

**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:

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ВІДНОВЛЕНИХ ДЕТАЛЕЙ МА-
ШИН ШЛЯХОМ НАНЕСЕННЯ ДВОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ**

Виконав: студент 2 курсу, групи МгМ-2-23
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

_____ Люкович Артем Сергійович

Керівник: _____ Толстенко Олександр Васильович

Рецензент: _____

Дніпро 2024

**ДНПРОВСЬКИЙ 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

Люковича Артема Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Підвищення довговічності відновлених деталей машин шляхом нанесення двошарових покриттів

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

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 12.11.2024 року
№ 3784

2. Строк подання студентом роботи до 1.10.2024

3. Вихідні дані до роботи Середній термін служби деталей без покриття. Економічні показники ефективності відновлення деталей. Типи матеріалів для двошарових покриттів (металеві, керамічні тощо). Характеристики деталей, що відновлюються, з урахуванням експлуатаційних умов.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналітичний розділ. 2. Аналіз причин відмов деталей двигунів ЯМЗ та удосконалення технологій їх відновлення 3. Методика та результати досліджень. 4. Безпека праці. 5. Економічна оцінка роботи. Загальні висновки.

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема (1 слайд, А4). 2. Мета і задачі досліджень (1 слайд, А4). 3. Аналіз надійності двигунів (2 слайда, А4). 5 Аналіз експлуатаційних дефектів (1 слайд, А4). 6. Способи відновлення деталей (1 слайд, А4). 7. Зразки та обладнання досліджень (1 слайд, А4). 8, 9. Результати експериментальних досліджень (2 слайди, А4). 10. Небезпечні та шкідливі фактори (1 слайд, А4). 11. Економічні показники (1 слайд, А4). 12. 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

_____ Ілюкович А.С. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Толстенко О.В. _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота присвячена підвищенню довговічності відновлених деталей машин шляхом застосування двошарових покриттів. У роботі розглянуто особливості експлуатації автомобілів КрАЗ, надійність їхніх двигунів та причини відмов шатунних підшипникових вузлів. Проведено аналіз причин виходу з ладу капітально відремонтованих двигунів ЯМЗ та вивчено існуючі способи відновлення деталей методом наплавлення.

У практичній частині досліджено процес нанесення антифрикційного покриття за допомогою електродугової металізації, розроблено методику експериментальних досліджень та проведено триботехнічні випробування. Виконано аналіз результатів вимірювання твердості та зносостійкості відновлених поверхонь.

Робота включає заходи з охорони праці, оцінку безпеки виробничого процесу, а також техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження запропонованої технології.

Результати досліджень можуть бути використані для вдосконалення технологій відновлення деталей машин, що дозволить суттєво підвищити їх довговічність та зменшити витрати на ремонт і обслуговування техніки.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 8 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ..... | 10 |
| 1.1. Автомобіль КрАЗ характеристика та модифікації | 10 |
| 1.2. Надійність двигунів автомобілів КрАЗ в експлуатації | 13 |
| 1.3. Відмови шатунних підшипникових вузлів та їх аналіз..... | 19 |
| 1.4. Висновок по аналітичному розділі..... | 21 |
| РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПРИЧИН ВІДМОВ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ЯМЗ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ..... | 23 |
| 2.1. Дефекти та відмови деталей двигунів ЯМЗ та їх аналіз | 23 |
| 2.2. Аналіз способів відновлення деталей | 31 |
| 2.3. Моделювання променевого наплавлення для визначення параметрів наплавлених поверхонь різнорідними матеріалами..... | 34 |
| 2.4. Температурні умови роботи плоско заточеного вольфрамового електрода..... | 42 |
| 2.5. Висновок | 47 |
| РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ | 49 |
| 3.1. Методологія та програма проведення експериментальних досліджень | 50 |
| 3.2. Обладнання для електродугової металізації | 53 |
| 3.3. Технологія нанесення антифрикційного покриття на робочі поверхні | 56 |
| 3.4. Дослідження атифрикційних властивостей зразків..... | 60 |
| 3.5. Результати дослідження твердості нанесеного покриття | 62 |
| 3.6. Випробування пар тертя на знос | 64 |
| 3.7. Висновок | 68 |
| 4. БЕЗПЕКА ПРАЦІ..... | 69 |

| | |
|--|----|
| 4.1. Аналіз рівня охорони праці на дільниці відновлення деталей електродуговою металізацією..... | 69 |
| 4.2. Шкідливі і небезпечні фактори на дільниці електродугової металізації | 71 |
| 4.3. Заходи безпечної роботи на дільниці електродугової металізації..... | 73 |
| 4.3.1. Технічні заходи..... | 73 |
| 4.3.2. Організаційні заходи..... | 73 |
| 4.3.3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)..... | 74 |
| 4.3.4. Запобігання аварійним ситуаціям | 74 |
| 4.3.5. Моніторинг умов праці..... | 75 |
| 4.4. Висновок | 75 |
| РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА | 76 |
| 5.1. Розрахунок економічної ефективності технології відновлення металізацією з нанесенням антифрикційного покриття | 76 |
| 5.2. Висновок | 81 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 82 |
| ЛІТЕРАТУРА | 84 |
| ДОДАТКИ..... | 88 |

ВСТУП

Транспортні витрати у собівартості сільськогосподарської продукції становлять 10–12%, з яких найбільша частина припадає на автомобільні перевезення. У пікові періоди сільськогосподарських робіт в агропромисловому секторі задіяно до 35% усього автопарку, понад половину якого складають автомобілі сімейства КрАЗ [1, 2].

На сьогоднішній день собівартість перевезень автомобільним транспортом є значною і може збільшуватися у 2–3 рази протягом експлуатації техніки. Одночасно з цим продуктивність автомобілів зменшується у 3–4 рази до досягнення пробігу 500 тис. км. Основними причинами такого стану є високі витрати праці, часу та ресурсів, спрямовані на підтримання працездатності автомобілів, що обумовлено недостатньо ефективним технічним обслуговуванням і ремонтом. Витрати на технічне обслуговування та ремонт можуть становити 12–15% від загальної вартості автомобільних перевезень. Протягом життєвого циклу автомобіля витрати на забезпечення його працездатності у 5–6 разів перевищують вартість його виготовлення [3].

Аналіз надійності автомобілів КрАЗ свідчить, що 32–37% усіх відмов припадає на силовий агрегат, зокрема 25–30% – на двигун [1, 2, 3]. Варто зазначити, що двигуни КрАЗ широко використовуються не лише у самих автомобілях, а й у сільськогосподарській техніці (трактори, комбайни) та стаціонарних установках. Дослідження відмов двигунів, включно з періодом гарантійного обслуговування, показали значну частку раптових поломок (45–50%). Причинами таких відмов найчастіше є порушення правил експлуатації, конструктивні недоліки та виробничі дефекти. Аналіз технічного стану двигунів під час експлуатації свідчить про закономірні зміни параметрів, але значна кількість аварійних відмов спричинена перевищенням граничних значень цих параметрів через недостатнє використання діагностики.

Двигуни, які проходять капітальний ремонт, демонструють ще нижчі показники надійності, що обумовлено невідповідністю рівня технологій ремонту

рівню технологій, застосовуваних під час виготовлення. Надійність двигуна найбільше залежить від стану таких критичних елементів, як підшипники колінчатого вала, циліндропоршнева група та турбокомпресор. Саме на них припадає 35% усіх відмов і 62% витрат на ремонт [3].

Значні витрати на забезпечення працездатності двигунів пов'язані з недостатнім вивченням процесів мащення деталей, очищення мастила та повітря, а також з браком ефективних методів діагностики технічного стану. Крім того, технології відновлення деталей під час ремонту потребують вдосконалення. Таким чином, актуальним є вирішення питань, пов'язаних із оптимізацією процесів мащення, очищення мастила й повітря, а також розробкою сучасних технологічних підходів до відновлення деталей. Це дозволить зменшити собівартість перевезень та підвищити продуктивність автомобільної і сільськогосподарської техніки.

Публікації. Ілюкович, А., (2024). Триботехнічні випробування відновлених пар тертя шляхом нанесення двошарових покриттів. У: *Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу, 15 листопада 2024, Дніпро, Україна.* Дніпро: ДДАЕУ. с. 36–38..

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Автомобіль КрАЗ характеристика та модифікації

Автомобілі КрАЗ (Кременчуцький автомобільний завод) – це вантажівки, розроблені для виконання важких завдань у різних галузях: військовій, будівельній, сільськогосподарській, лісовій та транспортній [4]. Вони відомі своєю міцністю, високою прохідністю та надійністю.

Основні призначення КрАЗів (рис. 1.1):



Рисунок 1.1 – Призначення автомобілів КрАЗ

1. Транспортні перевезення: доставка вантажів на великі відстані, навіть у важкодоступні місця.

2. Військове використання: перевезення особового складу, техніки та боєприпасів.

3. Будівництво: робота як самоскидів, тягачів для важкої техніки чи бетономішалок.

4. Сільське господарство: перевезення вантажів, деревини, техніки тощо.

Самоскиди



Шасі



Бортові



Тягачі



Лісовози



Спецтехніка



Рисунок 1.2 – Автомобілі КрАЗ сільськогосподарського призначення

Технічні характеристики (загальні для різних моделей):

- Повна маса: від 18 до 50 тонн (залежно від моделі).
- Колісна формула: 6×6, 4×4 або 8×8.
- Дорожній просвіт: до 400 мм.
- Максимальна швидкість: до 90 км/год.
- Запас ходу: до 1200 км.

Двигуни КрАЗ: історія та сучасність (рис. 1.3)



Двигун ЯМЗ 238



Двигун ЯМЗ 236



Двигун ЯМЗ 740



Cummins B



Weichai



ЯМЗ 651

Рисунок 1.3 – Двигуни, що використовувались і використовуються на втомобілях КрАЗ

1. Раніше використовувані двигуни:

- ЯМЗ-238: дизельний V-подібний восьмициліндровий двигун, об'єм – 14,86 л, потужність – 240–330 к.с.
- ЯМЗ-236: шестициліндровий варіант, простіший у конструкції, потужність до 180 к.с.
- ЯМЗ-740: дизельний двигун, використовувався на деяких моделях для підвищення уніфікації з іншою технікою.

2. Сучасні двигуни:

- Cummins (США): сучасні економічні дизельні двигуни, потужністю 330–400 к.с., відповідають екологічним стандартам.
- Weichai (Китай): потужніші моделі до 460 к.с., часто встановлюються на спеціальні модифікації.
- ЯМЗ-651: спільна розробка з Renault, турбодизель, сучасніший за попередні варіанти ЯМЗ.

Двигун – ключовий агрегат автомобіля.

Двигун КрАЗ є основою для його ефективної роботи. Однак через складні умови експлуатації можливі дефекти та поломки, які потребують ремонту:

1. Відновлення колінчастого валу:

- Поломки через механічні навантаження або зношення підшипників.
- Технології відновлення включають шліфування, нанесення нового шару металу, балансування.

2. Ремонт розподільчого валу:

- Проблеми виникають через зношення кулачків або порушення геометрії.

- Методи відновлення: наплавлення, шліфування, заміна штовхачів.

3. Інші дефекти:

- Зношення циліндрів: розточка, установка гільз.

- Вихід з ладу системи подачі палива (форсунки, насоси).

- Поломки турбокомпресора: відновлення крильчатки чи заміна.

Двигун є центральним агрегатом автомобіля КрАЗ, від якого залежить не лише продуктивність, а й довговічність автомобіля. Його своєчасне обслуговування, діагностика та відновлення є ключовими для збереження працездатності техніки.

1.2. Надійність двигунів автомобілів КрАЗ в експлуатації

На сьогодні 70 % автомобілів КрАЗ, що працюють в Україні оснащено двигунами ЯМЗ тому приділимо увагу саме цим двигунам, так як вони потрапляють в ремонт і їх ресурс зараз підходить до проведення капітального ремонту.

Аналіз причин несправностей окремих елементів автомобіля, які усуваються шляхом заміни деталей або вузлів, наведено на рисунку 1.4 – 1.6.

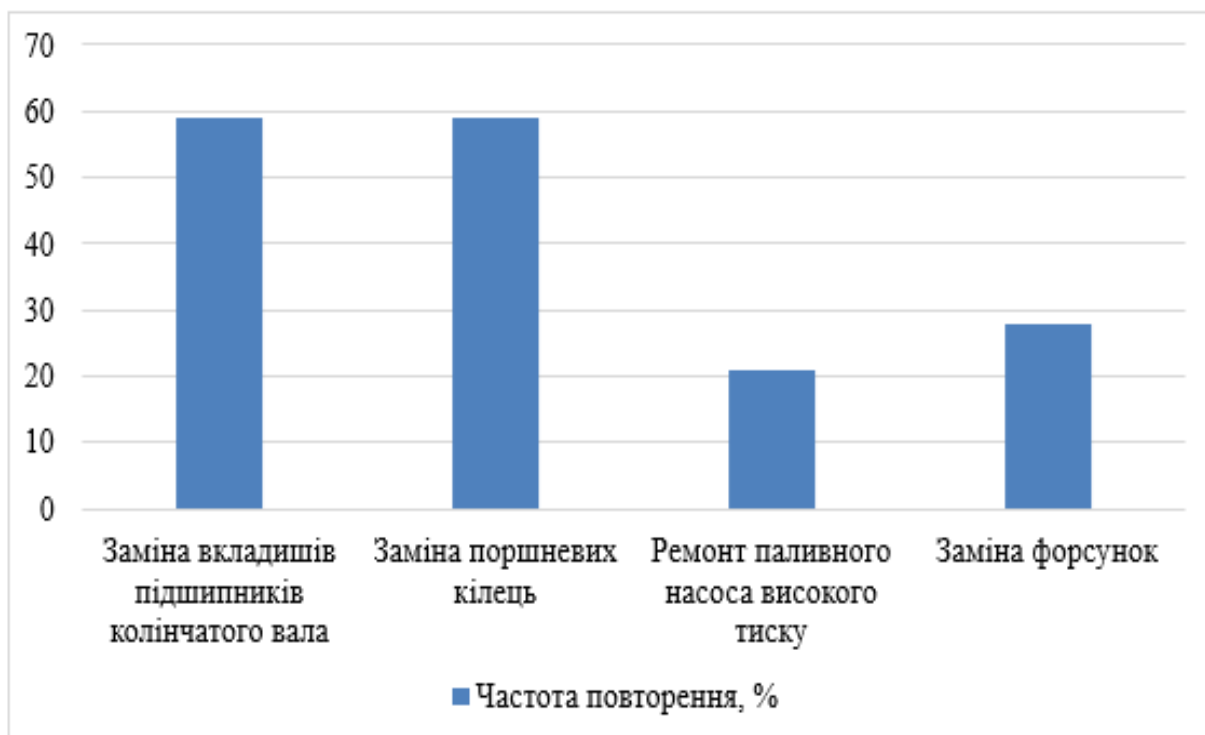


Рисунок 1.4 – Частота повторюваності дефектів

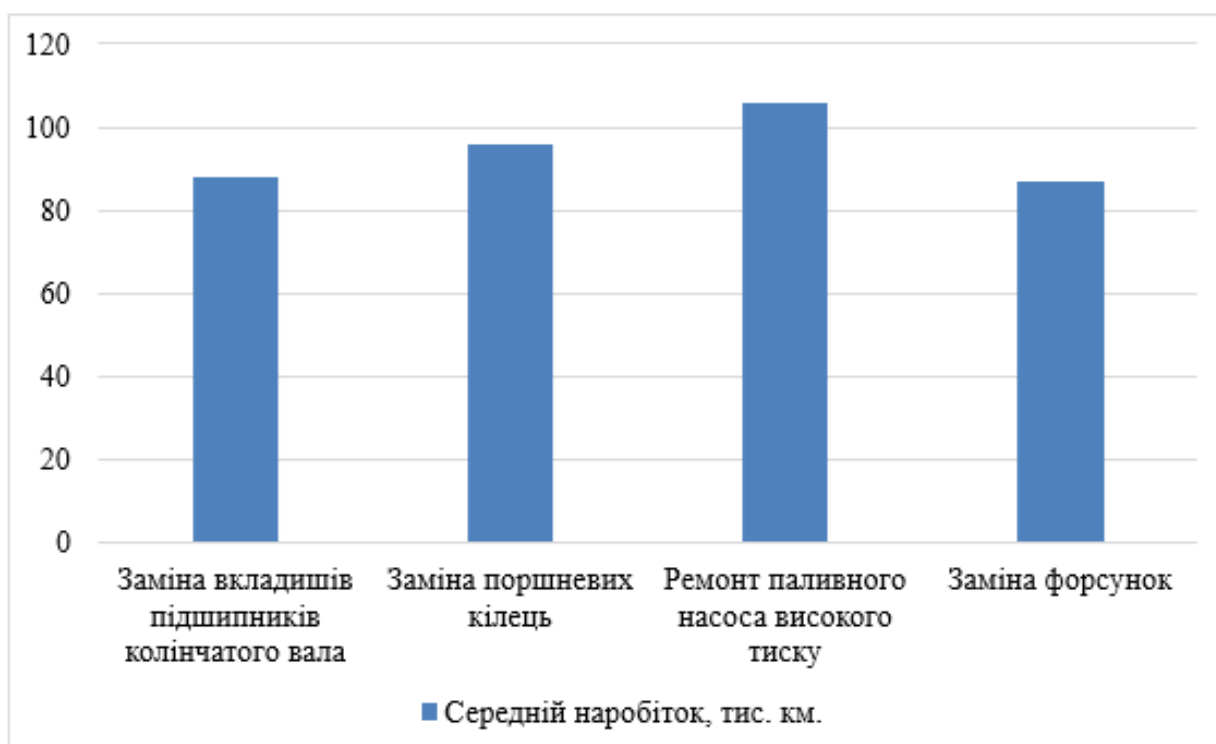


Рисунок 1.5 – Середній наробіток, тис. км

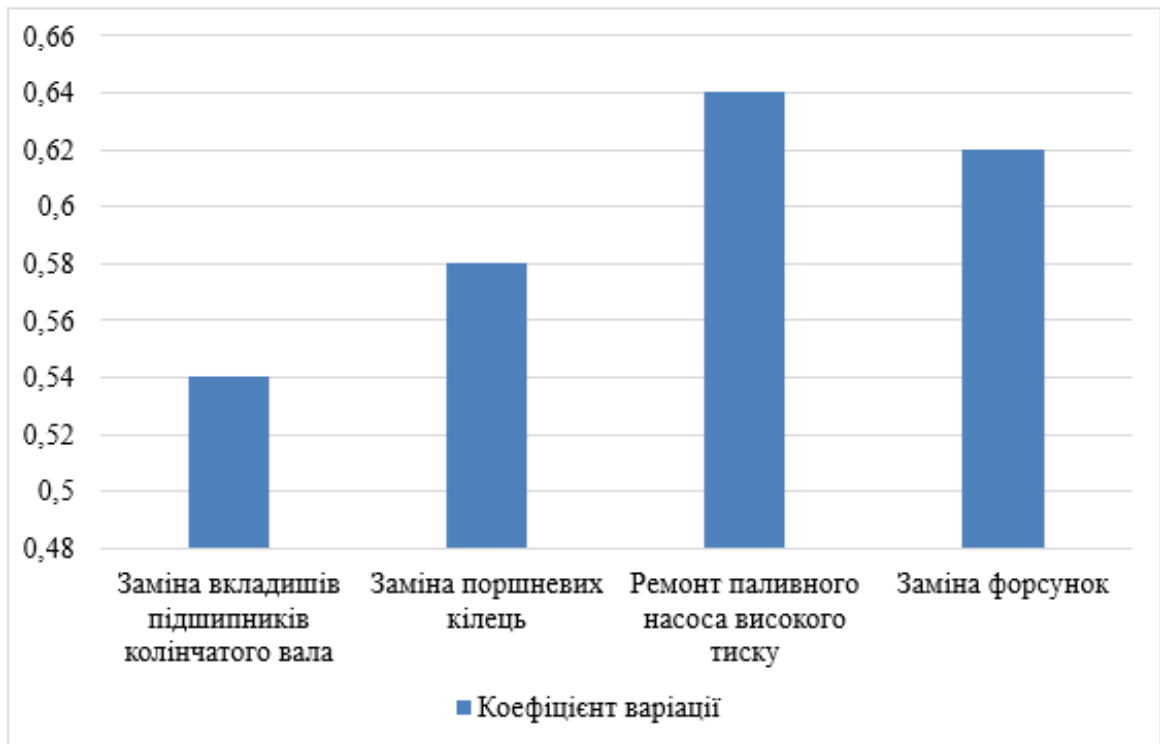


Рисунок 1.6 – Коефіцієнт варіації

Згідно з даними, наведеними на рисунках 1.4 – 1.6, встановлено, що елементи автомобіля, у яких під час експлуатації параметр потоку відмов поступово зростає, відповідають за 58 % загальної кількості відмов. Вони також обумовлюють 87 % трудовитрат на їх усунення, 76 % часу простою автомобілів під час поточного ремонту та 83 % витрат на придбання запасних частин [7].

Ці показники свідчать про важливість підвищення надійності двигунів автомобілів КраЗ, особливо зосереджуючись на зменшенні кількості відмов шатунних підшипників під час експлуатації. Ця проблема є актуальною, оскільки збільшення ресурсу роботи підшипників на фоні підвищення ступеня форсування дизельних двигунів супроводжується значним зростанням механічних і теплових навантажень. До того ж модернізація конструкції дизелів із метою підвищення їхньої потужності за рахунок використання турбонаддуву часто не передбачає внесення змін у конструкцію підшипників.

Як показано на рисунку 1.7, більшість відмов (54 %) виникає під час експлуатації двигуна до пробігу 10 тисяч кілометрів. При цьому найбільшу

частку, приблизно 24 %, займають відмови, пов'язані з проворотом шатунних вкладишів.

