

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ” 2025 р.
Зав. кафедри д.т.н., професор
(науковий ступінь, вчене звання)
В.В. Дідур
(підпис) (ініціали, прізвище)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломної роботи
магістр
(освітній рівень)

тема роботи: **«Підвищення ефективності експлуатації машино-тракторного агрегату шляхом баластування та застосування здвоєних коліс на тракторі»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 22м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності Н7
«Агроінженерія»
Штефанюк Микола Михайлович
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор Дідур В.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Освітня програма магістр
Спеціальність Н7 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
В.В. Дідур
“ ” 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

студенту Штефанюку Миколі Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Проектування технологічного процесу відновлення колінчатих валів автотракторних двигунів»

керівник роботи д.т.н., професор Дідур В.В.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
«14» листопада 2025 р. № 01-06/261

2. Строк подання студентом роботи 25.11.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: способи зниження коливань машинно-тракторних агрегатів; літературні джерела; шляхи підвищення тягово-зчіпних показників колісних тракторів.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

- навести аналітичні дослідження роботи колінчатих валів автотракторних двигунів, а також досліджено основні їх відмови;
- проаналізувати основні дефекти та локалізацію їх виникнення;
- розробити математичну модель напружено-деформованого стану колінчатого валу автотракторного двигуна методом кінечних елементів;
- розробити методику та план експериментальних досліджень, а також розробити раціональний технологічний процес відновлення колінчатих валів;
- дослідити стан охорони праці та розроблено заходи по його поліпшенню;
- навести техніко-економічну оцінку роботи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 20 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломної роботи: мета і завдання дослідження; конструктивне рішення встановлення здвоєних коліс на тракторі ХТЗ-242К;

показники економічної ефективності;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		
Техніко-економічне обґрунтування	Дідур В.В., професор		

7. Дата видачі завдання 23 квітня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	30.04.2025 р.	
2.	Розділ 1.	14.05.2025 р.	
3.	Розділ 2.	28.05.2025 р.	
4.	Розділ 3.	11.06.2025 р.	
5.	Розділ 4.	25.06.2025 р.	
6.	Розділ 5.	24.09.2025 р.	
7.	Виконання ілюстративної частини роботи	23.10.2025 р.	
8.	Представлення роботи керівнику на перевірку	25.11.2025 р.	

Студент _____
(підпис)

Штефанюк М.М.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Дідур В.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на тему: «Проектування технологічного процесу відновлення колінчатих валів автотракторних двигунів»

Складається з п'яти розділів. В яких наведено аналітичні дослідження роботи колінчатих валів автотракторних двигунів, а також досліджено основні їх відмови. Також проаналізовано основні дефекти та локалізацію їх виникнення.

Розроблено математичну модель напружено-деформованого стану колінчатого валу автотракторного двигуна методом кінечних елементів.

Розроблено методику та план експериментальних досліджень, а також розроблено раціональний технологічний процес відновлення колінчатих валів.

Досліджено стан охорони праці та розроблено заходи по його поліпшенню, а також наведено техніко-економічну оцінку роботи.

Дипломна робота складається з 77 сторінок пояснювальної записки та 12 слайдів демонстраційного матеріалу.

Ключові слова: колінчатий вал, відновлення, наплавлення, моделювання, технологічний процес.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1. Дефекти колінчатих валів	9
1.1.1. Прискорене зношування шийок колінчатого вала.....	9
1.1.2. Задири на поверхнях шийок колінчатого вала	10
1.1.3. Прискорене зношування поверхонь під півкільця осевого зсуву колінчатого вала	10
1.1.4. Подряпини на поверхнях шийок колінчатого вала.....	11
1.1.5. Биття, прогин колінчатого вала	12
1.1.6. Відхилення шийок від розміру	12
1.1.7. Тріщини колінчатого вала.....	12
1.2. Сучасні наплавочні матеріали й технології відновлення колінчатих валів.....	22
1.3 Основні завдання, які розв’язуються при відновленні колінчатих валів.....	27
1.4. Постановка основних завдань роботи	30
2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	32
2.1 Використання методу кінцевих елементів і прогнозування місць руйнування в колінчатих валах.....	32
2.2 Висновки.....	39
3 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	40
3.1 Загальна методика дослідження.....	40
3.1.1. Наплавочне устаткування.....	41
3.1.2. Матеріали та зразки	42
3.2. Дослідження стану ремонтного фонду та утворення тріщин в колінчатих валах	44
3.3. Дослідження розподілу температури при нанесенні наплавочного металопокриття	53

