ВМ - вмикач магнітний, СЛ1 і СЛ2 - сигнальні лампи, Р - ручні намагнічувальні контакти, Н - намагнічувальні контакти затискні, М - мікрровмикач, А - амперметр, З - дзвінок, Д - діод.



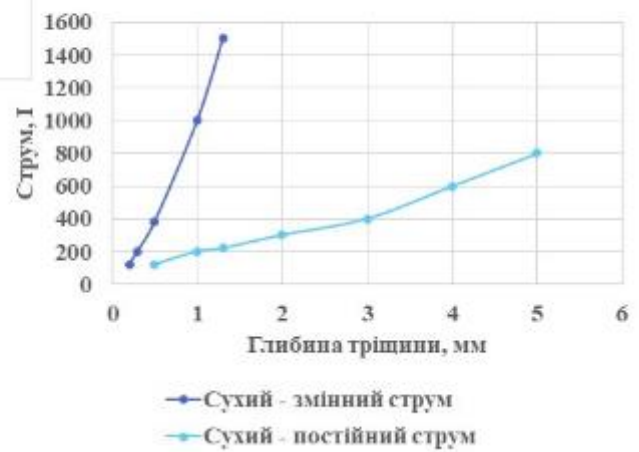
Залежність напруженості намагнічування поля  $H$  та магнітної індукції  $B$

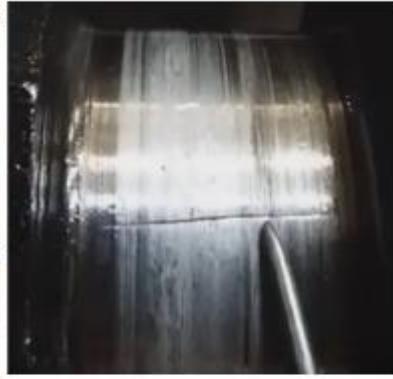
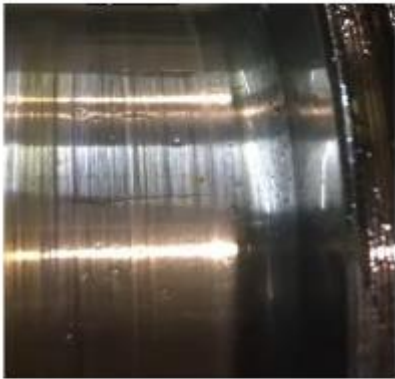


## 9 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



Залежність чутливості магнітопорошкового методу від виду струму при сухому способі нанесення порошку

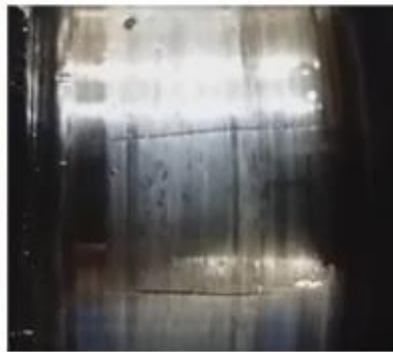
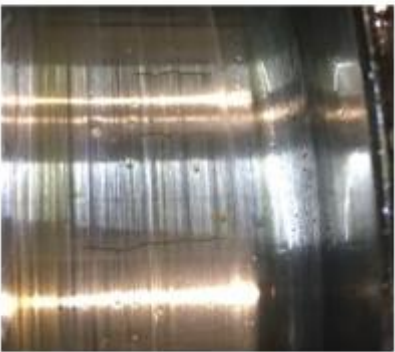