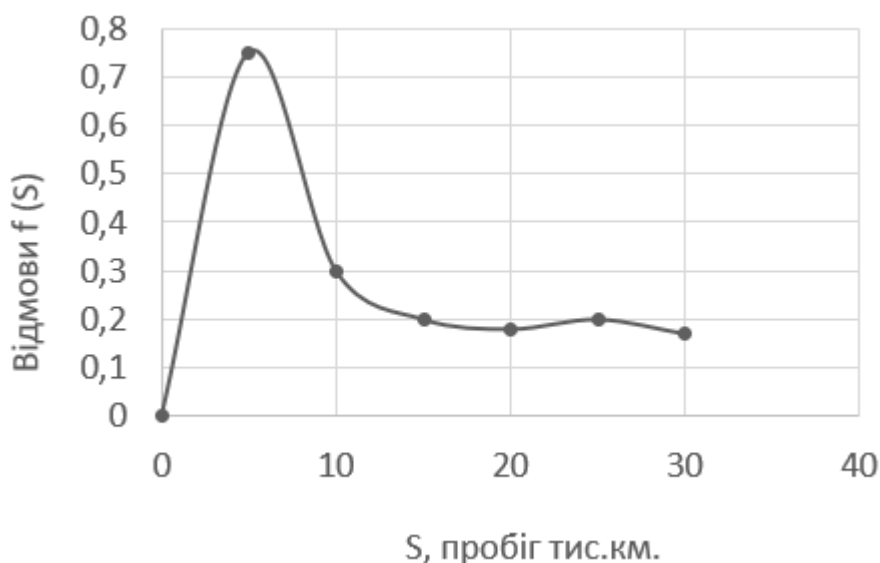


Рисунок 1.7 – Відмови двигунів ЯМЗ-238

Слід зазначити, що такі відмови належать до 3-ї групи складності. Їх усунення потребує суттєвого розбирання двигуна, а в більшості випадків – і заміни колінчастого вала, що значно збільшує обсяг ремонтних робіт.

Аналіз змін кількості відмов двигунів, які надходили в ремонт у різні роки, показав тенденцію до їх зменшення. Особливо це стосується таких відмов, як витік масла в охолоджувальну рідину, руйнування шатунів, шатунних болтів та колінчастого вала. Подібне покращення пояснюється заходами, вжитими заводом-виробником, зокрема зміною матеріалів, удосконаленням технологій виготовлення та складання відповідних компонентів.

Водночас кількість рекламаций, пов'язаних із проворотом шатунних вкладишів, залишалася стабільною протягом усіх років, які охоплювали дослідження.

На рисунку 1.8 представлені графіки відмов двигуна ЯМЗ-238 за даними заводу-виробника, а на рисунку 1.9 – за даними, отриманими з літературних джерел.

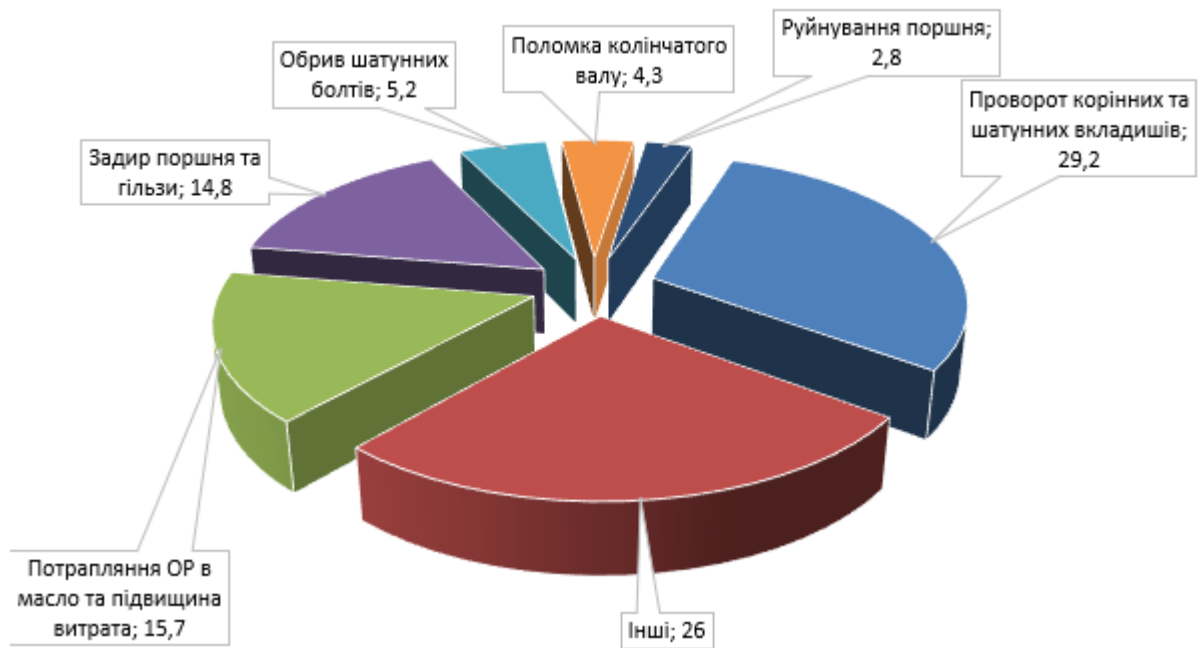


Рис. 1.8 - Відмови двигунів ЯМЗ-238

Аналіз рекламацийних актів, що стосувалися дефектів, пов'язаних із проворотом шатунних вкладишів колінчастих валів, виявив, що у 42 % випадків причину відмов встановити не вдалося. Ще 35 % відмов були спричинені порушенням технологічної дисципліни під час виробництва та складання двигунів (табл. 1.2).

Залежність частоти провороту вкладишів від пробігу автомобіля, наведена на рисунку 1.11, свідчить, що інтенсивність цієї відмови зростає лише на початковому етапі експлуатації (до 5 тис. км). Надалі частота залишається практично стабільною, а після досягнення пробігу 30 тис. км поступово знижується.

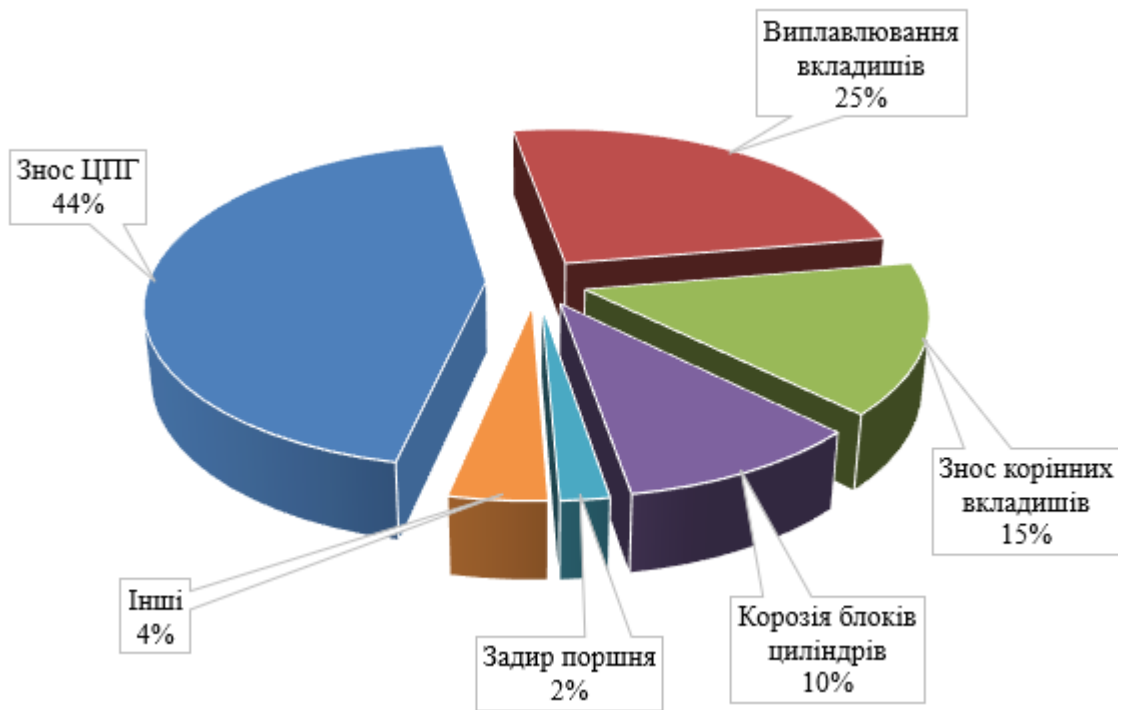


Рис. 1.9 – Післяремонтні відмови

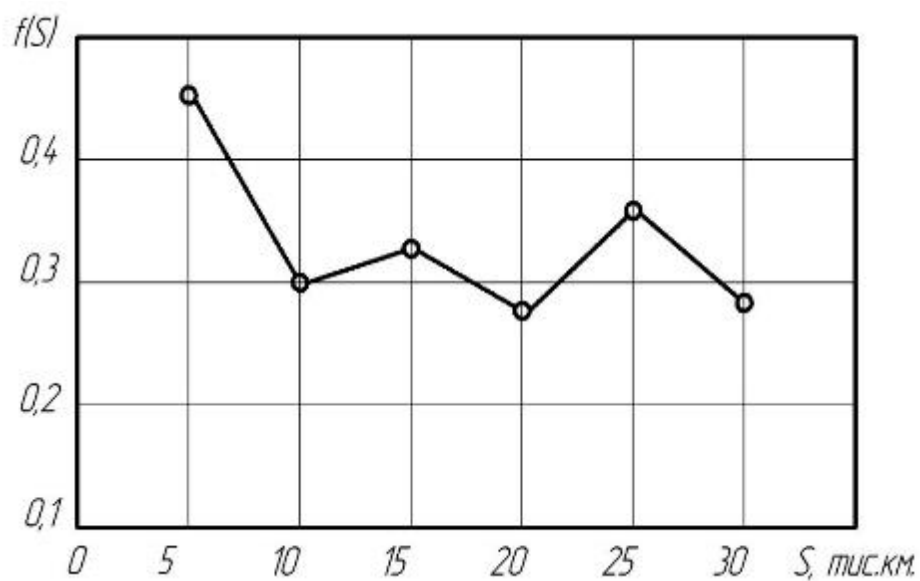


Рисунок 1.10 - Відмови колінчастого вала від пробігу автомобілів

Аналіз літературних джерел та результати власних досліджень відмов двигунів ЯМЗ під час експлуатації показують, що підвищення їхньої надійності вимагає, насамперед, визначення причин виникнення дефекту, такого як проворот шатунних вкладишів колінчастого вала. На основі цього необхідно розробити ефективні заходи для усунення даної проблеми.

1.3. Відмови шатунних підшипникових вузлів та їх аналіз

У дизельних двигунах, зокрема в автомобілях КрАЗ, як корінні та шатунні підшипники колінчастого вала застосовуються тонкостінні багат шарові вкладиші [11]. У разі повертання вкладиша його фіксуючий виступ зрізається, і сам вкладиш починає обертатися разом із шийкою колінчастого вала. Це призводить до збільшення зазорів у з'єднанні та підвищення температури шийки. Висока температура викликає випаровування мастильного масла, що супроводжується зростанням витрат картерних газів через сапун.

Перегрів шийки спричиняє теплову напругу та деформації, що можуть призводити до утворення тріщин на поверхні шийки, згинання або навіть руйнування вала. У найважчих випадках повертання шатунного вкладиша стає причиною обриву шатунних болтів чи самого шатуна, що може спричинити пробиття блоку циліндрів [11, 12, 13].

Проблеми з корінними підшипниками виникають приблизно в п'ять разів рідше, ніж із шатунними. Основними причинами повертання корінних вкладишів є:

- несправності масляного насоса;
- вибивання заглушок у системі мащення;
- падіння тиску в масляній системі;
- абразивне зношування шийок і вкладишів, що руйнує антифрикційний шар;
- масляне голодування, яке сприяє охопленню шийки та вкладиша;
- деформації вкладишів.

Як було зазначено, у більшості випадків встановити точну причину повертання шатунних вкладишів складно. Загалом вважається, що ця відмова спричинена такими факторами:

- абразивним зношуванням;
- надмірними зазорами в шатунних підшипниках;
- викривленням геометрії шийок або вкладишів;

- порушеннями в роботі системи мащення.

Потрапляння абразивних часток у підшипники викликає утворення кільцевих ризиків на антифрикційному шарі, що підвищує температуру, призводить до жолоблення, зменшення натягу та задирів, які згодом викликають провертання вкладишів. Абразивні частки створюють канавки на поверхні вкладишів, витісняючи метал з боків. Метал легко викришується, потрапляє в з'єднання, що спричиняє перегрів, підвищує температурні напруги і зрештою призводить до провертання [12, 13].

Для зменшення проникнення абразивних часток у підшипники двигунів КрАЗ було впроваджено низку заходів: заміна фільтруючих елементів на паперові, підвищення ефективності фільтра відцентрового очищення масла та встановлення додаткової втулки в шатунну шийку для покращення очищення масла. Однак, ці заходи не дозволили повністю усунути проблему провертання шатунних вкладишів.

Дослідження показали, що кількість відкладень у порожнинах шатунних шийок, де сталося провертання, є меншою, ніж на інших шийках [14]. Це свідчить про зменшений потік масла через ці підшипники, а отже, причиною провертання є не концентрація абразиву в маслі, а недостатній об'єм масла, що проходить через підшипники.

Основним фактором, що викликає задири шатунних підшипників, є порушення гідродинамічного мащення через недостатню подачу масла до шатунних підшипників, що обумовлено підвищеним витокком масла через зношені корінні підшипники. При нормальному тепловому режимі продуктивність масляного насоса може бути повністю витрачена на середніх обертах двигуна, що ускладнює забезпечення достатньої подачі масла до шатунних підшипників.

Для підвищення надійності шатунних підшипників на всіх режимах роботи двигуна доцільно збільшити запас продуктивності масляного насоса, щоб компенсувати знос у підшипниках. Проте надмірне підвищення тиску і витрати масла також небажане, оскільки це може:

- збільшити витрати потужності на привід насоса;
- спричинити зростання витрат масла на вигоряння;
- збільшити циркуляцію абразивних часток у системі, що прискорює зношування підшипників [15].

Аналіз 350 двигунів ЯМЗ-238, виконаний Денисовим А.С. і Кулаковим А.Т. [16], виявив, що провертання шатунних вкладишів найчастіше спостерігається на шийках 5 і 3 циліндрів (до 30%), а також меншою мірою на шийках 6 і 4 (приблизно 10%).

Автори пояснюють це явище тим, що зазначені шатунні шийки розташовані ближче до каналу, який подає масло у шатунну порожнину від корінної шийки. Для запобігання провертання шатунних вкладишів дослідники [16] запропонували метод діагностики прогину вкладишів, гранична величина якого становить 48 мкм, із рекомендованою періодичністю перевірки кожні 12 тис. км.

Впровадження діагностичного обладнання та технологій, які використовуються під час технічного обслуговування (ТО-2), дозволило зменшити кількість випадків провертання шатунних вкладишів у процесі експлуатації та скоротити частоту капітальних ремонтів.

Попри це, проблема провертання шатунних вкладишів залишається однією з найпоширеніших причин відмов двигунів, що вимагає подальшого дослідження для її вирішення. На основі отриманих результатів досліджень необхідно зосередитися на усуненні прогину в поперечному перерізі вкладишів. Це потребує більш детального вивчення процесів деформації шатунних вкладишів двигуна ЯМЗ-238 [16].

1.4. Висновок по аналітичному розділі

Аналіз експлуатаційних відмов двигунів ЯМЗ-238 автомобілів КраЗ виявив, що проблема провертання шатунних вкладишів є однією з найпоширеніших і становить значну частину загальної кількості дефектів. Це зумовлює

підвищені витрати на ремонт, тривалий час простою техніки та збільшення витрат на запасні частини. Причинами цієї відмови є недосконалість системи мащення, конструктивні недоліки, технологічні порушення під час виготовлення та ремонту, а також вплив абразивних часток.

Подальше дослідження має бути спрямоване на вирішення цих проблем для підвищення надійності шатунних підшипників і зменшення кількості відмов у процесі експлуатації.

Мета роботи: Розробка науково обґрунтованих підходів до підвищення довговічності відновлених деталей машин шляхом нанесення двошарових покриттів, що забезпечують зменшення зношування, підвищення корозійної стійкості та відновлення експлуатаційних характеристик деталей.

Завдання:

1. Провести аналіз існуючих технологій відновлення деталей машин та їх покриттів, визначити їхні переваги та недоліки.
2. Розробити методику нанесення двошарових покриттів із заданими фізико-механічними властивостями.
3. Дослідити вплив структури, товщини та складу двошарових покриттів на зносостійкість і корозійну стійкість деталей.
4. Випробувати експлуатаційні властивості відновлених деталей із двошаровими покриттями в умовах реального навантаження.
5. Розробити рекомендації щодо впровадження технології нанесення двошарових покриттів у процесах відновлення деталей машин.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПРИЧИН ВІДМОВ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ЯМЗ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

2.1. Дефекти та відмови деталей двигунів ЯМЗ та їх аналіз

Капітальний ремонт двигунів ЯМЗ передбачає відновлення їх працездатності шляхом заміни чи ремонту основних вузлів і деталей. Однак навіть після такого відновлення можливі відмови, які часто зумовлені як технічними, так і організаційними факторами. Проведений аналіз дозволив виділити основні причини виходу з ладу двигунів ЯМЗ після капітального ремонту. Їх можна розділити на технічні, технологічні, технічні (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Відмови двигуна

1. Технічні причини

Ці причини зумовлені конструктивними та експлуатаційними особливостями двигунів, а також якістю виконання ремонтних робіт:

1.1. Зношування та деформація шатунних підшипників:

- Провертання шатунних вкладишів є однією з найпоширеніших проблем, що спричиняє значні пошкодження колінчастого вала.
- Неправильне відновлення або порушення геометрії вкладишів після ремонту може призводити до утворення задирів, надмірного нагрівання та провертання.

1.2. Недостатня герметичність ущільнювачів:

- Порушення ущільнення в зонах головки блока циліндрів або системи охолодження спричиняє витікання масла або охолоджувальної рідини, що прискорює зношування двигуна.

1.3. Недосконала система мащення:

- Недостатній потік мастильного масла через зношені корінні підшипники або зменшення тиску масла через зношення насоса можуть спричинити масляне голодування вузлів, особливо шатунних підшипників.

1.4. Абразивне зношування:

- Потрапляння забруднень у мастильну систему прискорює зношування шийок колінчастого вала, що сприяє провертанню вкладишів.

1.5. Порушення теплового режиму:

- Неправильна робота системи охолодження двигуна призводить до локальних перегрівів, що викликає деформації вузлів та деталей.

2. Технологічні причини

Під час капітального ремонту часто допускаються порушення технології, які знижують якість відновлених вузлів:

2.1. Низька якість ремонту вузлів:

- Використання застарілого або несправного обладнання для обробки деталей призводить до недостатньої точності їх параметрів.
- Недостатній контроль якості обробки та складання.

2.2. Порушення технології збирання двигуна:

- Неправильне затягування з'єднань або недотримання рекомендованих зазорів у вузлах двигуна.
- Використання невідповідних мастильних матеріалів або недостатня їх кількість під час складання.

2.3. Використання неякісних матеріалів:

- Застосування дешевих або несертифікованих комплектуючих (вкладишів, ущільнень, поршневих кілець).

3. Експлуатаційні причини

Часто несправності виникають через порушення правил експлуатації після ремонту:

3.1. Порушення режиму обкатки:

- Надмірні навантаження на двигун у період після капітального ремонту (перші 5–10 тис. км).
- Невідповідність паливно-мастильних матеріалів рекомендованим виробником.

3.2. Неналежний догляд за двигуном:

- Несвоєчасна заміна масла та фільтрів.
- Використання палива низької якості, що призводить до абразивного зношування деталей.

3.3. Перевищення допустимих експлуатаційних навантажень:

- Перевантаження двигуна при роботі у важких умовах (навантажені автомобілі, пересічена місцевість, бездоріжжя).

Статистичні дані про відмови після ремонту

Аналіз рекламацийних актів показує, що основні типи відмов мають наступний розподіл:

- Провертання шатунних вкладишів – 24–30 %.
- Витікання масла в систему охолодження – 15–20 %.
- Руйнування шатунів і шатунних болтів – 10–12 %.
- Перегрів колінчастого вала – 8–10 %.

- Інші відмови (знос поршневих кілець, деформація клапанів) – 10–15 %.

Шляхи вирішення проблеми

Для зменшення частоти відмов капітально відремонтованих двигунів ЯМЗ необхідно:

1. Удосконалити технологічні процеси відновлення та складання вузлів двигуна.
2. Використовувати сертифіковані комплектуючі та мастильні матеріали.
3. Застосовувати сучасні методи діагностики (ультразвукове та вібраційне тестування) для контролю стану вузлів.
4. Розробити рекомендації щодо режиму обкатки та експлуатації двигунів після ремонту.
5. Удосконалити конструкцію шатунних вкладишів і систему мащення для зменшення масляного голодування.

Ці заходи дозволять значно підвищити надійність капітально відремонтованих двигунів ЯМЗ і знизити кількість відмов під час експлуатації.

Основні дефекти деталей наведено на рис. 2.2 – 2.14.



Рисунок 2.2 – Дефекти поршнів



Рисунок 2.3 – Дефект у вигляді зносу блоку



Рисунок 2.4 – Зношені вкладиші



Рисунок 2.5 – Дефект у вигляді зламаної масляної трубки



Рисунок 2.6 – Перегрів постелі колінчатого валу



Рисунок 2.7 – Розплескання корінних вкладишів



Рисунок 2.8 – Зношування вкладишів



Рисунок 2.9 – Знос вкладишів першої та п'ятої опори



Рисунок 2.10 - Зношені опорні напівкільця



Рисунок 2.11 - Знос на шийці вала



Рисунок 2.12 - Знос корінної шийки



Рисунок 2.13 - Зношування шатунної шийки



Рисунок 2.14 – Перегрів шийки вала

2.2. Аналіз способів відновлення деталей

Наплавлення з використанням електроду (швидке наплавлення)

Опис:Цей метод передбачає нанесення зносостійкого металевого шару на робочу поверхню валу з використанням електроду. Процес здійснюється шляхом розплавлення матеріалу електрода та з'єднання його з валом.

Переваги:

- Швидкість виконання робіт.
- Економічність в порівнянні з іншими методами.
- Можливість обробки в місцях з мінімальним доступом.

Недоліки:

- Можливе утворення тріщин через нерівномірний тепловий режим.
- Обмежена можливість досягнення високої якості поверхні.

Гальванічне відновлення

Опис: Гальванічне відновлення передбачає нанесення тонких шарів металу на вал шляхом електролізу. Цей метод використовує розчини відповідних металів для створення захисного шару на поверхні валу.