3.4. Дослідження мікротвердості.....	54
3.5. Дослідження макро і мікроструктури.....	57
3.6. Розробка плану операцій раціонального технологічного процесу	60
3.7. Висновки.....	64
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	66
4.1 Загальні відомості про охорону праці на підприємстві.....	66
4.2. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів на дільниці з відновлення деталей зварюванням та наплавленням	67
4.3. Заходи по забезпеченню захисту працівників від дії шкідливих та небезпечних факторів.....	67
4.4. Дії у разі настання надзвичайної ситуації.....	72
4.5. Висновок.....	72
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	74
5.1. Висовок.....	76
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	77
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	79
ДОДАТКИ	Ошибка! Закладка не определена.

ВСТУП

Серед елементів автомобільних і тракторних двигунів колінчастий вал належить до найбільш відповідальних і дорогих деталей. За вартістю він поступається лише блоку циліндрів, особливо у великих дизельних двигунах вантажного та сільськогосподарського призначення [1, 2]. За статистикою, до 70 % загальних витрат на ремонт техніки припадає на закупівлю нових запасних частин, що замінюють зношені. При цьому понад 80 % деталей мають граничний знос, який не перевищує 0,3 мм, зберігаючи залишковий ресурс понад 60 %. Лише близько 20 % деталей автомобілів і тракторів підлягають остаточному списанню, решта ж може бути успішно відновлена. Вартість відновлювальних

робіт становить усього 15...70 % від собівартості виготовлення нової деталі [2, 3, 4].

Актуальність теми. Для малогабаритних двигунів доцільно використовувати заміну колінчастих валів на нові, проте для потужних агрегатів економічно виправданим є застосування технологій відновлення. Це забезпечує значну економію металу, зменшення матеріальних витрат та оптимізацію використання трудових ресурсів. Разом із тим існують складнощі технологічного характеру, зокрема пов'язані з базуванням та особливостями механічної обробки відновлених поверхонь. У цьому контексті підвищення технологічного рівня процесу відновлення на основі комплексного дослідження операцій металопокриття та подальшої механічної обробки є важливою науково-практичною задачею.

Під якістю відновленого колінчастого вала розуміють наближення його характеристик до параметрів нової деталі. Це досягається шляхом мінімізації дефектів, правильного добору зносостійких наплавочних матеріалів, оптимізації режимів нанесення та механічної обробки покриття. Визначальними є властивості робочих поверхонь шийок та галтелей, які виконують роль концентраторів напружень [5].

У практиці ремонту найбільш поширеним методом є електродугове наплавлення під шаром флюсу. Зарубіжні технології мають низку відмінностей від вітчизняних: передбачають використання різних наплавочних матеріалів для галтелей і шийок, складнішу кінематику руху пальника, застосування режиму середнього відпуску для підвищення твердості поверхонь, а також ретельний контроль дефектності деталей та обов'язковий попередній підігрів. Це підкреслює необхідність поглибленого аналізу фізичних і технологічних процесів, що визначають ефективність та надійність відновлення колінчастих валів.

Мета – проектування технологічного процесу відновлення колінчастих валів автотракторних двигунів та підвищення їх довговічності на основі аналізу напружено-деформованого стану і вдосконалення технологічних методів

відновлення.

Об'єкт дослідження – технологічний процес відновлення колінчастого вала дизельного двигуна *Deutz TCD 2012*, виготовленого зі сталі 42ХМФА згідно з ТУ 14-1-1296-75.

Предмет дослідження – закономірності фізичних процесів, що відбуваються під час експлуатації колінчастого вала та при реалізації технологічних операцій його відновлення у великогабаритних дизельних двигунах.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Дефекти колінчатих валів

Колінчастий вал є однією з найбільш відповідальних і навантажених деталей двигуна, яка водночас належить до найдорожчих. Під час роботи він функціонує в складних умовах: на нього діють ударно-динамічні навантаження, сили тертя, крутильні коливання та вібрації, невідновлені моменти, підвищені температури, а також статичні навантаження від з'єднаних деталей. Усі похибки складання двигуна насамперед відображаються саме на ресурсі колінчастого вала. Попри це, за умови високої якості виготовлення й правильного складання вузлів двигуна, дана деталь може працювати тривалий час, демонструючи закладений виробником запас міцності та надійності, що особливо важливо для дизельних двигунів будівельної та сільськогосподарської техніки.