Мокрий спосіб при змінному струмі



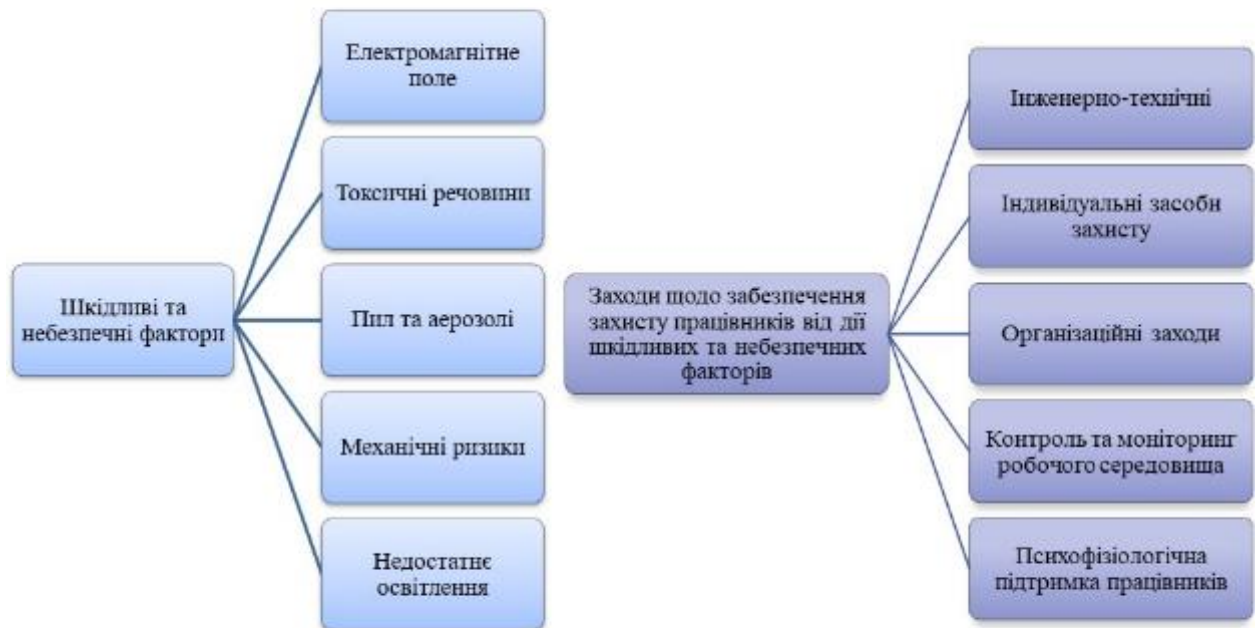
Сухий спосіб при змінному струмі



Мокрий спосіб при постійному струмі



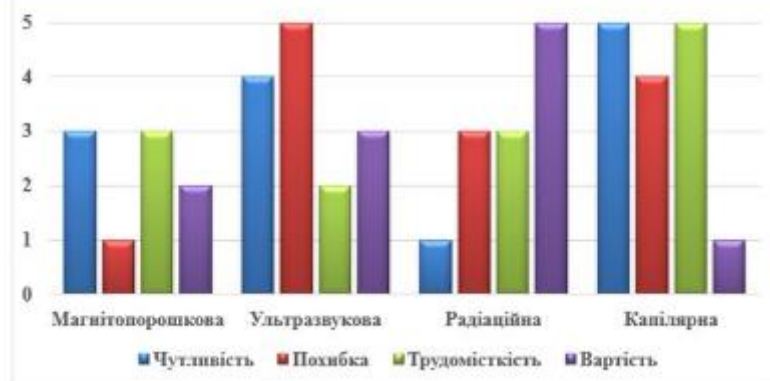
Сухий спосіб при постійному струмі



| № | Показник                                | Магнітопорошкова дефектоскопія | Ультразвукова дефектоскопія |
|---|---|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | Вид робіт                               | Дефектоскопія                  |                             |
| 2 | Програма робіт загальна/дефектна        | 200/14                         | 200/14                      |
| 3 | Повна собівартість дефектоскопії, грн.  | 96,34                          | 238,05                      |
| 4 | Зниження витрат на ремонт, грн          | 58800                          |                             |
| 5 | Подовження терміну служби двигуна, грн. | 241000                         |                             |
| 6 | Зниження аварійності, грн.              | 14250                          |                             |
| 7 | Загальний економічний ефект, грн.       | 314050                         |                             |
| 8 | Капіталовкладення, грн.                 | 1269600                        | 1379600                     |
| 9 | Термін окупності                        | 0,2                            | 0,3                         |

*Примітка: оцінки від 1 до 5 відповідають рівню від високого до низького*

Ранжування за рівнем ефективності методів дефектоскопії





Деталі двигуна та в цілому машин сприймають значні навантаження і досить часто це бувають знакозмінні або ударні навантаження, а досить часто комбінацію цих навантажень. В результаті дії таких навантажень у деталях можливо виникнення тріщин. Тому після відновлення деталей обов'язково необхідно проводити їх дефектоскопію.

Проведене моделювання напружено-деформованого стану шийок колінчастого валу методом скінчених елементів дало змогу визначити найбільш навантажені ділянки колінчастого валу та умови до виникнення тріщин. Найбільш навантажені частини це галтели шийки валу та сама шийка. При проведенні відновлення колінчастого валу методом наплавлення виникають великі напруження у шийках які з високою ймовірністю можуть викликати утворення тріщин. Тому колінчасті вали після відновлення обов'язково повинні проходити дефектоскопію на предмет виявлення тріщин.