Переваги:

- Висока точність відновлення поверхневих дефектів.
- Можливість отримати рівномірний шар з заданими властивостями.

Недоліки:

- Обмежений до поверхневого відновлення.
- Не підходить для значних дефектів, що потребують більш глибокого відновлення.

Лазерне наплавлення

Опис: Ця технологія використовує лазерний промінь для розплавлення зносостійкого матеріалу і його нанесення на поверхню валу. Лазер забезпечує високу точність і мінімальну термічну деформацію.

Переваги:

- Висока якість та точність відновлення.
- Мінімізація теплових деформацій.
- Можливість роботи з різнорідними матеріалами.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання.
- Потребує високої кваліфікації операторів.

Термічне відновлення (газотермічний метод)

Опис: Метод включає локальне нагрівання дефектної ділянки газовим пальником, після чого здійснюється нанесення зносостійкого металу шляхом наплавлення.

Переваги:

- Швидке виконання.
- Економічний метод.

Недоліки:

- Можливі термічні деформації.
- Менша точність у порівнянні з лазерним наплавленням.

Суперформування (метод гідравлічного відновлення)

Опис: У цьому методі використовуються механічні методи, наприклад, гідравлічні преси, щоб відновити геометричні параметри валу до оптимального стану.

Переваги:

- Простота технологічного процесу.
- Економічність в порівнянні з іншими методами.

Недоліки:

- Підходить лише для деформацій, а не для зносу чи пошкоджень.

- Обмежена ефективність у випадках значних дефектів.

Аргонно-дугове зварювання з нанесенням біметалічних покриттів

Опис: Цей метод використовує аргонно-дугове зварювання для нанесення біметалічного покриття на вал. Застосовуються спеціальні зносостійкі матеріали, що сплавляються з основним металом, утворюючи високоякісні антикорозійні та зносостійкі шари.

Переваги:

- Висока якість і надійність відновлення.
- Можливість роботи з різнорідними матеріалами.
- Можливість застосування для значних дефектів.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання та процесу.
- Потребує високої кваліфікації спеціалістів.

Перспективи для досліджень: Метод аргонно-дугового зварювання з біметалічними покриттями є перспективним напрямом для подальших досліджень. Це пов'язано з його високою ефективністю, якістю відновлення, можливістю працювати з дефектами великих розмірів та забезпеченням довговічності експлуатації відновлених деталей.

Таблиця 2.1 - Порівняльний аналіз методів відновлення валів двигунів

| Метод відновлення | Опис | Переваги | Недоліки |
|----------------------------|---|--------------------------------|--|
| 1. Наплавлення електродом | Швидке нанесення зносостійкого шару на поверхню | Швидкість, економичність | Можливі тріщини, обмежена якість обробки |
| 2. Гальванічне відновлення | Нанесення шарів за допомогою електролізу | Висока точність, рівномірність | Лише поверхневі дефекти, обмеження за глибиною |

| | | | |
|---|---|--|--|
| 3. Лазерне наплавлення | Лазерний промінь для створення шарів | Висока якість, мінімальні деформації | Висока вартість, потреба в кваліфікації |
| 4. Газотермічний метод | Нагрівання газовим пальником та наплавлення | Швидкість, економичність | Можливі термічні деформації |
| 5. Суперформування (гідравлічний метод) | Гідравлічні преси для відновлення форми | Простота, економічність | Лише для геометричних дефектів |
| 6. Аргонно-дугове зварювання з біметалічними покриттями | Застосування аргонного дугового зварювання | Висока якість, сумісність з різнорідними матеріалами | Висока вартість, потреба в спеціалізованих знаннях |

Цей аналіз показує, що метод **"Аргонно-дугове зварювання з нанесенням біметалічних покриттів"** є найперспективнішим з усіх розглянутих методів через його ефективність, можливість працювати з різнорідними матеріалами, зменшення витрат на ремонт у довгостроковій перспективі та високу якість відновлювальних робіт.

2.3. Моделювання променевого наплавлення для визначення параметрів наплавлених поверхонь різнорідними матеріалами

Теплові процеси під час зварювання зручно описувати за допомогою рівняння в рухомій системі координат із нерухомим джерелом. У рухомій системі координат, що переміщається відносно осі x зі швидкістю V , рівняння теплопровідності стає рівнянням перенесення енергії [21]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + V \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{q}{c\rho}, \quad (2.1)$$

Щоб отримати з цієї множини один приватний розв'язок, що характеризує конкретний процес, необхідно мати додаткові дані, які не містяться у вихідному диференціальному рівнянні. Ці додаткові умови, які в сукупності з диференціальним рівнянням визначають конкретну задачу, називаються умовами однозначності:

1) розрахункова схема - нескінченна пластина товщиною δ :

$$-\infty < x < \infty, \quad -\infty < y < \infty, \quad 0 < z < \delta;$$

2) граничні умови змішаного типу:

- на поверхнях $z = 0$ і $z = \delta$ граничні умови другого роду дорівнюють 0:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=\delta} = 0, \quad (2.2)$$

- за x і y граничні умови першого роду дорівнюють 0;

3) два набори теплофізичних характеристик: $c_1, \lambda_1, \rho_1, a_1$ і $c_2, \lambda_2, \rho_2, a_2$;

4) температура в початковий момент часу дорівнює 0.

Зварювання проводиться по стику двох матеріалів (уздовж осі $x, y = 0, z = 0$) зі швидкістю V , електронний промінь потужністю $q = IU$, діаметром d . Час зварювання t .

Розв'язання крайової задачі проводилося методом функцій Гріна. Інтегральний розв'язок рівняння переносу енергії має вигляд

$$T(x, y, z, \tau) = \iiint_{\tau, z, y, x} G(x, x', y, y', z, z', \tau) F(x, y, z, \tau) dx' dy' dz' d\tau, \quad (2.3)$$

де: $G(x, x', y, y', \tau)$ – функція Гріна;

$F(x, y, z, \tau)$ – функція джерела.

Відомо, що функція Гріна допускає неповний поділ змінних (вона розділяється за просторовими змінними x, y, z , але не розділяється за часом τ), тобто її можна подати у вигляді добутку:

$$G(x, x', y, y', z, z', \tau) = G_x(x, x', \tau) G_y(y, y', \tau) G_z(z, z', \tau), \quad (2.4)$$

$$G_x(x, x', \tau) = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{(x - x' + V\tau)^2}{4a\tau}\right), \quad (2.5)$$

$$G_y(y, y', \tau) = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{(y - y')^2}{4a\tau}\right), \quad (2.6)$$

$$G_z(z, z', \tau) = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi a \tau}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\exp\left(-\frac{(z - z' + 2n\delta)^2}{4a\tau}\right) + \exp\left(-\frac{(z + z' + 2n\delta)^2}{4a\tau}\right) \right), \quad (2.7)$$

Одновимірні функції Гріна підбирають з огляду на крайові умови.

Для оцінювання характеру розподілу температурних полів під час наплавлення можна використовувати математичну модель, у якій тепловий вплив електронного променя розглядають як вплив безперервно діючого комбінованого джерела [21, 22]. У межах цього дослідження використовували два типи комбінованих джерел:

1) наплавлення із коливаннями променя впоперек стику з амплітудою A - безперервно діюче лінійне за глибиною (уздовж осі z , завдовжки h) та лінійне уздовж осі y (завдовжки $2A$) нормально розподілене джерело, що вводиться на початку координат і діє впродовж певного відрізка часу t :

$$F1(x, y, z, \tau) = \frac{q\eta}{c\rho} \left(\frac{k1}{2A} \delta(x') E(y') \delta(z') E(\tau) + \frac{k2}{2Ah} \delta(x') E(y') E(z') E(\tau) \right), \quad (2.8)$$

$$E(z') = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq z' \leq h, \\ 0 & \text{при } h < z' < 0; \end{cases} \quad (2.9)$$

$$E(y') = \begin{cases} 1 & \text{при } -A \leq y' \leq A, \\ 0 & \text{при } A < y' < -A; \end{cases} \quad (2.10)$$

$$E(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } t_0 \leq \tau \leq t, \\ 0 & \text{при } \tau > t; \end{cases} \quad (2.11)$$

2) Направлення з Х-подібними коливаннями променя з амплітудою b - безперервно діюче лінійне за глибиною (уздовж осі z , завдовжки h) і прямокутне ($2b \times 2b$) на поверхні, нормально розподілене джерело, введене на початку координат, яке діє протягом певного відрізка часу t :

$$F_2(x, y, z, \tau) = \frac{q\eta}{c\rho} \left(\frac{k_1}{4b^2} \cdot E(x')E(y')\delta(z')E(\tau) + \frac{k_2}{4b^2h} E(x')E(y')E(z')E(\tau) \right), \quad (2.12)$$

$$E(x') = \begin{cases} 1 & \text{при } -b \leq x' \leq b, \\ 0 & \text{при } b < x' < -b; \end{cases} \quad (2.13)$$

$$E(y') = \begin{cases} 1 & \text{при } -b \leq y' \leq b, \\ 0 & \text{при } b < y' < -b; \end{cases} \quad (2.14)$$

$$E(z') = \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq z' \leq h, \\ 0 & \text{при } h < z' < 0; \end{cases} \quad (2.15)$$

$$E(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } t_0 \leq \tau \leq t, \\ 0 & \text{при } \tau > t. \end{cases} \quad (2.16)$$

Розподіл потужності променя q між поверхневим і лінійним за глибиною джерелом здійснюється за рахунок введення коефіцієнтів розподілу енергії k_1 і k_2 відповідно. Середнє значення коефіцієнтів: $k_1 = 0,2 \dots 0,3$ і $k_2 = 0,7 \dots 0,8$.

Для імітації впливу нормально-кругового джерела розраховується час дії фіктивного джерела:

$$t_0 = \frac{1}{4aK}, \quad (2.17)$$

коефіцієнт зосередження для заданого діаметра електронного променя

$$K = \frac{12}{d^2}, \quad (2.18)$$

Судити про величину заглиблення лінійного джерела можна за розрахунковою глибиною проплавлення, яка пов'язана з параметрами Наплавлення критеріальним рівнянням [23]:

$$H = \frac{a^{(1-0,5k)}}{(\lambda T_{пл})^k} (\eta q)^k V^{0,5k-1} d^{-0,5k}, \quad (2.19)$$

де a - температуропровідність;

λ - теплопровідність;

$T_{пл}$ - температура плавлення;

η - ефективний ККД;

q - потужність теплового потоку;

V - швидкість зварювання;

d - діаметр променя;

$k = 0,68(\lambda T_{пл})^{0,15}$.

Таким чином, запишемо інтегральний розв'язок рівняння перенесення енергії відносно функції першого джерела, що описує математичну модель Наплавлення із поперечними коливаннями променя:

$$\begin{aligned}
 T1(x, y, z, \tau) = & \frac{k1 \cdot q\eta}{8A\pi\lambda} \int_0^t \frac{1}{\tau} \cdot \exp\left(-\frac{(x+V\tau)^2}{4a\tau}\right) \times \\
 & \times \left(\operatorname{erf}\left(\frac{y+A}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-A}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(z+2n\delta)^2}{4a\tau}\right) \partial\tau + \\
 & + \frac{k2 \cdot q\eta}{16Ahc\rho\sqrt{\pi a}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\tau}} \cdot \exp\left(-\frac{(x+V \cdot \tau)^2}{4a\tau}\right) \times \\
 & \times \left(\operatorname{erf}\left(\frac{y+A}{2 \cdot \sqrt{a\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-A}{2 \cdot \sqrt{a\tau}}\right) \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{z+h+2n\delta}{2 \cdot \sqrt{a\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-h+2n\delta}{2 \cdot \sqrt{a\tau}}\right) \right) \partial\tau, \quad (2.20)
 \end{aligned}$$

Аналогічно запишемо інтегральний розв'язок перенесення енергії відносно функції другого джерела, який описує математичну модель наплавлення із X-подібними коливаннями променя:

$$\begin{aligned}
 T2(x, y, z, \tau) = & \frac{k1 \cdot q\eta}{16b^2c\rho\sqrt{\pi a}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{\tau}} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{x+b+V \cdot \tau}{2 \cdot \sqrt{a\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-b+V \cdot \tau}{2 \cdot \sqrt{a\tau}}\right) \right) \times \\
 & \times \left(\operatorname{erf}\left(\frac{y+b}{2 \cdot \sqrt{a\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-b}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\exp\left(-\frac{(z+2n\delta)^2}{4a\tau}\right) \right) \partial\tau + \frac{k2 \cdot q\eta}{32b^2hc\rho} \times \\
 & \times \int_0^t \left(\operatorname{erf}\left(\frac{x+b+V\tau}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-b+V\tau}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right) \left(\operatorname{erf}\left(\frac{y+b}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-b}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right) \times \\
 & \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\operatorname{erf}\left(\frac{z+h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-h+2n\delta}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right) \partial\tau. \quad (2.21)
 \end{aligned}$$

Для моделювання зварювання різнорідних матеріалів необхідно задати залежність теплофізичних характеристик від координат. Оскільки зварювання починається в точці з координатами $y = 0$, на поверхні розрахункового тіла ($z = 0$), уздовж осі x , межею розділу двох матеріалів буде вісь y . Відповідно, ділянці, що лежить зліва, тобто за умови $y < 0$, присвоюються значення

теплофізичних характеристик першого матеріалу ($c_1, \lambda_1, \rho_1, a_1$), ділянці, що лежить праворуч, тобто за умови $y > 0$ присвоюються значення теплофізичних характеристик другого матеріалу ($c_2, \lambda_2, \rho_2, a_2$). Як припущення присвоюємо середнє значення теплофізичних характеристик матеріалів за умови $y = 0$. Теплофізичні характеристики матеріалів, що зварюються, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Теплофізичні характеристики матеріалів

| Параметр | Сталь 12Х21Н5Т | Бронза БрХ08 |
|--|-------------------|-----------------|
| Коефіцієнт теплопровідності λ , Дж/(с·м·К) | 25 | 260 |
| Щільність ρ , кг/м ³ | 7650 | 8900 |
| Теплоємність c , Дж/(кг·К) | 528 | 480 |
| Температура плавлення | ~1500 | ~1080 |

Розрахунок температурних полів проводили в програмі Mathcad 15.

Лістинг складається з декількох послідовних етапів:

1) присвоєння змінним значень режиму зварювання (прискорювальна напруга, струм променя, діаметр променя на поверхні, швидкість зварювання, час зварювання) і теплофізичних характеристик зварювальних матеріалів (теплопровідність, щільність, теплоємність);

2) попередній розрахунок глибини проплавлення на основі вихідних даних для визначення величини заглиблення лінійного джерела. Розрахунок додаткових параметрів (коефіцієнт зосередження K і час дії фіктивного джерела t_0);

3) розрахунок температурних полів по координатних площинах X-Y і Y-Z.

Результати моделювання та порівняння з експериментальними даними. Розрахункові дані були зіставлені зі зразками, звареними зі сталі 12Х21Н5Т (товщина 7,5 мм) з бронзою БрХ08 (товщина 5,5 мм), з'єднання в замок. Зразки були зварені за такими режимами:

- режим 1: $I = 32...34$ мА, $U = 60$ кВ, $V_{св} = 5$ мм/с, поперечні коливання;
- режим 2: $I = 32...35$ мА, $U = 60$ кВ, $V_{св} = 5$ мм/с, Х-подібні коливання.

Розглянемо перший режим. Розрахункові температурні поля в площині Х-У за $z = 0$ подано на рис. 2.15.

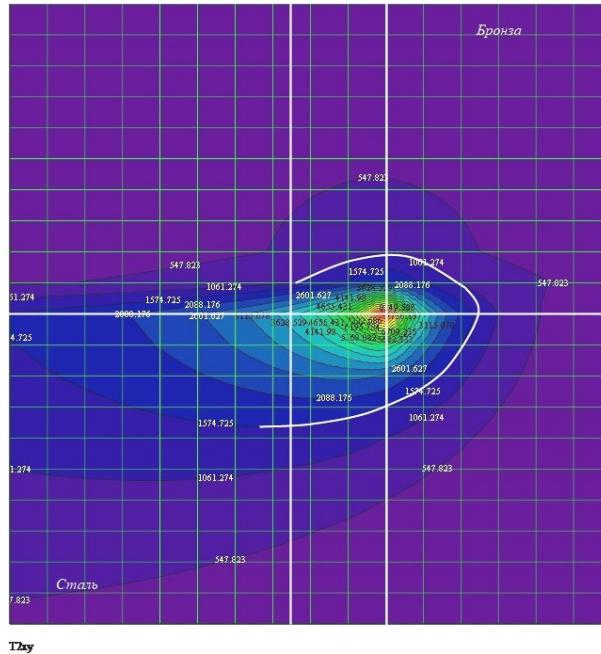


Рисунок 2.15 - Розподіл температур у площині Х-У за $z = 0$ (поділка 0,5 мм) для режиму 1

Максимальна ширина зони, нагрітої до температури плавлення, у сталі зміщена щодо координати $x = 0$. Це пов'язано з більшою тепловою інерцією сталі порівняно з бронзою. Для отримання достовірних даних за параметрами шва необхідно проводити розрахунок теплових полів у площині Y-Z за $x = 0$ (для визначення ширини шва по бронзі) і за зміщення на 1,25 мм (для визначення ширини шва по сталі). Розрахункові температурні поля в площині Y-Z представлені на рис. 2.16.

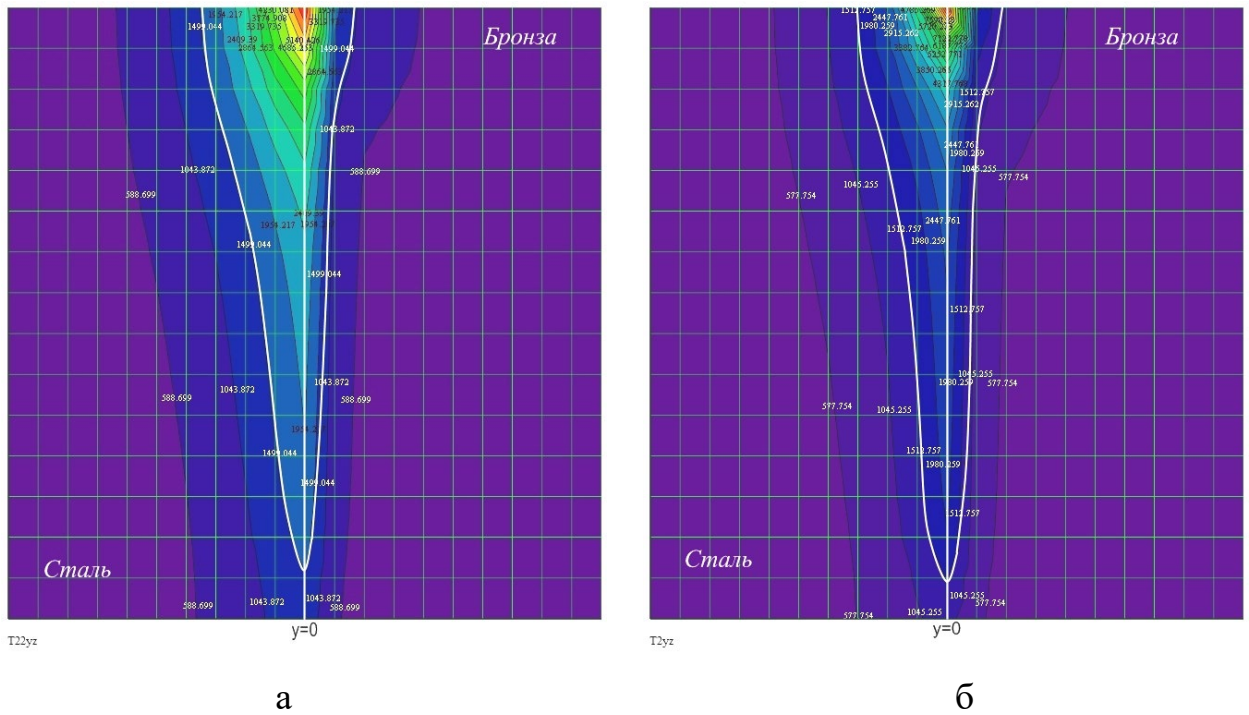


Рисунок 2.16 Розподіл температур у площині Y-Z для режиму 1:
 а - зі зміщенням за віссю x; б - за $x = 0$

Таким чином, нами отримано математичну модель для розрахунків температурних полів під час електронно-променевого зварювання різномірних матеріалів з осциляцією променя (поперечні і X-подібні коливання). Розрахункові температурні поля, отримані за допомогою цієї моделі, дають змогу судити про геометрію зварних швів із точністю, достатньою для інженерних розрахунків. Ця модель може бути використана для орієнтовного підбору режимів зварювання різномірних матеріалів.

2.4. Температурні умови роботи плоско заточеного вольфрамового електрода

У процесі аргонодугового наплавлення вольфрамовим електродом можливе плавлення електрода в середній частині, що призводить до необхідності частої зміни електродів і їх великої витрати. Це залежить від величини зварювального струму, діаметра і вильоту електрода. У роботі [25] проводилися

виміри розподілу температури по довжині електрода з торованого вольфраму оптичним пірометром. Досліди проводилися за різних значень зварювального струму. Виявилось, що за великого струму максимум температури спостерігається не на кінці електрода, а в деякій середній точці.

У роботі [26] побудовано математичну модель стаціонарного розподілу температури по довжині неплавкого електрода. Модель заснована на кінцево-різницевій апроксимації стаціонарного одновимірного рівняння теплопровідності. Отриману систему нелінійних алгебраїчних рівнянь розв'язують методом ітерацій. За певних значень струму максимум температури спостерігається в середній частині вольфрамового електрода. Це пояснюється високим питомим опором і низькою теплопровідністю вольфраму за високої температури.

З метою уникнення перегріву вольфрамового електрода в середній частині проводилися чисельні експерименти на моделі [26]. Досліджували вплив геометричних параметрів, зокрема виліт електрода на розподіл температури в ньому

На базі запропонованої методики [26] здійснимо математичне моделювання розподілу температури $T(z)$ і потенціалу $U(z)$ у вольфрамовому електроді для реальних умов наплавлення.

На рис. 2.17 представлена розрахункова схема для виведення рівняння, що описує розподіл температури і потенціалу в неплавкому електроді. Вольфрамовий електрод встановлено в мідне водоохолоджувальне оснащення.