Перед встановленням колінчастого вала в двигун обов'язковою є його попередня перевірка, незалежно від того, чи йдеться про нову деталь, чи про відновлену. Таку операцію здійснюють на ремонтних підприємствах, у шліфувальних майстернях або на заводах-виробниках. Навіть нові колінчасті вали, хоча й рідко, але можуть мати виробничі дефекти, тоді як у відновлених деталях ймовірність виявлення відхилень значно вища [6].

1.1.1. Прискорене зношування шийок колінчастого вала

Передчасне зношування шийок колінчастого вала найчастіше спричинене дефектами або неточностями блоку циліндрів. Тому одним із першочергових завдань є перевірка геометрії посадкових місць під підшипники. Якщо вона порушена, колінчастий вал може мати люфт у постелі блоку, що зумовлює різке збільшення навантажень і, відповідно, прискорене зношування робочих поверхонь.

Іншою поширеною причиною, яка набула особливої актуальності останнім часом, є використання неякісного матеріалу під час виготовлення колінчастих валів. На ринку представлено чимало недорогих деталей іноземного виробництва, серед яких трапляються як продукція високої якості, так і відверті

підробки. При застосуванні високоміцного чавуну експлуатаційний ресурс вала практично не відрізняється від стандартного.

Так, компанія **BLAT** виготовляє колінчасті вали виключно з чавуну типу ВЧ, і багаторічна практика довела їхню надійність та довговічність. Натомість у випадках використання більш м'якого сірого чавуну або сталі без загартування струмом високої частоти спостерігається значне зменшення ресурсу вала та скорочення міжремонтних інтервалів.

1.1.2. Задири на поверхнях шийок колінчатого вала

Поява задирів на шийках колінчастого вала у більшості випадків обумовлена незадовільним станом системи мащення дизельного двигуна. До причин цього явища можна віднести використання неякісного мастильного матеріалу, недотримання регламенту його заміни, засмічення масляного фільтра або недостатній тиск у системі.

Крім того, задири можуть виникати через порушення роботи системи охолодження та перегрівання двигуна, адже підвищена температура знижує в'язкість масла, погіршуючи його захисні властивості. Додатковим фактором є надмірне зношування поршневих кілець, що спричиняє потрапляння залишків палива та продуктів згоряння в мастильну систему, внаслідок чого масло розріджується та втрачає ефективність.

У разі виникнення таких дефектів зазвичай проводять шліфування шийок колінчастого вала та заміну вкладишів. Паралельно необхідно виконати перевірку системи мащення, охолодження й живлення двигуна, замінити фільтрувальні елементи, прочистити масляні канали, а за потреби – здійснити заміну поршневих кілець. Значний обсяг супутніх операцій часто робить доцільним виконання повного капітального ремонту дизельного двигуна.

1.1.3. Прискорене зношування поверхонь під півкільця осьового зсуву колінчатого вала

Подібні дефекти зустрічаються значно рідше, ніж подряпини, задири чи тріщини. Найбільш поширеною причиною їх виникнення є несправність привода

вимикання зчеплення, яка зазвичай спричинена неправильною експлуатацією з боку водія. У випадку появи такої несправності необхідно виконати заміну півкільця осевого зсуву та провести ремонт привода зчеплення. Важливо приділяти увагу дотриманню правил експлуатації для попередження подібних відмов.

Зазвичай півкільця осевого зсуву вилучаються разом із комплектом корінних вкладишів, оскільки вони входять до його складу. Виняток становлять двигуни типу ЯМЗ і КамАЗ, для яких півкільця осевого зсуву реалізуються як окремі запасні частини.