Під час контролю магнітними методами найвпевненіше виявляють площинні дефекти: тріщини, непровари і несплавлення, найбільший розмір яких орієнтований під прямим або близьким до нього кутом щодо напрямку магнітного потоку. Дефекти округлої форми (пори, шлакові вclusions, раковини) не можуть створювати достатнього потоку розсіювання і, як правило, під час контролю виявляються погано. Практикою встановлено, що магнітопорошковим методом виявляються поверхневі та підповерхневі (на глибині не більше 2 мм) тріщини з розкриттям від 0,01 мм, глибиною (висотою дефекту) від 0,05 мм і довжиною 0,5 мм і більше. Зі збільшенням глибини залягання дефектів зменшується швидкість скупчення магнітного порошку і збільшується ширина лінії порошку, що ускладнює виявлення дефектів і визначення їхнього характеру. Задовільна чіткість скупчення порошку досягається над дефектами, що залягають на глибині не більше 5-8 мм.

Найбільша чутливість магнітопорошкового методу досягається під час контролю гладко оброблених поверхонь. Якщо на поверхні контрольованого виробу є різкі переходи або великі шорсткості (наприклад, посилення валика шва, лускатість, подрізи), то магнітний порошок інтенсивніше накопичується не над дефектами, а в місцях переходів і заглиблень. Тому під час контролю зварних швів із посиленням або грубою лускатістю не можна однозначно судити про наявність внутрішніх дефектів.

Дотримання правил охорони праці під час магнітопорошкової дефектоскопії є критично важливим для забезпечення безпеки працівників та запобігання нещасним випадкам.

Враховуючи результати економічного аналізу, доцільність використання того чи іншого методу залежить від специфіки деталей, умов експлуатації, фінансових можливостей підприємства та бажаного рівня надійності. Таким чином, оптимальний підхід до дефектоскопії може включати комбіноване застосування обох методів, що забезпечує найвищу якість контролю при помірних економічних витратах.

Міністерство освіти і науки України  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет  
Інженерно-технологічний факультет



# **ІНЖИНІРИНГ ТЕХНОЛОГІЙ І ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ**

**ЗБІРНИК ТЕЗ**

**III Всеукраїнської науково-практичної конференції  
молодих вчених**

**Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового  
виробництва**

*15 листопада 2024 р.*

**Дніпро • 2024**



УДК 631.51.4

Колосов С.А., здобувач вищої освіти СВО Магістр<sup>16</sup>, ОПІ Агроінженерія  
dsau\_npm@ukr.net

Дніпровський державний аграрно-єкономічний університет, м. Дніпро, Україна

## ОБґРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ МЕТОДІВ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ

Розвиток сучасного машинобудування та автотракторної індустрії вимагає від виробників забезпечення високої надійності та довговічності деталей і вузлів автотракторних двигунів [1]. Ефективність роботи таких двигунів значною мірою залежить від якості виготовлення та своєчасного виявлення дефектів на різних етапах виробництва й експлуатації. З цією метою важливе місце займає неруйнівний контроль, який дозволяє перевіряти стан поверхонь деталей без їх пошкодження, що дає можливість уникнути аварійних ситуацій та підвищити експлуатаційні показники техніки.

Методи неруйнвної дефектоскопії охоплюють широкий спектр підходів, таких як візуально-оптичний контроль, ультразвукова, капілярна та вихрострумова дефектоскопія. Проте для діагностики феромагнітних матеріалів, з яких виготовляються ключові вузли двигунів (колінчатий вал, шатун, гільза циліндрів), найбільш ефективною є магнітопорошкова дефектоскопія. Вона дозволяє виявляти поверхневі та підповерхневі тріщини, вальчення та інші дефекти, що не завжди можна знайти іншими методами [2].

Під час вибору методу дефектації слід враховувати комплекс чинників: виявлення дефектів, точність і достовірність, вартість апаратури і виконання робіт, оперативність, продуктивність і безпека. Жоден із методів не є універсальним, тому не здатний повною мірою адекватно вирішувати всі завдання об'єктивної реальності ремонтного виробництва. Виявлення дефектів