На одиниці довжини електрода виділяється потужність:

$$g_1 = I^2 \cdot R_1(z) = \frac{I^2}{S(z) \cdot \rho \cdot T(z)}, \quad (2.22)$$

де $R_1(z)$ - електричний опір одиниці довжини електрода (Ом*см);

$S(z)$ - площа поперечного перерізу (см²);

$T(z)$ - розподіл температури по довжині (°C).

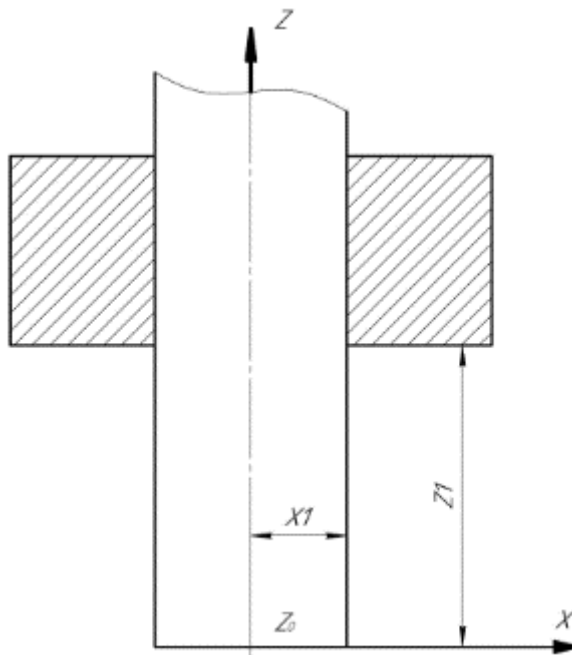


Рисунок 2.17 - Розрахункова схема вольфрамового неплавкого електрода

Радіус електрода в різних перетинах $X(z) = X_1$.

В одиниці об'єму виділяється - потужність:

$$P_0 = \frac{g_1}{S(z)} = \left[\frac{I}{S(z)} \right]^2 \cdot \rho \cdot T(z) \quad (2.23)$$

Крім того, електрод (катод) нагрівається внаслідок бомбардування іонами анода в області активної плями дуги.

Охолодження електрода протягом усього процесу пов'язане з чотирма фізичними механізмами.

1 Теплота йде в охолоджуване оснащення за рахунок теплопровідності. Коефіцієнт теплопровідності вольфраму (ЦТ) залежить від температури. Температуру електрода в перерізі ZI будемо вважати заданою T_1 (заміряною за допомогою термопар).

2 Теплота випромінюється з бічної поверхні електрода в навколишній простір, який можна вважати прозорим для випромінювання, Відповідно до

закону Стефана - Больцмана запишемо рівняння теплового потоку випромінювання:

$$G_2 = \varepsilon \cdot C_0 [T(z)]^4 \quad (2.24)$$

де ε - ступінь чорноти поверхні катода;

Гradientом температури за перерізом електрода нехтуємо внаслідок його малої товщини, тому можна вважати, що теплоту втрачає весь його об'єм. Кількість теплоти P_1 , що втрачається одиницею об'єму електрода за одиницю часу:

$$P_1 = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot C_0 [T(z)]^4}{x(z)} \quad (2.25)$$

3. Теплота забирається з бічної поверхні конвективними потоками захисного газу. Тепловий потік при конвекції визначається за законом Ньютона:

$$G_r = a_k [T(z) - T_r] \quad (2.26)$$

де a_k - коефіцієнт конвективної поверхневої тепловіддачі;

T_r - температура захисного газу.

Кількість теплоти P_2 , що втрачається одиницею об'єму електрода в одиницю часу за рахунок конвекції:

$$P_2 = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot C_0 [T(z) - T_r]^4}{x(z)}. \quad (2.27)$$

4 Теплота втрачається в ділянці активної плями дуги за рахунок електронної емісії. Експериментально встановлено, що в широкому діапазоні струмів температура в ділянці активної плями становить 2725... 3100 °С.

Для розрахунку розподілу температури по довжині вольфрамового електрода використовуємо такі залежності властивостей вольфраму від температури [26]:

для питомого опору

$$\rho(T) = -1,0 \cdot 10^{-5} + 3,333 \cdot 10^{-8} T \text{ Ом} \cdot \text{м}. \quad (2.28)$$

для коефіцієнта теплопровідності

$$\lambda(T) = 9,89 T^{-0,303} \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \cdot \text{К}. \quad (2.29)$$

для ступеня чорноти

$$\varepsilon(T) = -2,686 \cdot 10^{-2} + 1,82 \cdot 10^{-4} T - 4 T^{-2} \cdot 2,195 \cdot 10^{-8} \cdot T^2.. \quad (2.30)$$

Чисельне моделювання здійснювалося з використанням методу теплового балансу за неявною різницевою схемою. Завдання розглядали в одновимірній квазістаціонарній постановці. Результати представлено на рис.2.18.

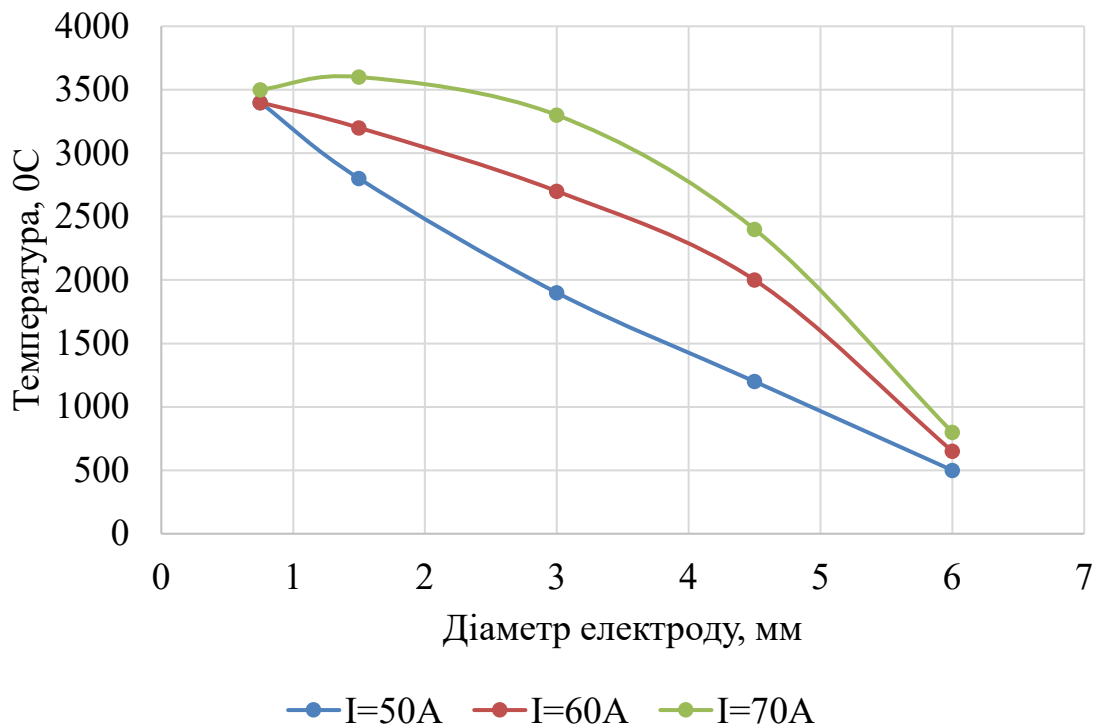


Рисунок 2.18 - Графік розподілу температури по довжині вольфрамового електрода $Z_1 = 6$ мм

З аналізу отриманих даних випливає, що при збільшенні струму температура в середині електрода максимальна. Це може призвести до його плавлення в цій частині. Тому, при визначенні оптимальних параметрів режиму наплавлення необхідно забезпечити відповідні температурні умови роботи неплавкого вольфрамового електрода.

2.5. Висновок

Нами отримано математичну модель для розрахунків температурних полів під час електронно-променевого зварювання різномірних матеріалів з осциляцією променя (поперечні і Х-подібні коливання). Розрахункові температурні поля, отримані за допомогою цієї моделі, дають змогу судити про геометрію зварних швів із точністю, достатньою для інженерних розрахунків. Ця модель може бути використана для орієнтовного підбору режимів зварювання різномірних матеріалів.

Основним фактором, що стримує широке застосування плоско заточених катодів, є вузький струмовий діапазон горіння дуги з розподіленою катодною плямою (30...50 А/мм²). Визначено можливість його збільшення за рахунок зміни величини вильоту катода з мідної цанги. Отримано кількісні залежності розподілу температур по довжині катода залежно від основних технологічних параметрів.

Для здійснення комбінованого аргоно-дугового наплавляння бронзи на низьковуглецеву сталь із застосуванням плоско заточеного катода, що не плавиться, необхідно використовувати спеціалізоване обладнання. На основі токарно-гвинторізного верстата була створена спеціальна установка, оснащена відповідними технологічними рішеннями для ефективного захисту від впливу шкідливих атмосферних факторів.

Для цього було розроблено конструкцію зварювальної головки, яка працює з плоско заточеним неплавким вольфрамовим електродом. Ця головка забезпечує функціонування з розподіленою катодною плямою, що дозволяє досягати високої якості наплавлення.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Фізико-механічні властивості поверхневого шару, що зазнають змін у процесі обробки, залежать від низки факторів, зокрема від модифікацій, що виникають у фазовому та структурному складі як самих наносяться матеріалів, так і підкладок, на які вони нанесені. Ці зміни можуть бути результатом термічного впливу, механічного навантаження, хімічної взаємодії або специфіки застосовуваних методів обробки. У зв'язку з цим, детальний аналіз цих трансформацій є критично важливим для розуміння та контролю властивостей відновлених поверхонь.

Для дослідження та виявлення специфіки фізико-механічних змін поверхневих шарів у цій роботі застосовувалися сучасні методи, серед яких **металографічний аналіз, рентгеноструктурний аналіз і растрова електронна мікроскопія.**

- **Металографічний аналіз** дозволяє оцінювати мікроструктуру матеріалів, визначаючи зміни у фазовому складі, розподілі фаз, а також особливості зернової структури.
- **Рентгеноструктурний аналіз** дає можливість виявляти кристалічні структури, їх орієнтацію та фазові переходи, що виникають у процесі обробки та нанесення покриттів.
- **Растрова електронна мікроскопія (SEM)** забезпечує високодетальне дослідження мікрогеометрії поверхневих шарів, що дозволяє виявляти локальні дефекти, нерівномірності та інші структурні особливості, які виникають у процесі обробки.

Застосування цих методів у комплексі дозволило отримати повну картину фізико-механічних перетворень у поверхневих шарах, визначити основні фактори, що впливають на ці зміни, а також зрозуміти, як ці зміни можуть вплинути на довговічність, зносостійкість та ефективність відновлених деталей машин.

3.1. Методологія та програма проведення експериментальних досліджень

Усі експериментальні дослідження були поділені на три основні етапи (див. рис. 31).

На першому етапі було проведено ретельний літературний аналіз причин, що призводять до виходу з ладу двигунів ЯМЗ-238 під час їх експлуатації, а також методів і технологій, які застосовуються для відновлення їх функціональної спроможності.

В результаті аналізу було встановлено, що основною причиною виходу з ладу є зношування третьових поверхонь у взаємодії "шийка колінчастого валу — вкладиш". Оптимальним методом для ефективного відновлення цих зношених поверхонь є технологія нанесення металізаційного покриття, після чого додається антифрикційний бронзовий шар.

Крім цього, було проведено огляд низки досліджень, що вивчають залежність між параметрами структури та субструктури покриттів і їх експлуатаційними характеристиками. Ці дані дозволяють краще зрозуміти, як фізико-хімічні властивості покриттів впливають на ефективність і тривалість їх роботи в різних умовах експлуатації.



Рисунок 3.1 – Етапи проведення досліджень

На другому етапі експериментальних досліджень здійснювалося нанесення покриттів на зношені деталі з використанням сталі 65Г та Св 08, а також бронзового шару. Під час цього етапу проводилися комплексні дослідження, які включали експериментальне визначення фазового та хімічного складу модифікованого поверхневого шару, аналіз його впливу на властивості покриттів, а також вивчення мікроструктури та зміни мікротвердості на різній глибині покриття.

Крім того, визначалися параметри субструктури, напружений стан, що виникає на утвореній поверхні, та триботехнічні характеристики пар тертя, отриманих у результаті нанесення покриттів. Важливим завданням було виявлення взаємозв'язку між фізико-механічними параметрами підкладок

покриттів, що дозволяє оцінити їх вплив на ефективність функціонування покриттів у реальних умовах.

На третьому етапі було розроблено комплекс рекомендацій щодо вдосконалення існуючих технологій відновлення та зміцнення поверхні шийок колінчастого валу та вкладишів. Запропоновані рекомендації надають можливість забезпечувати робочі параметри новостворених деталей у відповідності до технічних вимог та умов експлуатації.

Крім цього, було проведено розрахунок техніко-економічної ефективності запропонованих підходів та рекомендацій.

Інформація про технічний стан двигунів збиралася під час досліджень як у господарствах, що використовують техніку, так і в спеціалізованих ремонтних майстернях. Під час цього процесу з автомобілів були зняті двигуни, які проходили перевірку на стендах моделі КС-276-03 із застосуванням відповідних вимірювальних інструментів для отримання достовірних даних.

Для відновлення шийок застосовували сталь марок 65Г та Св-08, обробляючи їх на установці електродугової металізації, яку модифікували для використання на токарно-гвинторізному верстаті. Триботехнічні характеристики відновлених зразків визначали на модернізованій машині Гросселя "МИ-2" [27, 28, 29].

Під час лабораторних досліджень кількість експериментів розраховувалася з урахуванням забезпечення надійності результатів на рівні 0,90 та допустимої похибки до 10%. У разі відсутності даних для встановлення точної кількості повторів приймалася мінімальна трійна повторність.

Граничні значення структурних параметрів технічного стану визначали за методикою, яка дозволяє встановити зв'язок між якістю відновлення, витратами робочої рідини та працездатністю двигуна. Щоб зменшити обсяг роботи під час визначення залежностей параметрів технічного стану від напрацювання, застосовували статистичний метод. Збір даних здійснювався за допомогою періодичних спостережень або одноразових обстежень двигунів. Кількість

досліджуваних двигунів вибиралася з метою отримання достовірних оцінок надійності із ймовірністю 0,9 і похибкою 15%.

У ході експериментів як робочу рідину використовували моторне масло МГ-10К2 (ТУ 38101.179-71). Кількість масла відповідала заводським вимогам, а температура протягом усього циклу випробувань підтримувалася в межах 90 ± 5 °С.

Обробку експериментальних даних виконували методом найменших квадратів. Для апроксимації обирали функції, які найбільш точно узгоджувалися з отриманими експериментальними результатами.

Усі завдання експериментальних досліджень виконували відповідно до розроблених методик, що забезпечують точність та надійність отриманих результатів.

3.2. Обладнання для електродугової металізації

Для електродугової металізації використовували установку, що складається з обертача з патроном для закріплення зразків, електродугового металізатора з джерелом живлення дуги постійного струму, механізмом кріплення касет із дротом та його подачі до металізатора і блоком керування параметрами процесу (Рисунок 3.2).



Рисунок 3.3. Установка для електродугової металізації

Для металізації використовувався стаціонарний металізатор ЕДМ-5М. Нанесення шару покриття проводиться в обертачі (токарному верстаті), що забезпечує рівномірне обертання деталі зі швидкістю 40-150 об/хв і подовжнє переміщення металізатора вздовж деталі, що напилюється, зі швидкістю 80-120 мм/хв.

Для живлення електричної дуги металізатора застосовуються джерела живлення постійного струму, що мають жорстку вольт-амперну характеристику, з номінальним струмом 500 А (ВДУ-505, ВДУ-506 тощо).

Для металізації залежно від умов роботи і необхідної твердості шару покриття, що наноситься, використовується дріт діаметром 1,6-2,0 мм марок Св.08ГА, 65Г, ПТТП-1, 20Х13, 50ХФА, 15ГСТЮЦА, Х20Н80, 30ХГСА, Х15Н60 та ін.

Напилення проводилося на такому режимі табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Режими напилення

| № | Режим | Величина |
|---|--------------------------------------|----------|
| 1 | Тиск стисненого повітря, МПа | 0,5-0,6 |
| 2 | Напруга на дузі, В | 28-33 |
| 3 | Робочий струм, А | 250-300 |
| 4 | Дистанція напилення, мм | 130-160 |
| 5 | Поздовжня подача металізатора, мм/хв | 160-200 |
| 6 | Число обертів деталі, об/хв | 80-120 |

Під час напилення необхідно використовувати чисте повітря. Очищення повітря проводиться за допомогою масло-волого-віддільника будь-якої конструкції, що забезпечує необхідний ступінь його чистоти і вологості.

Температура напилюваного покриття не повинна перевищувати 90... 100° С. Для цього необхідно чергувати проходи напилення з проходами металізатора вздовж деталі, що обертається, не вмикаючи подачу стисненого повітря.

Температуру покриття контролюють за допомогою контактних термометрів.

Напилення покриття проводять до необхідних розмірів, з урахуванням технологічного припуску на механічну обробку в межах 0,5-0,7 мм на бік і усадку покриття після повного охолодження (0,15-0,20 мм на діаметр).

Проміжок часу між операціями підготовки і напилення не повинен перевищувати 1,0-1,5 години за температури навколишнього повітря не нижче +15° С. В іншому разі операцію підготовки поверхні деталі під напилення слід повторити.

3.3. Технологічний процес наплавлення антифрикційного шару на поверхні, що піддавались відновленню

На основі проведених досліджень розроблено нову технологію нанесення бронзи БрАмц 9-2 на низьковуглецеву сталь, що застосовується для відновлення колінчатих валів. Використання цієї технології дозволяє значно підвищити довговічність і працездатність відновлених деталей.

Для визначення зносостійкості та антифрикційних властивостей шару, отриманого комбінованим аргонодуговим способом, було виконано наплавлення робочої поверхні колінчатого валу. Наплавлення проводили на корінних шийках діаметром 110 мм та шатунних шийках діаметром 88 мм (рис. 3.2).



Рисунок 3.2 – Колінчатий вал ЯМЗ 238

Наплавлення проводили на спеціалізованій установці для комбінованого аргонодугового наплавлення, використовуючи встановлені параметри режиму, що наведені у таблиці 3.1.

Відомо, що зносостійкість наплавленого металу та його сполучення зі сталевим контртелом залежать від вмісту заліза, алюмінію та марганцю в алюмінієвій бронзі. Зокрема, з підвищенням вмісту заліза зростає інтенсивність зносу пар тертя. Для досягнення зносостійкості наплавленого металу, схожого зі зносостійкістю литих бронз, вміст заліза в сплаві не повинен перевищувати 2–3%.

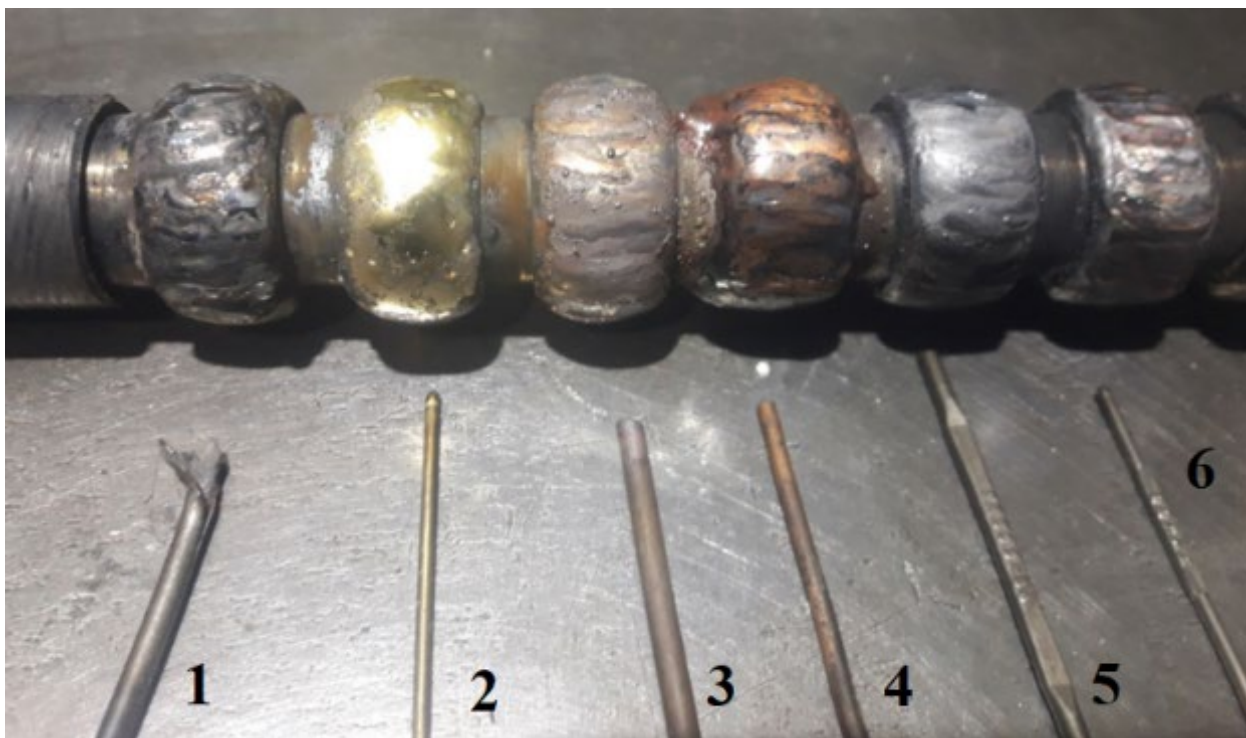
У табл. 3.1 наведено хімічний склад наплавлюваного металу і литої бронзи БрАмц 9-2.

Таблиця 3.1 - Хімічний склад металу, що наплавляється, і литої бронзи БрАМц 9-2.

| | Вміст, % | | |
|------------------------|----------|------|------|
| | Al | Mn | Fe |
| Метал, що напильюється | 9,32 | 2,14 | 2,38 |
| Лита бронза | 9,43 | 2,26 | - |

Під час комбінованого аргонодугового наплавлення вміст заліза не перевищує 3%, що позитивно впливає на стабільність результатів зносу пар тертя.

Для вивчення антифрикційних властивостей і зносостійкості покриттів було змодельовано наплавку на вісь так як наплавлення на шийки валу з подальшим випробуванням дуже коштовне, було проведено стендові випробування біметалевого покриття (діаметром 50 мм) рис. 3.3.