1.1.4. Подряпини на поверхнях шийок колінчатого вала

Цей тип пошкоджень зустрічається досить часто. Важливо відрізнити подряпини на шийках колінчатого вала від втомних тріщин. При огляді під лупою дно подряпини має світлий колір і добре проглядається, тоді як тріщина виглядає темною (чорною) і залишається непомітною в глибині. Під час полірування подряпини поступово зникають, тоді як тріщини залишаються незмінними. Як правило, подряпини з'являються безпосередньо на поверхні шийок, тоді як тріщини часто переходять і на галтелі. За формою подряпини зазвичай плавні, тоді як тріщини мають ламаний і нерівний контур.

Невеликі подряпини є природним наслідком тривалої експлуатації двигуна. Вони також можуть виникати при потраплянні сторонніх частинок у мастильну систему або під час транспортування деталей. У разі незначних пошкоджень зазвичай достатньо полірування робочих поверхонь шийок.

Якщо ж глибина подряпини перевищує 3–5 мкм, необхідно провести шліфування всіх відповідних шийок (корінних або шатунних) на наступний ремонтний розмір. При цьому обов'язково слід перевірити геометрію всіх шийок колінчатого вала, виконати заміри у двох площинах, а також проконтролювати поверхні шатунів на відсутність еліпсності та конусності. Після відновлення необхідно замінити моторне масло й масляний фільтр.

1.1.5. Биття, прогин колінчатого вала

Прогин колінчастого вала найчастіше спостерігається у довгих валах, що застосовуються в комбайнах та будівельній техніці. Особливо схильні до деформації вали рядних двигунів із великою кількістю циліндрів. Крім того, ймовірність виникнення вигину значно зростає у випадках використання неякісних або надмірно м'яких матеріалів для виготовлення вала.

Процедура контролю наявності прогину є відносно простою. Для цього колінчастий вал розміщують на призмах, установлених на рівній масивній металевій плиті. Повертаючи вал, за допомогою індикатора вимірюють відхилення осі. Допустимим вважається прогин до 0,05 мм, що визначається з урахуванням габаритів деталі. Якщо ж відхилення перевищує допустиме значення, виконується операція випрямлення колінчастого вала.

1.1.6. Відхилення шийок від розміру

Поступове зношування шийок колінчастого вала є природним явищем у процесі тривалої експлуатації двигуна. При його встановленні існують чітко визначені вимоги до розмірних параметрів, які можуть відрізнятися залежно від конструктивного типу вала. У середньому для нових колінчастих валів допустиме відхилення становить не більше 0,02 мм. Під час ремонту двигуна допускається знос шийок до 0,05 мм.

Якщо ж відхилення розмірів перевищує зазначене значення, вал обов'язково підлягає шліфуванню до наступного ремонтного розміру. Така операція дозволяє відновити працездатність деталі та забезпечити необхідну точність посадочних поверхонь.

1.1.7. Тріщини колінчатого вала

Тріщина колінчастого вала є найбільш небезпечним видом пошкоджень, оскільки вона неминуче призводить до швидкого втомного руйнування, яке виводить з ладу суміжні вузли та деталі двигуна. Наявність тріщини будь-яких розмірів і в будь-якому місці робить подальшу експлуатацію колінчастого вала неприпустимою – така деталь ремонту не підлягає.

Для виявлення тріщин застосовують ретельний візуальний огляд у поєднанні зі спеціальними методами діагностики. Один із них – проливання поверхонь шийок суспензією дрібнодисперсного металевого пилю в гасі або дизельному паливі. Частинки осідають у западинах та уздовж силових ліній магнітного поля деталі, після чого поверхню висушують і розглядають під збільшенням. Подряпини при цьому мають світле дно й плавний контур, тоді як тріщини заповнені брудом, не мають видимого дна і характеризуються ламаною, різко змінною лінією.

Окрім цього, застосовуються й інші методи контролю. Магнітна дефектоскопія дозволяє виявляти тріщини, однак вона має суттєвий недолік: після процедури неможливо повністю розмагнітити вал, і залишкове магнітне поле з часом притягує металеві частинки з мастила, що скорочує його ресурс. Кольорова дефектоскопія є безпечнішою і добре підходить для локалізації зон, які потребують детального візуального аналізу. Ультразвуковий метод забезпечує високу надійність і не завдає шкоди деталі, але є значно дорожчим. Його основна перевага полягає у виявленні внутрішніх дефектів лиття або прокату, хоча для колінчастих валів такі відхилення зустрічаються вкрай рідко — менш ніж у 0,01 % випадків.