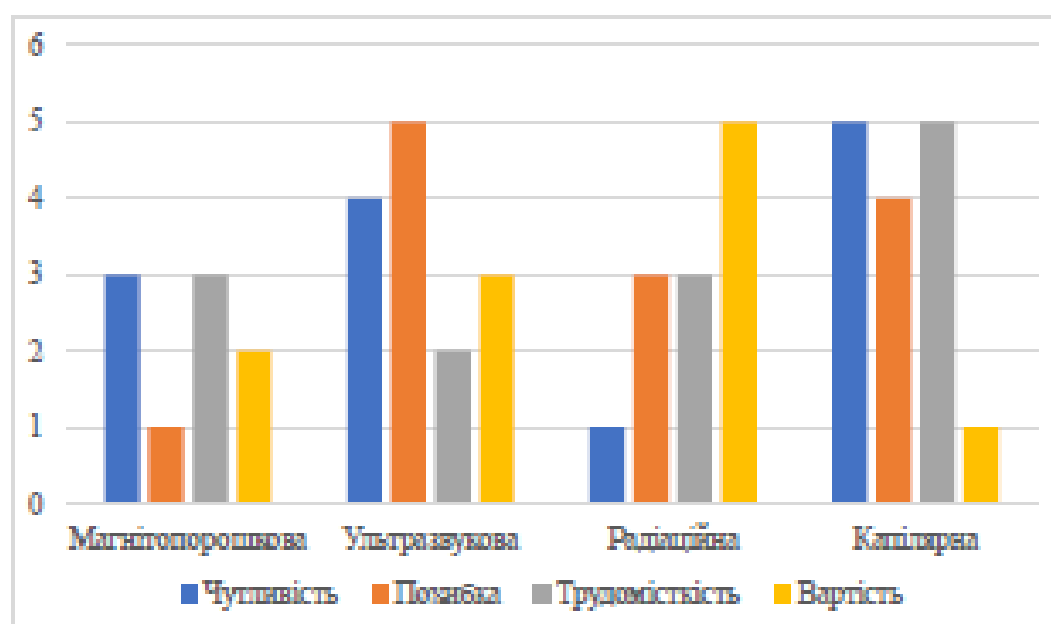
---

<sup>16</sup> Науковий керівник – Толстенко О.В., кандидат технічних наук, доцент кафедри інжинірингу технічних систем

характеризується можливістю їх фіксації діагностичними приладами, що відповідно залежить від виду дефекту, його розмірів, орієнтації та місця розташування у виробі. Достовірність контролю зумовлює ймовірність прийняття правильного рішення про ступінь придатності контрольованих виробів [3].

Проведені літературні та техніко-економічні дослідження дають можливість зробити порівняння найбільш придатних до дефектоскопії методів.

На основі аналізу техніко-економічних характеристик методів проведено їх ранжування за рівнем ефективності виконання визначених завдань (рис. 1).



*Примітка: оцінки від 1 до 5 відповідають рівню від високого до низького*

Рисунок 1 – Ранжування за рівнем ефективності методів дефектоскопії

Проведена техніко-економічна оцінка та експериментальні дослідження різних методів дефектоскопії, зокрема магнітопорошкового, ультразвукового радіаційного та капілярного. Аналіз показав, що кожен метод має свої переваги і недоліки, що впливають на ефективність їх застосування в залежності від умов експлуатації та типу досліджуваних матеріалів. Але найбільш доцільно використовувати магнітопорошковий та ультразвуковий методи.

Магнітопорошковий метод виявився економічно доцільним для перевірки деталей з феромагнітних матеріалів, оскільки він дозволяє з високою точністю виявляти поверхневі та підповерхневі дефекти. Незважаючи на вартість обладнання та витрати на підготовку до обстеження, цей метод окупається за рахунок зниження витрат на ремонт та подовження терміну служби обладнання.

Ультразвуковий метод показав себе як більш універсальний, оскільки може застосовуватися до матеріалів різного складу та структури, а також здатний виявляти дефекти на більшу глибину. Однак його собівартість вища через необхідність використання спеціального обладнання та більш тривалий час проведення обстеження.

Враховуючи результати економічного аналізу, доцільність використання того чи іншого методу залежить від специфіки деталей, умов експлуатації, фінансових можливостей підприємства та бажаного рівня надійності. Таким чином, оптимальний підхід до дефектоскопії може включати комбіноване застосування обох методів, що забезпечує найвищу якість контролю при помірних економічних витратах.

#### Список літератури

1. Дирда В. І. Ремонт машин та обладнання. Підручник для вищих навчальних закладів [Текст] / В. І. Дирда, П. Т. Мельничов, О. І. Кириленко та ін. – Днівськ, Журофонд, 2015. – 292 с.
2. Катганков, Є.В. Технічне діагностування об'ємних гідроприводів трансмісії як об'єктивна необхідність / Є.В. Катганков // Сучасна наука: теорія і практика. – Запоріжжя, 2012. – Т. 2. – С. 88-90
3. Dobmann, G., Altpeter, I., & Wolter, B. (2020). "Consistency in Material Properties Through NDT at Production Stages."