1 -св 08 , 2 – латунь, 3 – бронза, 4 – мідь, 5 – 65Г, 6 – cr 410 (нержавійка NiMo) ще нанесено 2 варіанти нержавійки, але їх не розглядаємо

Рисунок 3.3 – Варіанти напавленого металу

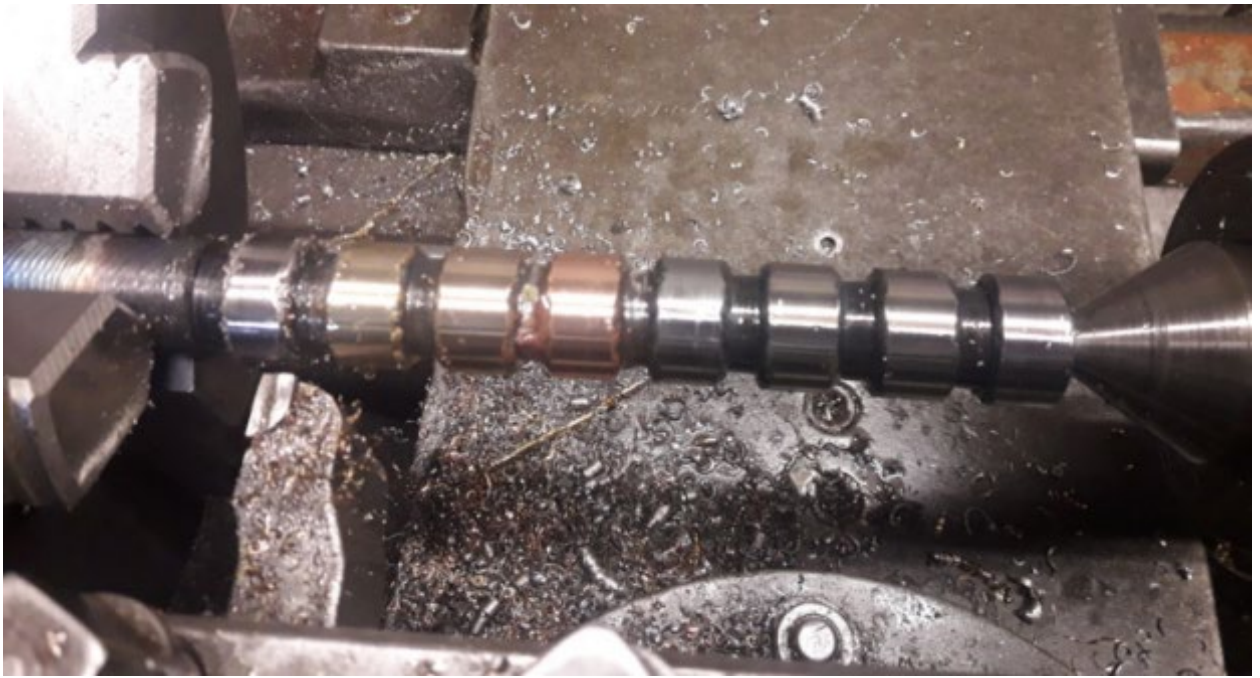


Рисунок 3.4 – Проточка наплавлених поверхонь

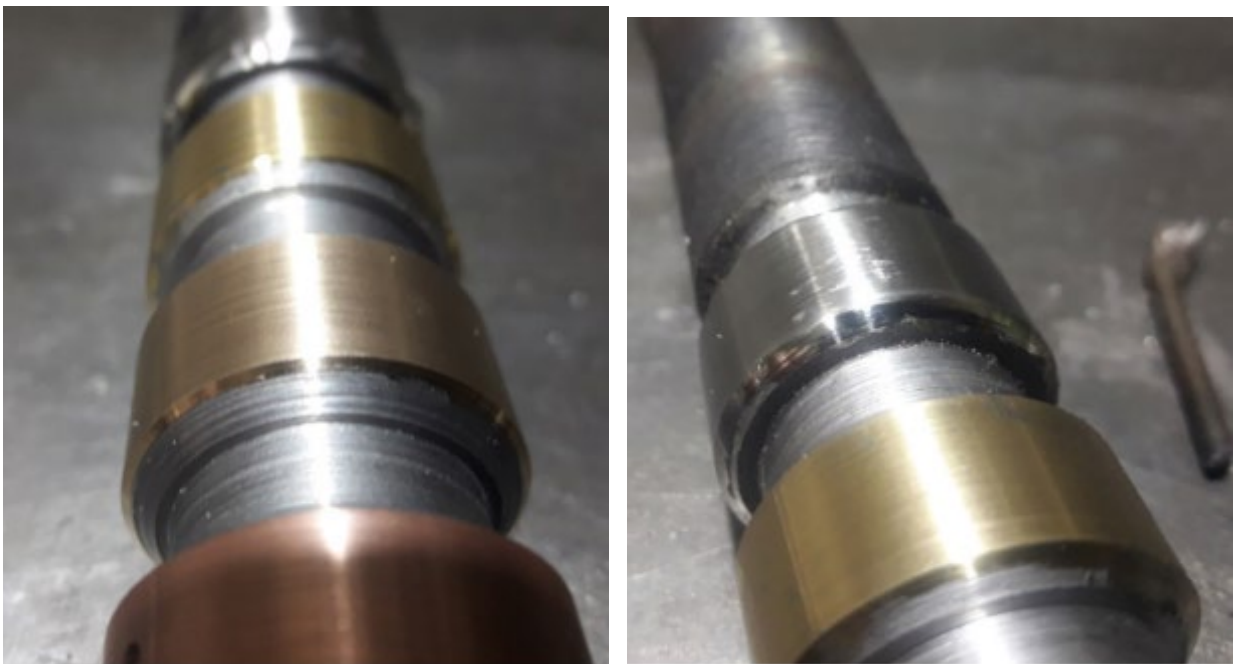


Рисунок 3.5 – Проточені поверхні з латунним, мідним та бронзовим покриттям

Випробування на тертя та зношування були проведені на машині із замкнутим кінематичним контуром фірми «Амслер», використовуючи схему тертя ковзання з частковим вкладенням об обертовий ролик. Для проведення цих випробувань контртіло було виготовлено зі сталі ОМ ОЮОТ2, а випробування

здійснювали на матеріально-технічній базі інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова відповідно до умов укладеного договору про співпрацю між установами.

Перед кожним випробуванням проводили процес притирання робочої поверхні до повного прилягання до ролика. Цей процес забезпечувався фіксацією за допомогою встановленого моменту тертя або візуальним контролем, щоб гарантувати необхідний рівень прилягання поверхонь.

Притирання здійснювали з використанням пасти ГОІ або масла АМС-3. Під час цього процесу ролик обертавали поперечним рухом у поєднанні з горизонтальним переміщенням, що забезпечувало ефективне і рівномірне притирання робочих поверхонь. На етапі фінального притирання використовували лише масло АМС-3, що дозволило отримати стабільні та чисті робочі поверхні для подальших випробувань.

Після завершення притирання зразки промивали з метою видалення залишків притирального матеріалу та зважували на аналітичних вагах для отримання точних даних. Ці дії забезпечували коректність проведених випробувань та дозволяли аналізувати результати з максимальною точністю.

Для наплавки другого шару з кольорових металів використовували аргонно дугове зварювання УДГ 501 з використанням вольфрамових електродів рис. 3.6 різного діаметра.



Рисунок 3.6 – Вольфрамові електроди

3.4. Дослідження антифрикційних властивостей зразків

Антифрикційні властивості були оцінені на основі визначення коефіцієнта тертя та зносу. Ці параметри визначалися шляхом вимірювання зміни маси зразків після випробувань, а для цього зразки зважували на аналітичних вагах із точністю до міліграма.

Коефіцієнт тертя обчислювали за допомогою спеціальної формули, яка дозволяє встановити залежність між силами тертя та навантаженням на зразок.

$$f = \frac{T}{p \cdot \pi \cdot D \cdot N}, \quad (3.1)$$

де T – робота тертя за час досліду;

p – навантаження, що відповідає питомому тиску на вкладиш;

N – число обертів ролика;

D – діаметр ролика.

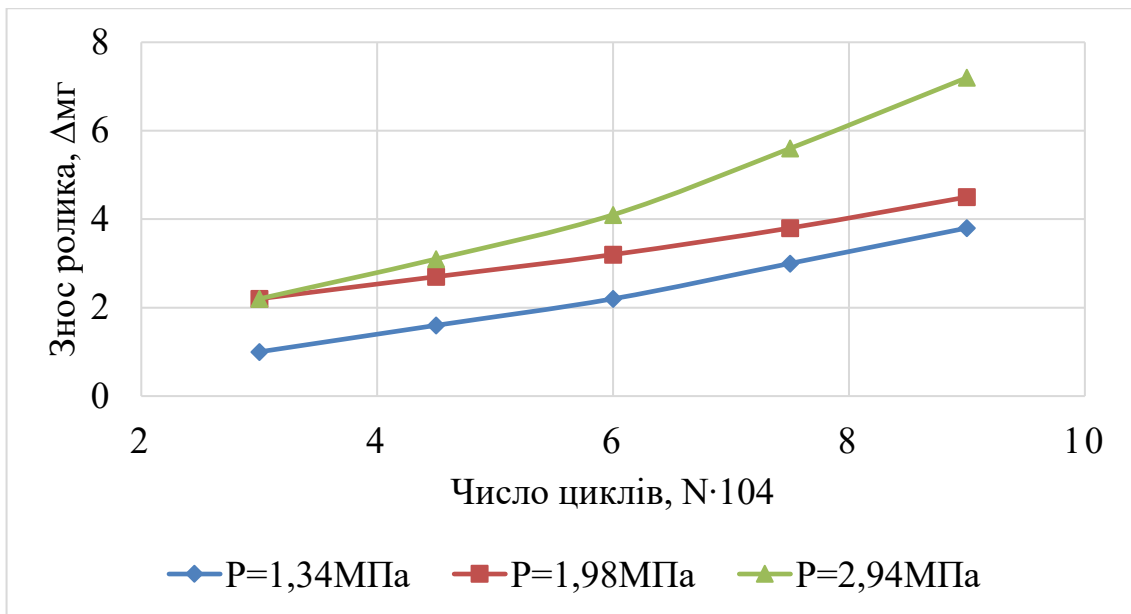
Визначаємо робота від сил тертя

$$T = n_1 \cdot F_{\text{гр}} \quad (3.2)$$

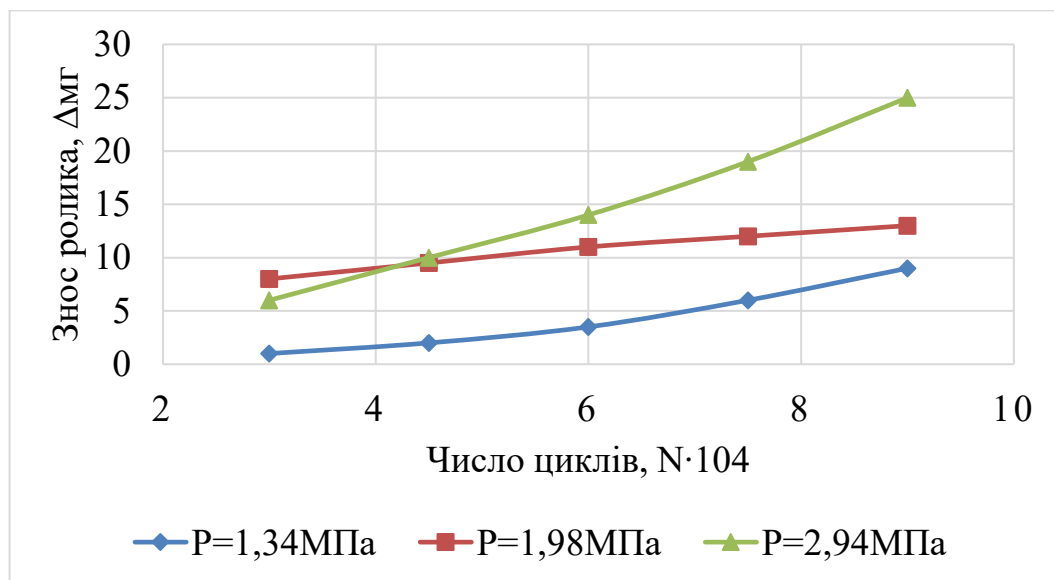
де n_1 – різниця показань числа обертів за інтегратором між закінченням кожного циклу випробувань пари тертя і початком відліку;

$F_{\text{гр}}$ – граничний момент тертя, що дорівнює для даної машини 15000 Нм.

Коефіцієнти тертя, визначені під час випробувань трьох зразків, а також середні значення зносу, представлені на графіках (рис. 3.7 та рис. 3.8). Ці графіки дозволяють проаналізувати динаміку зміни коефіцієнта тертя та інтенсивність зношування матеріалів під час випробувального процесу.



а



б

Рисунок 3.7 - Залежність зношування диску (а) і накладки (б) залежно від кількості циклів і тиску

За результатами проведених випробувань було встановлено, що поверхні, які взаємодіяли під час тертя, не мали відхилень від заданих (вихідних) розмірів. Характер припрацювання наплавленої поверхні, що проявляється у вигляді рисок і подряпин, повністю відповідає характеру припрацювання, що спостерігається у литих поршнів.

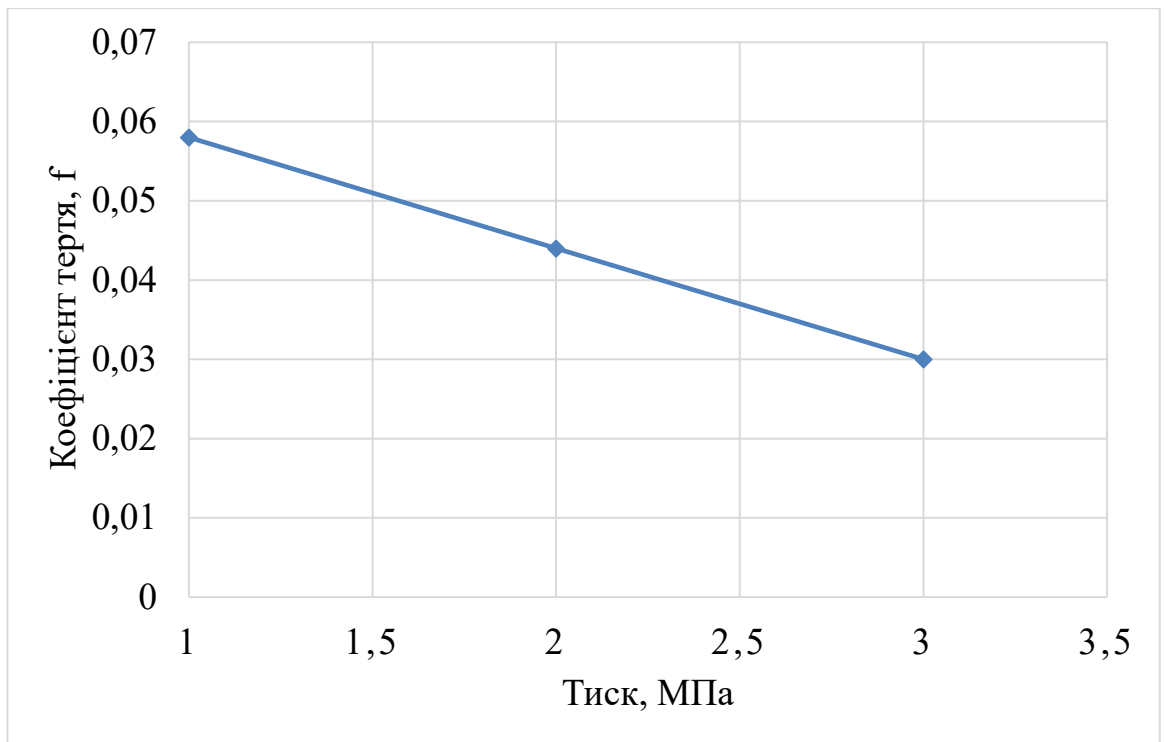


Рисунок 3.8 - показана залежність коефіцієнта тертя наплавленої бронзи БрАмц 9-2 від відтискного тиску, що дозволяє оцінити вплив навантажень на тертя між робочими поверхнями та визначити ефективність антифрикційних властивостей наплавленого шару при різних рівнях відтискного тиску

Металографічний аналіз натурних вкладишів, які були задіяні у випробуваннях, продемонстрував відсутність структурних змін у бронзі в зоні контакту. Це підтверджує, що процес наплавлення та робота наплавленого шару не призводять до деградації його мікроструктури під впливом тривалої експлуатації та тертя, що є критично важливим показником надійності та довговічності наплавлених шарів у роботі під навантаженням.

3.5. Результати дослідження твердості нанесеного покриття

Дослідження твердості сформованих покриттів, які були створені в процесі відновлення, їх товщини та інших характеристик показало, що неоднорідність структури призводить до значних похибок у вимірах. Для

отримання надійних і точних результатів необхідно проводити багаторазові вимірювання цих параметрів.

Отримані результати аналізували за допомогою методів статистичної обробки експериментальних даних.

Середнє значення, визначене на основі емпіричних вимірів, обчислювалося за наступною формулою:

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (3.2)$$

де X_i — випадкова величина проведеного виміру;

N — кількість вимірів.

Розрахуємо дисперсію S^2

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i (x_i - x)^2 \quad (3.3)$$

де m_i — відносна частота.

Розрахуємо середнє квадратичне відхилення

$$\sigma_x = \frac{S}{\sqrt{N-1}} \quad (3.4)$$

Якщо прийняти коефіцієнт надійності β рівним 0,9 - 0,95, можливо визначити границі довірливого інтервалу

$$\Delta X = t_\beta \cdot \sigma_x \quad (3.5)$$

де t_β — коефіцієнт Стюдента, обумовлений для різних значень вибірки.

3.6. Випробування пар тертя на знос

Триботехнічні випробування є одним із ключових методів для дослідження зносостійкості, тертя та ефективності пар тертя, що виникають при експлуатації відновлених деталей машин. Ці випробування дають змогу оцінити, як відновлені покриття взаємодіють з іншими поверхнями, виявити фізичні зміни та характеристики, що виникають в результаті тривалого тертя та навантажень, а також визначити параметри, що впливають на їх довговічність.

У ході триботехнічних випробувань основною метою було визначити оптимальні умови навантажень, за яких забезпечуються мінімальні втрати енергії, максимальна ефективність пар тертя, мінімальні значення коефіцієнта тертя, а також виявити критичний рівень навантажень, що призводять до передзадирного стану пар тертя.

Результати випробувань на оптимальне та максимальне навантаження, а також на припрацьовуваність, були отримані та проаналізовані. Основні параметри, що були визначені:

- Оптимальне навантаження (R_{opt}): Значення навантаження, при якому досягається мінімальний коефіцієнт тертя ($f = f_{min}$). Це значення є критичним для оцінки ефективності відновлених покриттів і дозволяє мінімізувати енергійні витрати в умовах експлуатації.
- Максимальне навантаження (R_{mp}): Показник, що характеризує критичний стан поверхневого шару, за якого виникають передзадирні явища.

Додаток Б містить результати експериментальних вимірювань для всіх проведених випробувань, що дозволяють провести детальний аналіз припрацьовування та навантажень.

На основі отриманих даних можна зробити наступні висновки:

Оптимальне навантаження (R_{opt}) забезпечує мінімальний коефіцієнт тертя, що підтверджує ефективність відновлених покриттів у стабільному робочому режимі.

Максимальне навантаження (Рмп) призводить до передзадирного стану, що погіршує експлуатаційні характеристики пар тертя.

Припрацьовування виявилось ефективним для досягнення стабільного тертевого режиму при навантаженнях, наближених до оптимальних значень.

Результати досліджень наведено на рис. 3.9, 3.10.

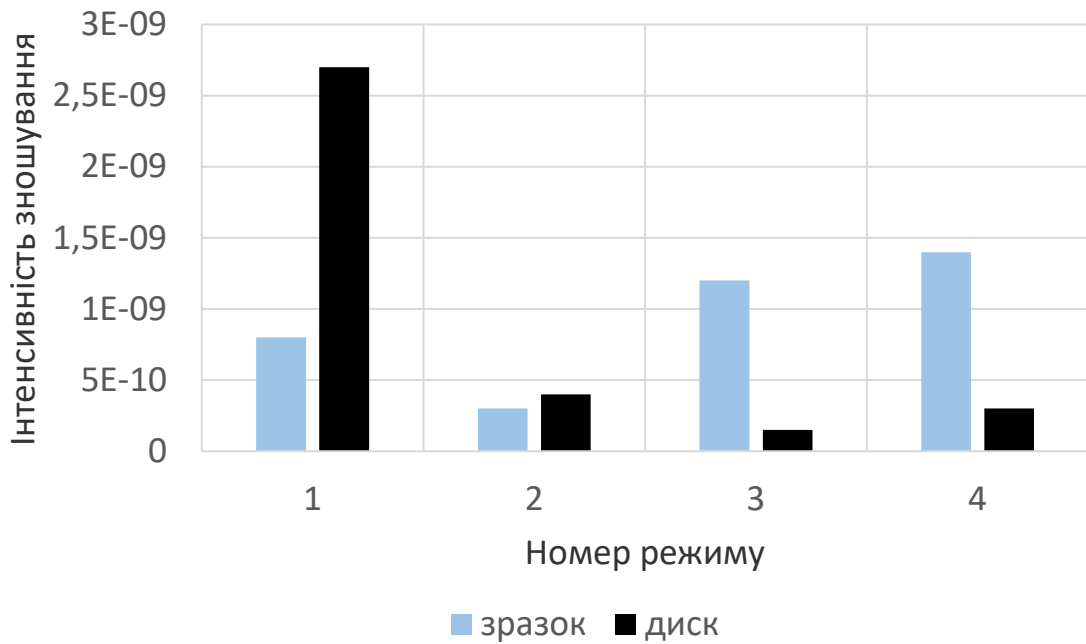


Рисунок 3.9. – Інтенсивність зношування

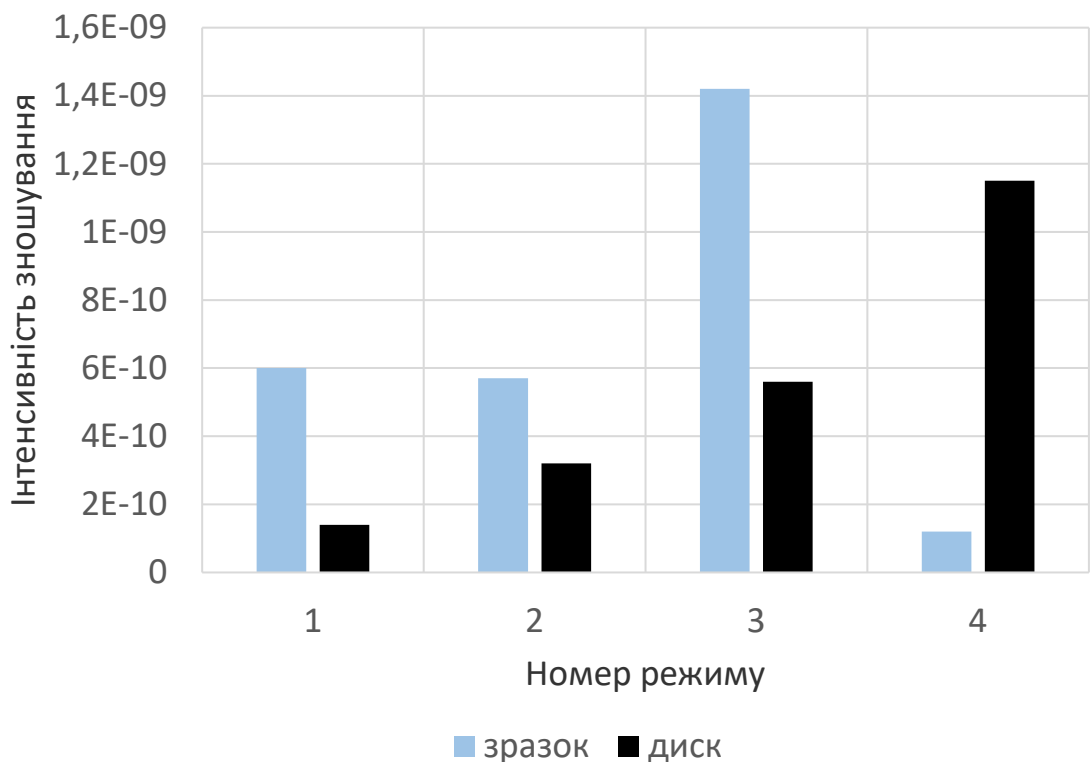


Рисунок 3.10 – Інтенсивність зношування матеріал зразка 20x покриття диска Бр. ОЦС 4-4-425

Слід зазначити, що інтенсивність зношування покриттів для зразків, одержаних при обробці електродами зі сталі 65Г зі швидкостями подачі 0,193 мм/об і 0,26 мм/об, а також сталь 08 зі швидкостями 0,08 мм/об і 0,193 мм/об, перевищує інтенсивність зношування диска.

Порівняння сумарної інтенсивності зношування (показано на Рис. 3.11 та Рис. 3.12) дає змогу визначити, що найбільше зношуванню піддавалися пари тертя, отримані обробкою:

- електродом зі сталі 65Г у першому режимі (швидкість подачі 0,08 мм/об);
- сталь 08 у третьому режимі (швидкість подачі 0,193 мм/об).

Натомість найменша інтенсивність зношування була відзначена для наступних режимів:

- режим 2 (швидкість подачі 0,114 мм/об) для сталі 65Г;
- режим 1 (швидкість подачі 0,08 мм/об) для сталі Св 08.

Ці дані дозволяють зробити висновок про те, що швидкість подачі дроту і тип використовуваного електрода мають суттєвий вплив на інтенсивність зношування покриттів та ефективність робочих пар тертя.

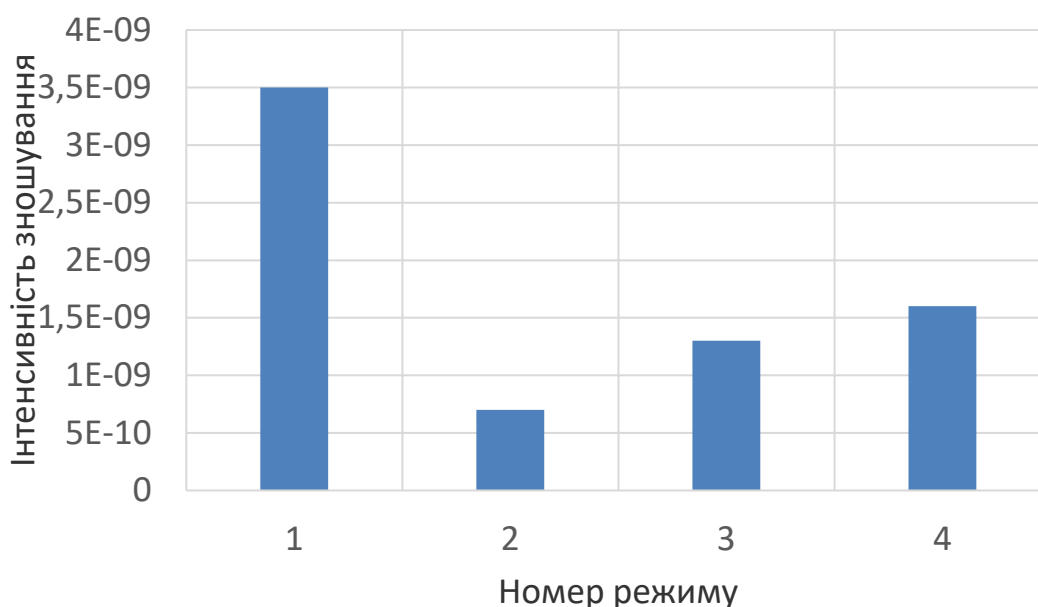


Рисунок 3.11 – Порівняльна гістограма інтенсивностей зносу на різних режимах обробки

Матеріал зразка 20Х відновленого сталю 65Г та покриті бронзою

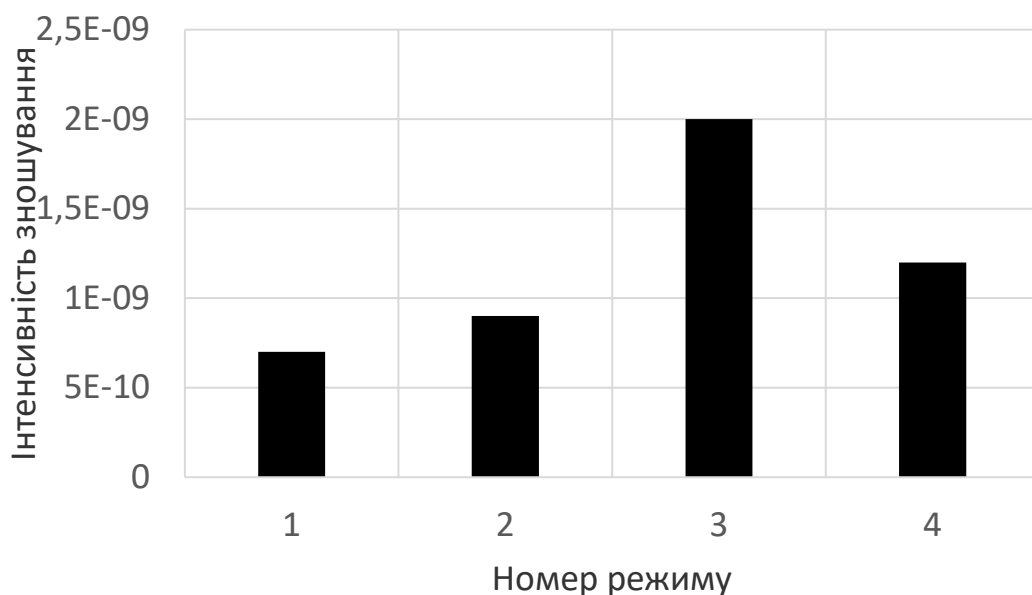


Рисунок 3.12 - Порівняльна гістограма інтенсивностей зносу на різних режимах обробки

Матеріал зразка 20Х відновленого сталю 08 та покриті бронзою

Порівняння було проведено на основі фактору зношування Φ (дані наведені в Таблиці 3.3).

Аналіз результатів показав наступне:

Для пари тертя «покриття 65Г-диск» спостерігається немонотонна залежність фактору зношування від швидкості подачі дроту. До певної міри, значення цієї залежності є обернено пропорційними величині макронапруг. Найменше значення фактору зношування спостерігається при швидкості подачі 0,114 мм/об.

Для пари тертя «покриття Св 08-диск» також спостерігається немонотонна залежність, але в цьому випадку вона прямо пропорційна величині макронапруг. Найбільше значення фактору зношування зафіксовано при швидкості подачі 0,193 мм/об.

Ці результати вказують на те, що швидкість подачі дроту впливає на інтенсивність зношування пар тертя, проте цей вплив залежить від типу матеріалу покриття, що використовується.

3.7. Висновок

Замінюючи стандартний неплавкий катод на плоско заточений, можна досягти зниження нерівностей на поверхні, що наплавляється. Це відбувається завдяки зниженню концентрації тиску дуги, що покращує якість наплавленого шару. Повторна дугова обробка на оптимальних режимах забезпечує додаткове згладжування наплавленої поверхні без зниження її якості.

Використання плоско заточеного вольфрамового катода, що не плавиться, разом із подальшою дуговою обробкою дозволяє зменшити витрати часу на механічну обробку та зекономити алюмінієву бронзу. Це робить процес наплавлення більш ефективним і економічним.

Оптимальне поєднання мікротвердостей поверхневих шарів, при якому фактор зношування має найнижче значення, досягається під час застосування двошарових біметалічних покриттів. Цей процес призводить до ефекту зміцнення сталі до мікротвердості $H_{\mu} = 2510$ МПа.

Крім того, було встановлено, що значення фактору зношування пар, відновлених біметалічним двошаровим покриттям, у 10,23 рази менше порівняно з парою, відновленою за застосуванням базової технології. Цей результат підтверджує ефективність методу нанесення двошарових біметалічних покриттів для підвищення довговічності й зменшення зношування відновлених деталей.

4. БЕЗПЕКА ПРАЦІ

4.1. Аналіз рівня охорони праці на дільниці відновлення деталей електродуговою металізацією

Загальна характеристика процесу. Дільниця відновлення деталей електродуговою металізацією пов'язана з використанням обладнання для нанесення металевих покриттів. Цей процес супроводжується утворенням високих температур, розпиленням металевих частинок, виділенням пилу та аерозолів, а також шумом і випромінюванням.

Відповідальність за охорону праці. Керівник дільниці — забезпечує дотримання нормативів охорони праці. Спеціаліст з охорони праці — контролює проведення інструктажів, стан робочих місць, відповідність ЗІЗ. Працівники — несуть особисту відповідальність за виконання правил охорони праці.

Інструктажі з охорони праці. На підприємстві проводяться такі види інструктажів:

1. Вступний інструктаж — для нових працівників, стажерів та персоналу, який вперше допускається до роботи на дільниці.
2. Первинний інструктаж на робочому місці — перед початком самостійної роботи, з урахуванням специфіки електродугової металізації.
3. Повторний інструктаж — не рідше одного разу на 6 місяців.
4. Позаплановий інструктаж — у разі змін у технологічному процесі, аварій або нещасних випадків.
5. Цільовий інструктаж — при виконанні робіт підвищеної небезпеки.

Основні ризики та можливі недоліки. Ризики:

- **Механічні травми:** через неправильну експлуатацію обладнання.
- **Опіки:** через високі температури та розплавлений метал.
- **Шкідливі викиди:** вплив пилу та аерозолів на органи дихання.
- **Шум:** підвищений рівень шуму може викликати втомлюваність і втрату слуху.

- **Електро травми:** через несправність обладнання або недотримання правил роботи.

Можливі недоліки стану охорони праці:

- Недостатнє провітрювання або вентиляція.
- Відсутність або несправність засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).
- Недотримання термінів проведення інструктажів.
- Невідповідність обладнання технічним вимогам безпеки.
- Неналежне маркування зон підвищеної небезпеки.

Діаграма аналізу ризиків для ділянки електродугової металізації. Вона показує ймовірність виникнення кожного ризику та його важкість. Згідно з аналізом:

- Найбільшу небезпеку становлять шкідливі викиди (висока ймовірність і важкість).
- Також важливими є механічні травми та опіки.
- Шум і електро травми мають нижчу ймовірність, але залишаються значними факторами ризику.

Для кожного ризику варто запровадити додаткові заходи безпеки, відповідно до їхнього пріоритету.

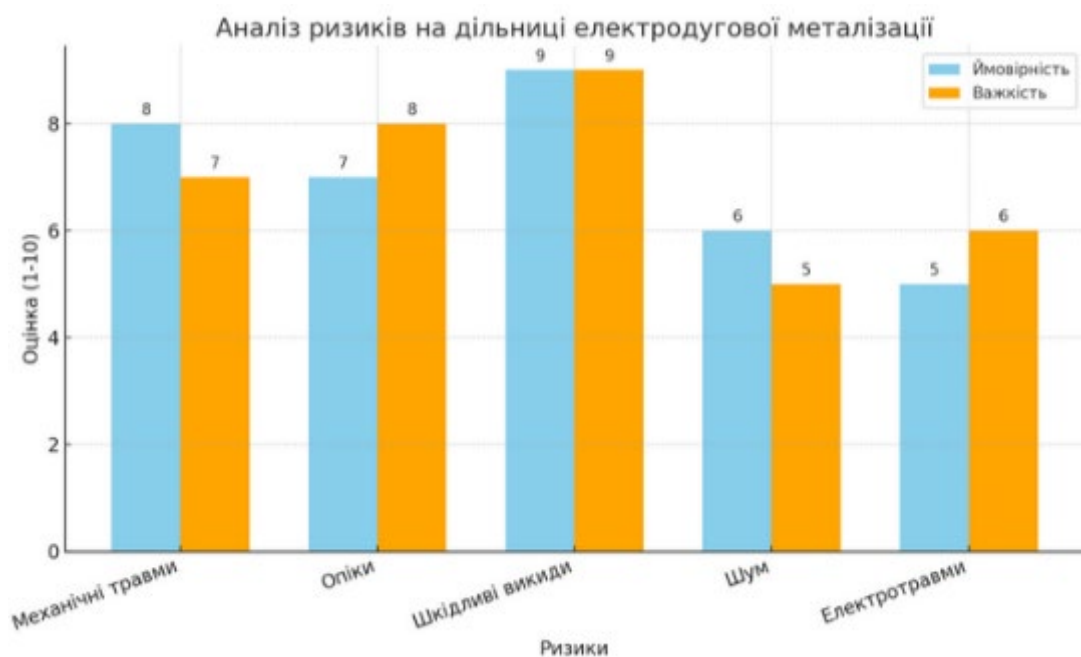


Рисунок 4.1 – Аналіз ризиків на ділянці

4.2. Шкідливі і небезпечні фактори на дільниці електродугової металізації

Шкідливі фактори таблиця 4.1.

Таблиця 4.1 - Ці фактори можуть викликати негативний вплив на здоров'я працівників у процесі тривалої або короткочасної дії:

| Шкідливий фактор | Джерело виникнення | Можливі наслідки для здоров'я |
|--------------------------------|-------------------------------------|--|
| Металевий пил і аерозолі | Процес розпилення металу | Хвороби органів дихання, алергії |
| Токсичні гази | Виділення при нагріванні матеріалів | Інтоксикація, ураження слизових оболонок |
| Шум і вібрація | Робота обладнання для металізації | Втома, порушення слуху, нервові розлади |
| Теплове випромінювання | Джерело електродугової металізації | Опіки, перевтома через перегрівання |
| Ультрафіолетове випромінювання | Електродуга під час роботи | Ураження очей і шкіри |

Небезпечні фактори таблиця 4.2.

Ці фактори створюють загрозу життю або здоров'ю працівників у разі недотримання правил безпеки.

Таблиця 4.2 -Небезпечні фактори

| Небезпечний фактор | Джерело виникнення | Можливі наслідки |
|----------------------------------|--|------------------------------|
| Опіки | Контакт з розплавленим металом або перегрітою поверхнею | Ураження шкіри та тканин |
| Електротравми | Порушення правил безпеки при роботі з електрообладнанням | Ураження електричним струмом |
| Падіння інструментів або деталей | Ненадійне закріплення інструментів або деталей | Травми кінцівок, забиття |
| Механічні травми | Обертальні частини обладнання, несправності машин | Ушкодження кінцівок |

| | | |
|--------------------------------|---|-----------------------|
| Пожежонебезпе- пека | Іскри від електродуги або контакт розплавленого металу з горючими матеріалами | Виникнення по- жеж |
|--------------------------------|---|-----------------------|

Також створимо діаграму рис. 4.2, яка візуалізує рівень впливу кожного фактора (шкідливого чи небезпечного).

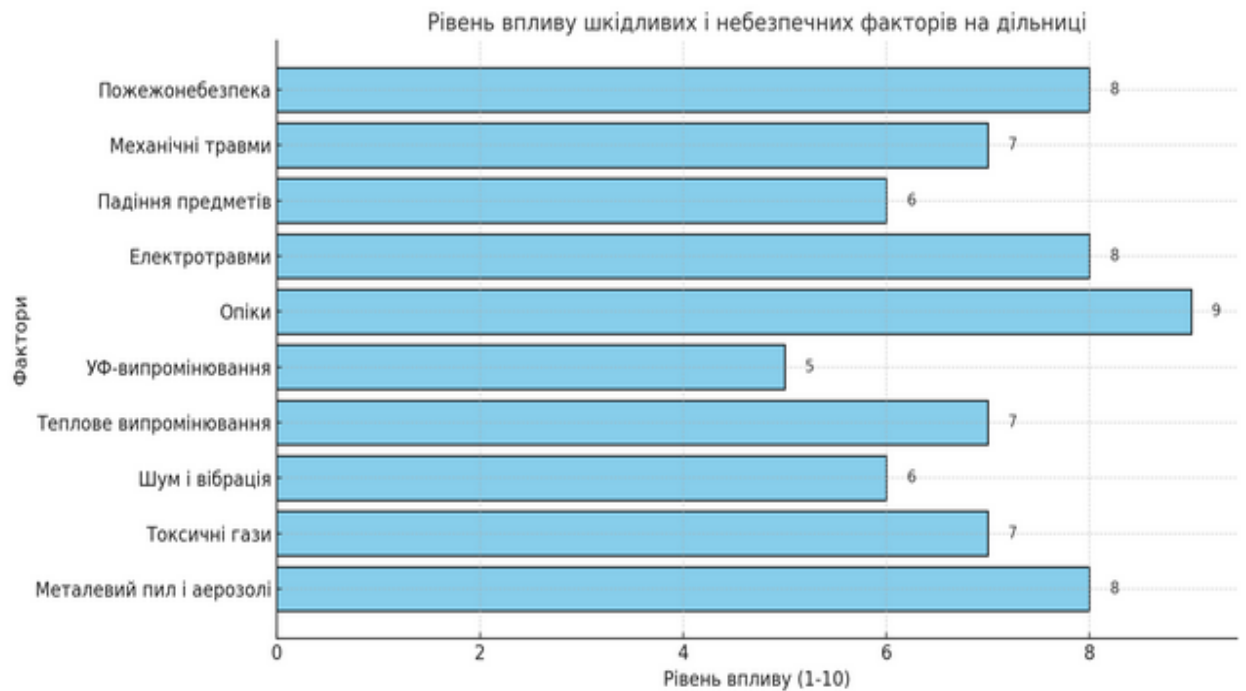


Рисунок 4.2 - Рівень впливу кожного фактора

Діаграма показує рівень впливу шкідливих і небезпечних факторів на дільниці електродугової металізації.

- Найвищий рівень впливу мають опіки, металевий пил, електротравми та пожежонебезпека.
- Трохи нижчий рівень, але все ще суттєвий, спостерігається у токсичних газів, механічних травм, теплового випромінювання та падіння предметів.
- Шум і вібрація та УФ-випромінювання мають відносно помірний вплив, але їх не можна ігнорувати.

4.3. Заходи безпечної роботи на ділянці електродугової металізації

Для забезпечення безпечних умов праці на ділянці необхідно впровадити комплекс заходів, спрямованих на мінімізацію впливу шкідливих і небезпечних факторів.

4.3.1. Технічні заходи

1. Вентиляція та очищення повітря:
 - Установлення місцевих витяжних систем для видалення металевого пилю та аерозолів.
 - Регулярна перевірка фільтрів вентиляції.
2. Захист від шуму:
 - Використання шумозаглушувальних кожухів на обладнанні.
 - Розміщення обладнання на віброізолюючих платформах.
3. Безпечне обладнання:
 - Своєчасна перевірка технічного стану устаткування.
 - Оснащення обладнання системами аварійного вимкнення.
4. Освітлення:
 - Забезпечення достатнього рівня освітлення для безпечного виконання робіт.
 - Використання спеціальних світлофільтрів для зменшення впливу УФ-випромінювання.

4.3.2. Організаційні заходи

1. Інструктажі та навчання:
 - Регулярне проведення вступного, первинного, повторного та позапланового інструктажів.
 - Організація практичних занять щодо безпечного використання обладнання.
2. Режим праці та відпочинку:

- Встановлення перерв для зниження впливу шуму та теплового випромінювання.
 - Чергування фізичного та розумового навантаження.
3. Контроль за виконанням норм:
- Регулярні перевірки дотримання правил охорони праці на робочих місцях.
 - Ведення журналів обліку інцидентів і перевірок.
 -

4.3.3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

1. Захист органів дихання:
 - Використання респіраторів з фільтрами для роботи з металевим пилом і газами.
2. Захист очей і обличчя:
 - Використання захисних щитків і окулярів із світлофільтрами.
3. Захист шкіри та рук:
 - Робочі рукавички з вогнестійких матеріалів.
 - Спецодяг з термостійкої тканини.
4. Захист слуху:
 - Використання навушників або вкладишів для зниження рівня шуму.
5. Взуття:
 - Взуття з металевими вставками для захисту від падіння важких предметів.

4.4.4. Запобігання аварійним ситуаціям

1. Пожежна безпека:
 - Оснащення ділянки вогнегасниками та пожежною сигналізацією.
 - Регулярне навчання працівників діям у разі пожежі.
2. Електробезпека:
 - Заземлення та ізоляція обладнання.

- Проведення перевірок електромережі.
3. План дій на випадок аварії:
- Розробка та розміщення евакуаційних планів.
 - Практичні навчання з евакуації.

4.3.5. Моніторинг умов праці

1. Регулярна оцінка ризиків:
 - Вимірювання рівня шуму, температури, запиленості та концентрації токсичних речовин.
2. Медичний огляд працівників:
 - Проведення обов'язкових періодичних медичних оглядів.
 - Моніторинг стану здоров'я працівників, особливо органів дихання та слуху.

4.4. Висновок

Для забезпечення безпечної роботи на дільниці електродугової металізації необхідно впровадити комплекс технічних, організаційних заходів і засобів індивідуального захисту. Основними ризиками є металевий пил, токсичні гази, шум, теплове та УФ-випромінювання, а також опіки й електротравми.

Пріоритетними заходами є:

- Оснащення дільниці ефективною вентиляцією, шумоізоляцією та системами пожежогасіння.
- Регулярне навчання працівників і контроль за дотриманням правил охорони праці.
- Забезпечення працівників засобами індивідуального захисту, такими як респіратори, спецодяг та захисні окуляри.
- Постійний моніторинг умов праці та стану здоров'я персоналу.

Впровадження цих заходів дозволить мінімізувати вплив шкідливих і небезпечних факторів, запобігти аварійним ситуаціям і зберегти здоров'я працівників.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

5.1. Розрахунок економічної ефективності технології відновлення металізацією з нанесенням антифрикційного покриття

Розрахунки проведемо для колінчастого валу двигуна ЯМЗ 238 у якого 4 шатунні та 5 корінних шийок, загальна площа відновлення складає 21,5 дм².

Собівартість відновлення 1 дм² зношеної поверхні [31].

$$C_{\Pi} = 3\Pi + Ц_{\text{М}}, \quad (5.1)$$

де 3Π - витрати на зарплату робітників ремонтного персоналу, грн/дм²;

Ц_М - ціна матеріалів для відновлення зношеної площі підшипникового гнізда в 1 дм², грн/дм².

Витрати на заробітну плату робітників ремонтного персоналу

$$3\Pi = 3\Pi_0 + 3\Pi_{\text{Д}} + Н_{\text{СВ}}, \quad (5.2)$$

де 3Π₀ - витрати на основну заробітну плату робітників ремонтного персоналу, грн;

3Π_Д - витрати на додаткову заробітну плату робітників ремонтного персоналу, грн;

Н_{СВ} - витрати на нарахування соціального внеску, грн.

Основну заробітну плату робітників ремонтного персоналу розраховано за формулою

$$3\Pi_0 = T_{\text{Об}} \cdot T_{\text{Год}}, \quad (5.3)$$

де Т_{Об} - загальні витрати праці на відновлення 1дм² зношеної поверхні, год;

$T_{\text{год}}$ - годинний тариф, грн/год.

Трудомісткість відновлення 1 дм² зношеної поверхні шийок валу $T_{\text{об}}$, що дорівнює нормі на виконання всіх робіт із відновлення, зафіксували методом хронометражу (таблиця 5.1). Розрахунок виконували для колінчастого валу ЯМЗ 238 з діаметральним зносом отворів у 0,20 мм.

Для операцій технологічного процесу відновлення прийнято четвертий розряд слюсаря з відрядною оплатою праці та годинним тарифом у 92 грн/год.

$$ЗП_0 = 92 \cdot 0,03 = 2,76 \text{ грн I дм}^2.$$

Додаткова заробітна плата

$$ЗП_д = ЗП_0 \cdot K_{\text{дп}}, \quad (5.4)$$

де $K_{\text{дп}}$ - коефіцієнт додаткової оплати, що становить 10 % від витрат на основну зарплату робітників ремперсоналу.

$$ЗП_д = 2,76 \cdot 0,1 = 0,276 \text{ грн I дм}^2$$

Нарахування на соціальний внесок визначали за формулою

$$H_{\text{св}} = (ЗП_0 + ЗП_д) \cdot K_{\text{св}} / 100, \quad (5.5)$$

де $K_{\text{св}}$ - коефіцієнт нарахувань соціального страхування, що становить 18 % від суми витрат на основну і додаткову зарплати ремонтного персоналу.

$$H_{\text{св}} = (2,76 + 0,276) \cdot 0,18 = 0,55\% \text{ грн I дм}^2$$

Таблиця 5.1- Норма часу на відновлення 1дм² зношеної поверхні колінчастого валу

| №п/п | Найменування операції | Норма часу, хв/дм ² |
|------|---|--------------------------------|
| 1 | Проточка поверхні | 0,3 |
| 2 | Нанесення покриття металополімеру на поверхню | 1,8 |
| 3 | Проточка поверхні | 0,30 |
| 4 | Нанесення антифрикційного покриття | 1,8 |
| 5 | Шліфовка | 1,4 |
| 6 | Контроль якості | 0,25 |
| 7 | Всього | 5,85 (0,1 г/дм ²) |

Заробітна плата робітників під час відновлення 1 дм² зношеної поверхні підшипникових отворів корпусних деталей

$$ЗП = 2,76 + 0,276 + 0,5 = 3,6 \text{ грн I дм}^2$$

Ціна матеріалів для відновлення площі в 1 дм² зношеної поверхні

$$C_M = N_M \cdot Ц_M \quad (5.6)$$

де N_M - норма витрати матеріалів на відновлення площі в 1дм² зношеної поверхні, кг/дм²;

$Ц_M$ - ціна одиниці ремонтних матеріалів, грн. за кг:

Ціна матеріалів для відновлення колінчастого валу показана в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 - Вартість матеріалів для відновлення 1 дм² підшипникових отворів корпусних деталей

| № п/п | Найменування матеріала | Ціна, грн | Витрата, кг/дм ² | Вартість, грн/дм ² |
|-------|------------------------|-----------|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 | Дріт наплавочний, кг. | 256 | 0,1 | 25,6 |
| 2 | Захисний газ, літр | 32,5 | 1,2 | 39 |
| 3 | Електроенергія, кВт | 11 | 4,1 | 45,1 |
| | Всього | | | 109,7 |

$$C_m = 109,7 \text{ грн I дм}^2$$

Собівартість відновлення площі 1 дм² колінчастого валу

$$C_n = 3,6 + 109,7 = 113,3 \text{ грн/дм}^2$$

Річні витрати на відновлення зношених поверхонь складають

$$Z_H = (N \cdot C_n) + C_{обл}, \quad (5.7)$$

де N - річна програма відновлення поверхні КВ, дм².

C_{обл} – ціна обладнання для нової технології, грн.

Для порівняння візьмемо середньостатистичне підприємство яке займається перешліфуванням колінчастих валів під ремонтний розмір з програмою 1000 колінчастих валів на рік. При відновленні валів 8-12% це вали які досягли граничного стану і їх вибраковують, тобто 100 валів. При відновленні валів металізацією можливо відновити їх ресурс до стану нового, а використовувачи двошарові антифрикційні покриття ще й подовжити термін роботи до 30 %.

У більшості КВ які досягли граничного стану не відновлювали, а замінювали на нові. За результатами вибракування КВ загальна площа зношеної поверхні, що підлягає відновленню, склала N = 2150 дм².

Річний обсяг витрат при відновленні КВ за розробленою новою технологією складе

$$Z_n = (2150 \cdot 113,3) + 1860000 = 2103595 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект від впровадження технології відновлення підшипникових отворів корпусних деталей

$$E_{\text{річ}} = Z_2 - Z_n, \quad (5.8)$$

де Z_2 - річний обсяг витрат на придбання нових деталей, грн;

Z_n - річні витрати на відновлення корпусних деталей за новою технологією, грн.

Річний обсяг витрат на придбання нових КВ становить:

$$Z_2 = K_{\text{КВ}} \cdot Ц = 100 \cdot 37000 = 3700000 \text{ грн.} \quad (5.8)$$

де $K_{\text{КВ}}$ – Кількість колінчастих валів, шт;

$Ц$ – ціна одного колінчастого валу [], грн.

Річний економічний ефект від впровадження технології відновлення КВ

$$E_{\text{річ}} = 3700000 - 2103595 = 1596405 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.3 – Економічні показники

| № | Назва параметру | Величина параметру |
|---|--|--------------------|
| 1 | Вид робіт | Відновлення |
| 2 | Площа зношеної поверхні, що підлягає відновленню дм^2 | 2150 |

| | | |
|---|--|---------|
| 3 | Заробітна плата робітників під час відновлення 1 дм ² | 3,6 |
| 4 | Вартість матеріалів для відновлення 1 дм ² | 109,7 |
| 5 | Собівартість відновлення площі 1 дм ² | 113,3 |
| 6 | Річний обсяг витрат | 2103596 |
| 7 | Річний обсяг витрат на придбання нових деталей | 3700000 |
| 8 | Річний економічний ефект | 1596405 |

5.2. Висновок

Узагальнивши результати теоретичних та експериментальних досліджень, розроблено технологію відновлення КВ. Дана технологія охоплює низку операцій: від підготовки поверхні до контролю якості нанесеного покриття. Включення кожного з етапів дозволяє значно підвищити ефективність і точність відновлювальних робіт.

Запровадження цієї технології забезпечує економічну ефективність завдяки зменшенню витрат на заміну зношених деталей новими на рівні 1596405 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Одна з найпоширеніших причин виходу з ладу двигунів ЯМЗ під час їх експлуатації — це провертання шатунних вкладишів, які складають від 20 до 26% усіх випадків відмов. Найчастіше така проблема виникає на третій шатунній шийці в перші етапи експлуатації. При цьому не спостерігається значної різниці у розподілі випадків відмов між новими двигунами та тими, що вже пройшли ремонт.

Найбільш продуктивним та якісним способом відновлення деталей є металізація з наступним нанесенням біметалічного покриття.

Отримано математичну модель для розрахунків температурних полів під час електронно-променевого зварювання різнорідних матеріалів з осциляцією променя (поперечні і Х-подібні коливання). Розрахункові температурні поля, отримані за допомогою цієї моделі, дають змогу судити про геометрію зварних швів із точністю, достатньою для інженерних розрахунків. Ця модель може бути використана для орієнтовного підбору режимів зварювання різнорідних матеріалів.

Виконано досліді і проведено чисельне моделювання для з'ясування температурних умов реалізації режиму роботи неплавкого вольфрамового електрода з розподіленою катодною плямою.

Застосування плоско заточеного вольфрамового катода, що не плавиться, і подальша дугова обробка призводить до зменшення трудомісткості механічної обробки та економії алюмінієвої бронзи.

Оптимальне поєднання мікротвердостей поверхневих шарів, при якому фактор зношування має найнижче значення, досягається під час застосування двошарових біметалічних покриттів. Цей процес призводить до ефекту зміцнення сталі до мікротвердості $H_{\mu} = 2510$ МПа.

Крім того, було встановлено, що значення фактору зношування пар, відновлених біметалічним двошаровим покриттям, у 10,23 рази менше порівняно з парою, відновленою за застосуванням базової технології. Цей

результат підтверджує ефективність методу нанесення двошарових біметалічних покриттів для підвищення довговічності й зменшення зношування відновлених деталей.

Для забезпечення безпечної роботи на дільниці електродугової металізації необхідно впровадити комплекс технічних, організаційних заходів і засобів індивідуального захисту. Основними ризиками є металевий пил, токсичні гази, шум, теплове та УФ-випромінювання, а також опіки й електротравми.

Узагальнивши результати теоретичних та експериментальних досліджень, розроблено технологію відновлення КВ. Дана технологія охоплює низку операцій: від підготовки поверхні до контролю якості нанесеного покриття. Включення кожного з етапів дозволяє значно підвищити ефективність і точність відновлювальних робіт.

Запровадження цієї технології забезпечує економічну ефективність завдяки зменшенню витрат на заміну зношених деталей новими на рівні 1596405 грн.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тернюк М. У пошуках істини завод КрАЗ. *banga.ua*. URL: <https://banga.ua/pages/zavod-kraz/6031-v-poiskakh-istiny> (дата звернення: 02.12.2024).
2. ДП «Редакція газ. «Голос України». Автомобілі підвищеної прохідності Холдингової компанії «АвтоКрАЗ». *Голос України - газета Верховної Ради України*. URL: <http://www.golos.com.ua/article/182808> (дата звернення: 02.12.2024).
3. Афанасьєв І. А. Шляхи підвищення післяремонтної надійності турбокомпресорів автотракторних двигунів / І. А. Афанасьєв, Є. В. Калганков // *Zbior artykulow naukowych. Konferencji Miedzynarodowej Naukowo-Praktycznej.* – Warszawa – 2016. – С. 6-11.
4. Компанія «АвтоКрАЗ» [онлайн], (без дати). <https://www.autokraz.com.ua>. Режим доступу: <https://www.autokraz.com.ua>
5. Малецький А. Проект ділянки ремонтного цеху для технічного обслуговування та ремонту електропостачання автомобілів КрАЗ 6322, з дослідженням методики пошуку несправностей в системі електричного пуску двигуна : Магістерська робота. Тернопіль, 2021. 60 с.
6. Положення про технічне обслуговування та ремонт дорожніх транспортних засобів. ДЕРЖАВГОТРАНСНДІГТРОЕКТ Міністерство транспорту України, Київ 2001. С 25-33.
7. Кугель Р.Ф. Надійність машин масового виробництва / Кугель Р.Ф. - К., 1981. - 238с.
8. Армашов Ю.В. Надійність сільськогосподарської техніки: навчальний посібник / Ю.В. Армашов, П.К. Охмат. – Дніпропетровськ.: РВВ ДДАУ, 2008. – 208 с.
9. Мельянцов П.Т. Методичні рекомендації «Організація та технологія ремонту МТП в умовах сільськогосподарського підприємства» /

Мельянцов П.Т., Калганков Є.В., Кириленко О.І. – Д.: ДДАУ, 2010. – 125

с.

10. Нижняк Д. В. Визначення показників надійності колінчатих валів автотракторних двигунів / Д. В. Нижняк, Є. В. Калганков, В. І. Дирда. // Zbiór raportów naukowych. „Inżynieria i technologia. 2014. osiągnięć, projekty hipotezę.», Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2014.. – 2014. – С. 8–13.

11. Биков В.Г. Причини необоротних формозмін тонкостінних вкладишів і шляхи підвищення надійності підшипників високонавантажених двигунів / Биков В.Г., Салитков М.О., Горбунов М.М. // Двигунобудування, 1980, № 6. - С.34-37.

12. Новаковський С. Ю. Електроіскрова обробка поверхонь тертя як засіб підвищення ресурсу деталей машин / С. Ю. Новаковський, Є. В. Калганков // ГО «Інститут інноваційної освіти»; Науково-учбовий центр прикладної інформатики НАН України. – Київ : ГО «Інститут інноваційної освіти», 2019. – С. 204–208.

13. Черній О. Дослідження безвідказності тракторів John Deere серії 8R в експлуатаційних умовах України. Теоретичні та практичні питання аграрної науки : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. 2022. С. 117–120.

14. Терехов В. Ю. Визначення технічного стану моторного масла та його вплив на трибоспряження двигуна / В. Ю. Терехов, Є. В. Калганков, В. І. Дирда. // Zbiór raportów naukowych. „ Inżynieria i technologia. 2014. osiągnięć, projekty hipotezę. », Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour». – 2014. – С. 102–105.

15. 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.

16. Билінцев Д. В. Удосконалення технічного обслуговування вантажних автомобілів у фермерському господарстві «Орхідея» Дніпровського району Дніпропетровської області : дипломний проект ступеня вищ. освіти

«Бакалавр» : 208, Агроінженерія / Дмитро Віталійович Билінцев ДДАЕУ. – Дніпро, 2023. – 77 с.

17. Двигун ЯМЗ 238, технічні умови експлуатації [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://wikimotors.ua/yamz-238//>

18. Ремонт машин та обладнання: підручник для вищих навчальних закладів / [Дирда В.І., Мельянцов П.Т., Калганков, Є.В. та ін.]. – Дніпропетровськ: Журфонд, 2015. – 292 с.

19. Проектування сервісних підприємств ремонту машин та агрегатів АПК: навчальний посібник / [Дирда В.І., Калганков Є.В., Мельянцов П.Т. та інші] – Д.: «Герда», 2014. – 100 с.

20. Калганков Є.В. Проектування ремонтно-технологічної документації / Є.В. Калганков, М.Г. Зайцев. Дніпро. ДДАЕУ, 2016. – 48 с.

21. Бригінець В., Подласов С. Фізика для бакалаврів. Коливання і хвилі. Київ : НТУУ КПІ, 2021. 156 с.

22. Новаковський С. Ю. Електроіскрова обробка поверхонь тертя як засіб підвищення ресурсу деталей машин / С. Ю. Новаковський, Є. В. Калганков // ГО «Інститут інноваційної освіти»; Науково-учбовий центр прикладної інформатики НАН України. – Київ : ГО «Інститут інноваційної освіти», 2019. – С. 204–208.

23. Пугач, А., Черній, О. та Калганков, Є., (2023). Дослідження ефекту релаксації напруження та залишкової деформації сучасних полімерних матеріалів для захисту поверхонь деталей від зношування. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. **8**(39), 76–84.

24. Savage W.F., Strunck S.S., JchikawfY.E. The effekt tlektrode geometry in gas tungsten — arc welding ll *Welding Journal*.— 1965.— N 1 1.— P. 489-496.

25. Хлудеєв Б.С. Шляхи оптимізації роботи дилерсько-сервісних центрів техніки John Deere / Б.С. Хлудеєв, Є.В. Калганков // Інтеграція світових наукових процесів як основа суспільного прогресу: Матеріали Міжнародної науково - практичної конференції ГО "Інститут інноваційної освіти" Науково - навчальний центр прикладної інформатики НАН України. – 2019. – С. 180–185.

26. Дирда, В., Кобець, А., Лисиця, М., Заболотна, О., Твердохліб, Т., Калганков, Є. та Черній, О., (2021). Наноматеріали в механіці деформівного твердого тіла на прикладі гумових футеровок барабанних кульових млинів. *Geo-Technical Mechanics*. (157), 131–139.

27. 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.

28. 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.

29. Калініч М.О. Дослідження параметрів відновлення деталей типу вал методом наплавлення / М.О. Калініч, Є.В. Калганков// Zbior artykułow naukowych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej " Inżynieria i technologia. Współczesne tendencje w nauce i edukacji " Paris: Sp. z o.o. "Diamond trading tour". – 2020. – №34. – С. 36–40.

30. Ілюкович, А., (2024). Триботехнічні випробування відновлених пар тертя шляхом нанесення двошарових покриттів. У: *Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу, 15 листопада 2024, Дніпро, Україна*. Дніпро: ДДАЕУ. с. 36–38..

31. Черній О. Дослідження безвідказності тракторів John Deere серії 8R в експлуатаційних умовах України. Теоретичні та практичні питання аграрної науки : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. 2022. С. 117–120.

ДОДАТКИ

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

**ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ
АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ОБЛАДНАННЯ
ТВАРИННИЦЬКИХ КОМПЛЕКСІВ**

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-2-23
Ілюкович Артем Сергійович

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

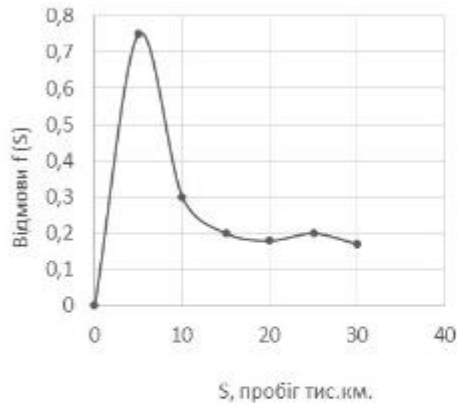
Дніпро-2024

Мета роботи

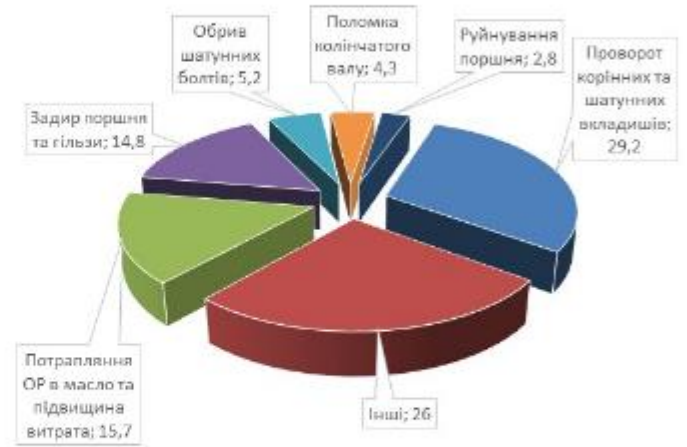
Підвищення надійності шатунних підшипників автотракторних двигунів шляхом нанесення бронзового покриття на сталь.

Задачі роботи

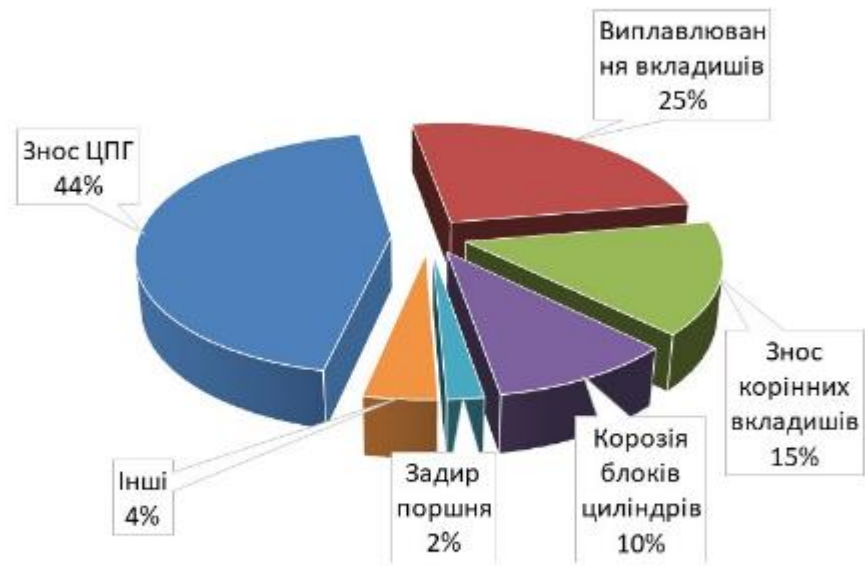
1. Провести аналіз надійності двигунів та встановити причини виходу з ладу, а також встановити найбільш ненадійний вузол. Також дослідити експлуатаційні дефекти деталей двигунів.
2. Провести аналіз існуючих методів та способів нанесення біметалічних покриттів на метал та розробити технологію відновлення посадкових поверхонь дослідної деталі.
3. Провести експериментальні дослідження наплавленого шару бронзи на відновлювальну поверхню деталі.
4. Дослідити оптимальне співвідношення мікротвердостей поверхонь, при якому зносу має мінімальне значення.
5. Розробити заходи з поліпшення умов праці робітників.
6. Провести техніко-економічну оцінку результатів дослідження.



Графік розподілу відмов двигуна від пробігу



Відмови двигунів ЯМЗ 238



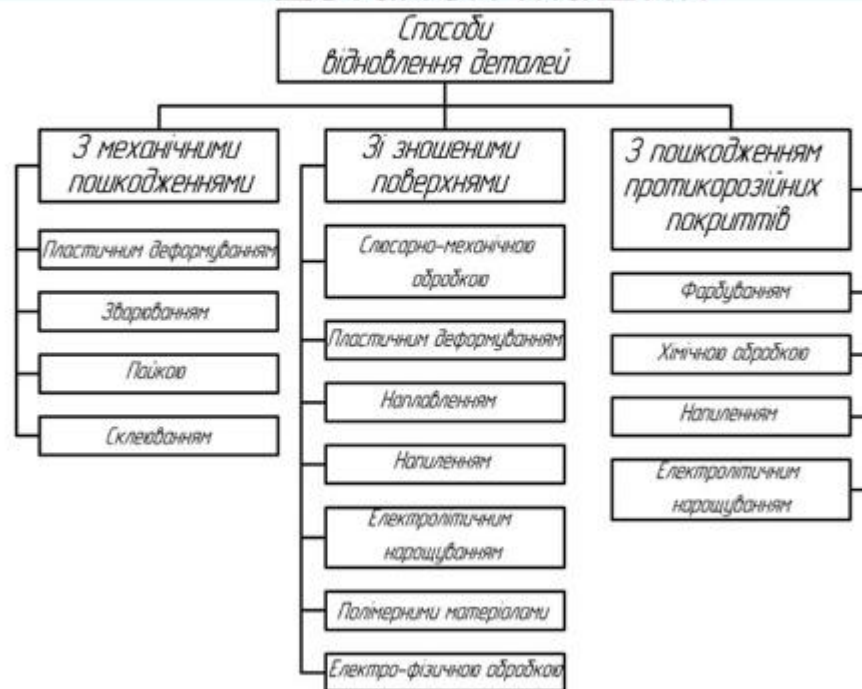
Ресурсні відмови деталей та вузлів відремонтованих двигунів

5

Аналіз експлуатаційних дефектів деталей двигунів

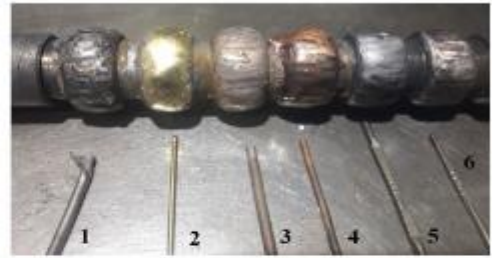


Класифікація способів відновлення деталей машин





Стационарний металізатор ЕДМ-5М

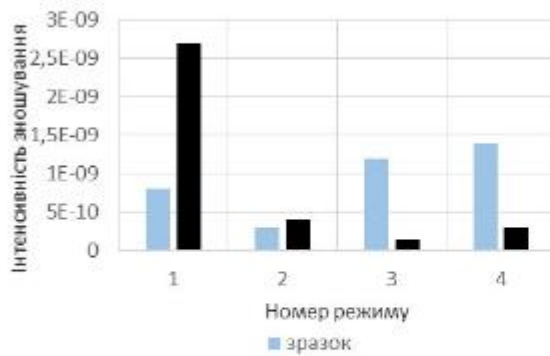


1 - св 08 , 2 – латунь, 3 – бронза, 4 – мідь, 5 – 65Г, 6 – cr 410
(нержавійка NiMo) ще нанесено 2 варіанти нержавійки,
але їх не розглядаємо

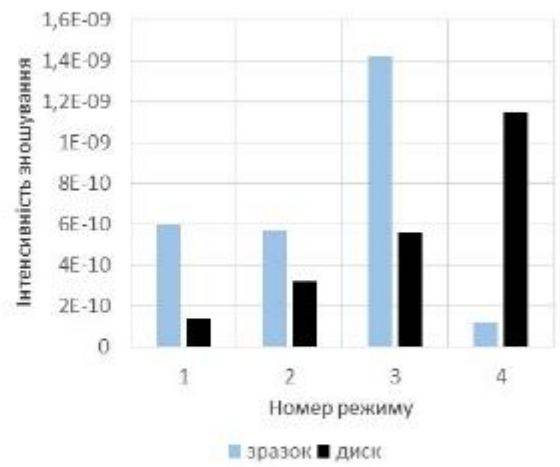
Варіанти наплавленого металу



Проточка наплавлених поверхонь



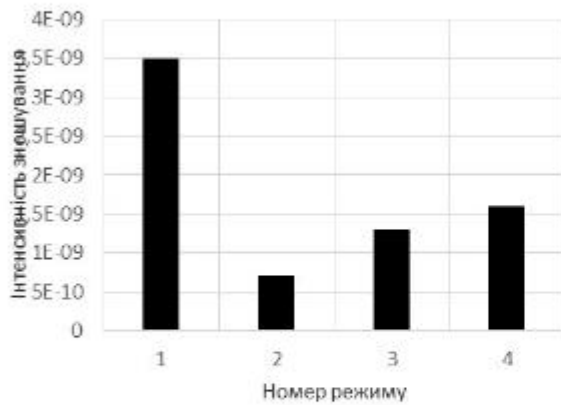
Порівняльний графік інтенсивностей зношування зразка (20X + покриття 65Г) і диску (алюмінієва бронза Бр. ОЦС 4-4-425)



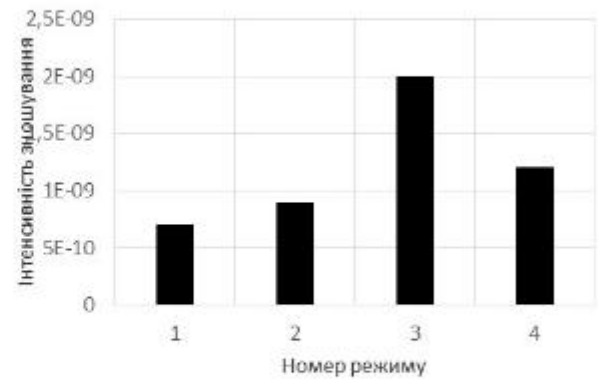
Порівняльний графік інтенсивностей зношування зразка (20X + покриття 08) і диска (алюмінієва бронза Бр. ОЦС 4-4-425)

9

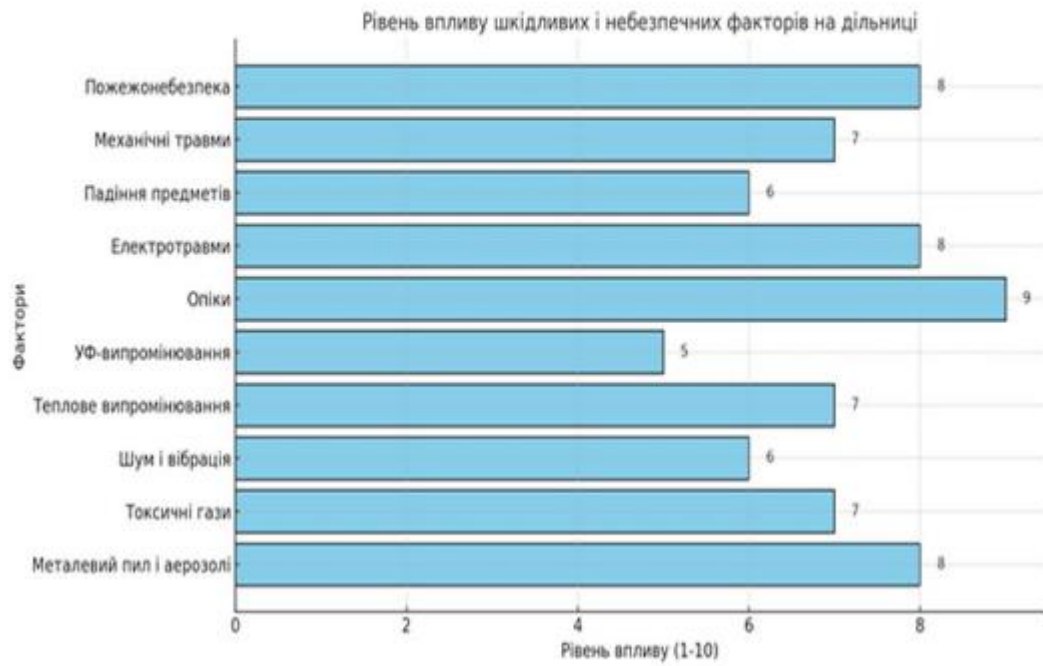
Результати експериментальних досліджень



Порівняння сумарної інтенсивності зношування для пари тертя зразок (20X + покриття 65Г) - диск (алюмінієва бронза Бр. ОЦС 4-4-425)



Порівняння сумарної інтенсивності зношування для пари тертя зразок (20X + покриття Св 08) - диск (алюмінієва бронза Бр. ОЦС 4-4-425)



| № | Назва параметру | Величина параметру |
|---|--|--------------------|
| 1 | Вид робіт | Відновлення |
| 2 | Площа зношеної поверхні, що підлягає відновленню дм ² | 2150 |
| 3 | Заробітна плата робітників під час відновлення 1 дм ² | 3,6 |
| 4 | Вартість матеріалів для відновлення 1 дм ² | 109,7 |
| 5 | Собівартість відновлення площі 1 дм ² | 113,3 |
| 6 | Річний обсяг витрат | 2103596 |
| 7 | Річний обсяг витрат на придбання нових деталей | 3700000 |
| 8 | Річний економічний ефект | 1596405 |

Однією з основних відмов двигуна ЯМЗ в експлуатації є провертання шатунних вкладишів, доля яких становить 20...26 %, а найчастіше ця відмова відбувається на третій шатунній шийці в перший період експлуатації. Великої різниці в розподілі відмов у нових двигунів і тих, що пройшли ремонт не спостерігається.

Найбільш продуктивним та якісним способом відновлення деталей є металізація з наступним нанесенням біметалічного покриття.

Отримано математичну модель для розрахунків температурних полів під час електрошво-променевого зварювання різнорідних матеріалів з осциляцією променя (поперечні і X-подібні коливання). Розрахункові температурні поля, отримані за допомогою цієї моделі, дають змогу судити про геометрію зварних швів із точністю, достатньою для інженерних розрахунків. Ця модель може бути використана для орієнтовного підбору режимів зварювання різнорідних матеріалів.

Виконано досліді і проведено чисельне моделювання для з'ясування температурних умов реалізації режиму роботи несплавленого вольфрамового електрода з розподіленою катодною плямою.

Застосування плоско заточеного вольфрамового катода, що не плавиться, і подальша дугова обробка призводить до зменшення трудомісткості механічної обробки та економії алюмінієвої бронзи.

Оптимальне співвідношення мікротвердостей поверхонь, при якому чинник зносу має мінімальне значення, під час нанесення двошарових біметалічних покриттів відбувається ефект зміцнення сталі до мікротвердості $H_c = 2510$ МПа. Значення чинника зносу пари відновленої біметалічним двошаровим покриттям в 10,23 раз менше ніж у відновленої за базовою технологією.

Для забезпечення безпечної роботи на ділянці електродугової металізації необхідно впровадити комплекс технічних, організаційних заходів і засобів індивідуального захисту. Основними ризиками є металевий пил, токсичні гази, шум, теплове та УФ-випромінювання, а також опіки й електротравми.

Узагальнивши результати теоретичних та експериментальних досліджень, розроблено технологію відновлення КВ. Дана технологія охоплює низку операцій: від підготовки поверхні до контролю якості нанесеного покриття. Включення кожного з етапів дозволяє значно підвищити ефективність і точність відновлювальних робіт.

Запровадження цієї технології забезпечує економічну ефективність завдяки зменшенню витрат на заміну зношених деталей новими на рівні 1596405 грн.

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

МОЛОДІХ ВЧЕННЯ

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

15 листопада 2024 р.

Дніпро • 2024

УДК 621.793.7:620.178.16

Ілюкович А.С., здобувач вищої освіти СВО Магістр¹⁵, ОПІ Агроінженерія
dsau_nrm@ukr.net

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

ТРИБОТЕХНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ ВІДНОВЛЕНИХ ПАР ТЕРТЯ ШЛЯХОМ НАНЕСЕННЯ ДВОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ

Відновлення зношених пар тертя є однією з найбільш ефективних і доступних технологій продовження строку служби складових елементів машин, зокрема колінчастого вала та циліндро-поршневої групи двигуна [1]. Відновлювальні технології дозволяють значно зменшити експлуатаційні витрати на обслуговування техніки, а також підвищити її загальну ефективність. Одним із найперспективніших методів відновлення є нанесення двошарових покриттів, які забезпечують підвищену зносостійкість та покращені триботехнічні властивості контактних поверхонь. Такі покриття формуються з двох функціональних шарів: нижнього, що сприяє адгезії до основного матеріалу, та верхнього антифрикційного, який зменшує коефіцієнт тертя і захищає поверхню від інтенсивного зносу [2].

Метою дослідження є аналіз ефективності застосування двошарових покриттів для відновлення шийок колінчастого вала та циліндро-поршневої групи двигунів з метою підвищення їх триботехнічних характеристик.

Для триботехнічних випробувань проводили визначення оптимального навантаження P_{opt} (при якій коефіцієнт тертя для даної пари поверхонь мінімальний $f = f_{min}$), максимального навантаження P_{lim} (характеризує предзалирний стан). У таблиці 1 представлені результати випробувань на припрацьовуваність.

¹⁵ Науковий керівник – Толстенко О.В., кандидат технічних наук, доцент кафедри інженірингу технічних систем

Таблиця 1 – Зведена таблиця випробувань на припрацьовуваність

| основа | електрод | Режим обробки | швидкість подачі, мм/ об | P_{opt} , МПа | P_{opt} , МПа | f_{min} |
|--------|----------|---------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 20X | 65Г | 1 | 0,080 | 14 | 8 | 0,082 |
| 20X | 65Г | 2 | 0,114 | 14 | 10 | 0,071 |
| 20X | 65Г | 3 | 0,193 | 16 | 8 | 0,058 |
| 20X | 65Г | 4 | 0,260 | 12 | 7 | 0,076 |
| 20X | 08 | 1 | 0,080 | 16 | 10 | 0,071 |
| 20X | 08 | 2 | 0,114 | 14 | 8 | 0,069 |
| 20X | 08 | 3 | 0,193 | 18 | 10 | 0,064 |
| 20X | 08 | 4 | 0,260 | 14 | 8 | 0,074 |

Тривалі стаціонарні випробування по визначенню інтенсивності зношування досліджуваних поверхонь здійснювалися при оптимальних навантаженнях P_{opt} для кожної досліджуваної пари. Результати представлені на рис. 1, 2.

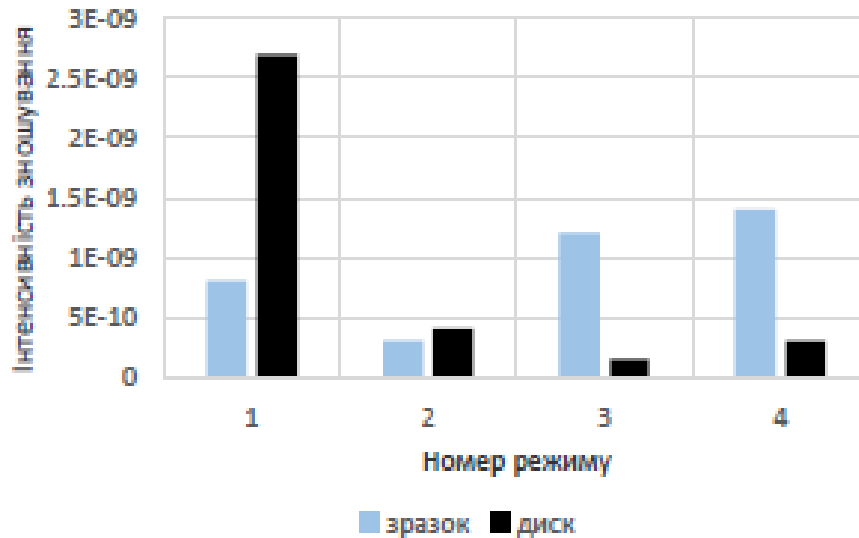


Рисунок 1 – Порівняльний графік інтенсивностей зношування зразка (20X + покриття 65Г) і диску (алюмінієва бронза Бр. ОЦС 4-4-425)

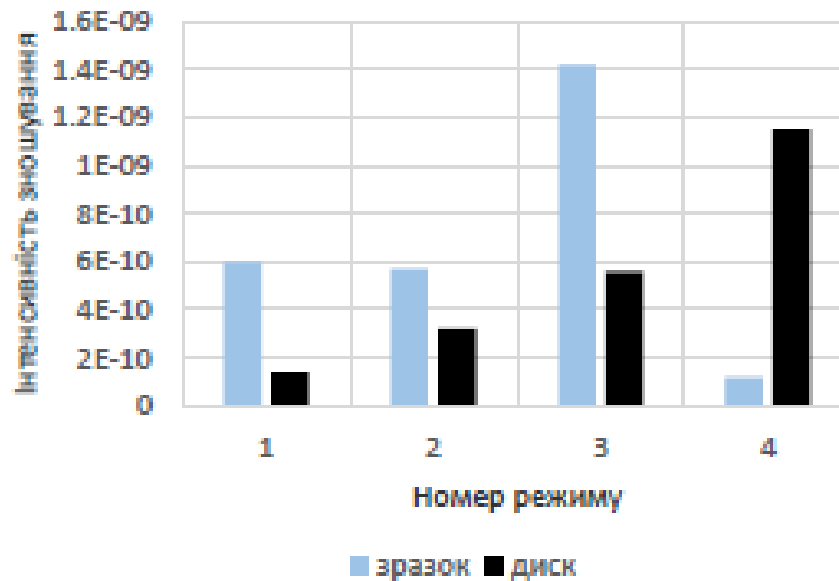


Рисунок 2 – Порівняльний графік інтенсивностей зношування зразка (20X + покриття 08) і диска (алюмінієва бронза Бр. ОЦС 4-4-425)

Варто відмітити, що для зразків, отриманих обробкою електродами зі сталі 65Г при швидкостях подачі 0,193 мм/об й 0,26 мм/об і сталь 08 при швидкостях подачі 0,08 мм/об й 0,193 мм/об, інтенсивність зношування покриття перевищує інтенсивність зношування диска.

З порівняння сумарної інтенсивності зношування (рисунок 3) випливає, що найбільшому зношуванню піддалися пари тертя, отримані обробкою електродом зі сталі 65Г у першому режимі (швидкість подачі 0,08 мм/ об) і 08 у третьому режимі (швидкість подачі 0,193 мм/об). Найменше зношування визначене для зразків, отриманих при режимах 2 (швидкість подачі 0,114 мм/об) і 1 (швидкість подачі 0,08 мм/об) для 65Г і Ст 08 відповідно.

Аналіз отриманих даних показав, що для пари тертя «покриття 65 Г-диск» визначається немонотонна залежність фактора зношування від швидкості подачі й до певної міри обернено пропорційна значенням величини макронапруг. Мінімальне значення відповідає швидкості подачі 0,114 мм/об.

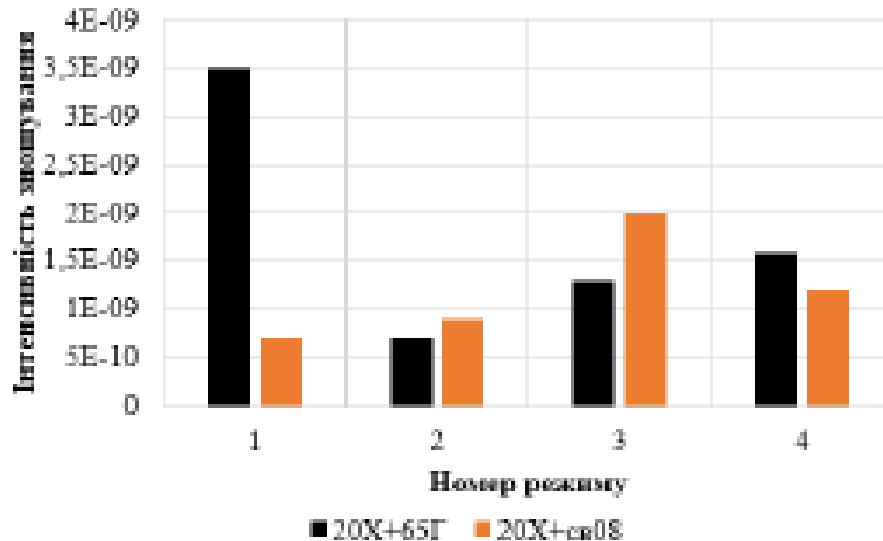


Рисунок 3 - Порівняння сумарної інтенсивності зношування для пар тертя. Для пари тертя «покриття Св 08-диск» залежність також немонотонна, але прямо пропорційна значенню величини макронапруг. Максимальне значення відповідає швидкості подачі 0,193 мм/об.

Оптимальне співвідношення мікротвердостей поверхонь, при якому чинник зносу має мінімальне значення, під час нанесення двошарових біметалічних покриттів відбувається ефект зміцненні сталі до мікротвердості $H_{\text{д}} = 2510$ МПа. Значення чинника зносу пари відновленої біметалічним двошаровим покриттям в 10,23 раз менше ніж у відновленої за базовою технологією.

Список літератури

1. Дирда В. І. Ремонт машин та обладнання. Підручник для вищих навчальних закладів [Текст] / В. І. Дирда, П. Т. Мельяцзов, О. І. Кириленко та ін. – Днівськ, Журфонд, 2015. – 292 с.
2. Армашов Ю.В. Надійність сільськогосподарської техніки: навчальний посібник / Ю.В. Армашов, П.К. Ожмат. – Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2008. – 208 с.