Незважаючи на те, що деякі ремонтні підприємства пропонують «усунути» тріщини колінчастого вала, робити цього категорично не можна. Тріснутий колінчастий вал у жодному випадку не підлягає відновленню і має бути замінений.

Таблиця 1.1 - Дефекти колінчатих валів і способи їх усунення

Дефекти	Способи усунення
Зношування корінної й шатунної шийки. Овальність і конусність шийки. Задири, тріщини й вм'ятини, на шейку	Див. табл. 1.2
Зношування посадкових місць під роз- подільну шестірню, шків і маховик	1. Наплавлення з наступним обточу- ванням і шліфуванням. 2. Електродугове наплавлення з на- ступним шліфуванням
Зношування маслосгінного різьблення	Поглиблення різьблення різцем і шліфування шийки до виведення слідів зношування
Зношування й розбивка канавки шпонки	1. Фрезерування під збільшений ро- змір шпонки. 2. Фрезерування нової канавки шпо- нки. 3. Наплавлення з наступним фрезеруванням канавки шпонки.
Зношування посадкового місця зовніш- нього кільця шарикопідшипника в торці вала	1. Розточування посадкового місця, запресування втулки, з наступним розточуванням. 2. Електродугове наплавлення з на- ступним шліфуванням 3. Наплавлення з наступним розто- чуванням
Зношування отворів під штифти кріп- лення маховика	Розгортання під ремонтний розмір

Дефекти	Способи усунення
Зношування різьблення. Зрив більш двох ниток різьблення	1. Розточування або зенкування з наступним нарізуванням різьблення збільшеного розміру. 2. Поглиблення різьбових отворів з наступним нарізуванням такого ж різьблення під продовжені болти (пробка)
Скручування вала (порушення розмі -щення кривошипів)	1. Шліфування шийки під ремонт- ний розмір з наступним балансуван- ням. 2. Наплавлення шийки з наступним обточуванням і балансуванням
Торцеве биття маточини маховика	Підрізування торця маточини на то- карському верстаті з наступним ба- лансуванням
Вигин вала:	1. Шліфування під ремонтний розмір 2. Виправлення під пресом
Тріщини: 1. на шийках 2. на щоках	1. Шліфування під ремонтний розмір 2. Наплавлення з наступним обточуванням і шліфуванням під нормаль- ний розмір. Вибракування. (для кільцевої тріщини й тріщини, яка ви- ходить на галтель). 3. Шліфування з наступним балансуванням. Вибракування для тріщини глибиною більше 4 мм).
Корозія поверхні тертя	Зачищення шкуркою, шліфування й полірування.

Дефекти	Способи усунення
Забивання масляних каналів продуктами зношування й згустками масла	Прочищення металевим шомполом або йоржем з наступним промиванням (виваренням) і продувкою стисненим повітрям.

Таблиця 1.2 – Основні способи ремонту й відновлення шийки колінчатих валів

Способи ремонту й відновлення	Можливість відновлення радіусів, галтелей	Можливість шліфування під ремонтний розмір
Шліфування під ремонтний розмір	є	є
Обдирання з наступним установленням (приварюванням) напіввтулки	немає	—
Хромування	—	немає
Залізнення з наступним хромуванням	—	—
Електрометалізація	немає	обмежена
Ручне електродугове наплавлення	є	є
Автоматичне електровібраційне наплавлення в струмені рідини	немає	—
Механізоване електродугове наплавлення під шаром флюсу з наступною високотемпературною відпусткою й загартуванням струмом високої частоти	є	—
Автоматичне наплавлення в середовищі вуглекислого газу	немає	є
Механізоване електродугове наплавлення під шаром флюсу, леговане	є	—

Способи ремонту й відновлення	Можливість відновлення радіусів, галтелей	Можливість шліфування під ремонтний розмір
графітом		
Механізоване електродугове наплав- лення під шаром флюсу, леговане гра- фітом і ферохромом	—	—
Механізоване електродугове наплав- лення	—	—
Наплавлення плазмовою дугою	—	—

Примітка:

- співвідношення твердості відновленої шийки колінчастого вала порівняно з твердістю шийки нового вала;
- співвідношення границі втомної міцності на кручення відновленого колінчастого вала відносно границі втомної міцності нового вала.

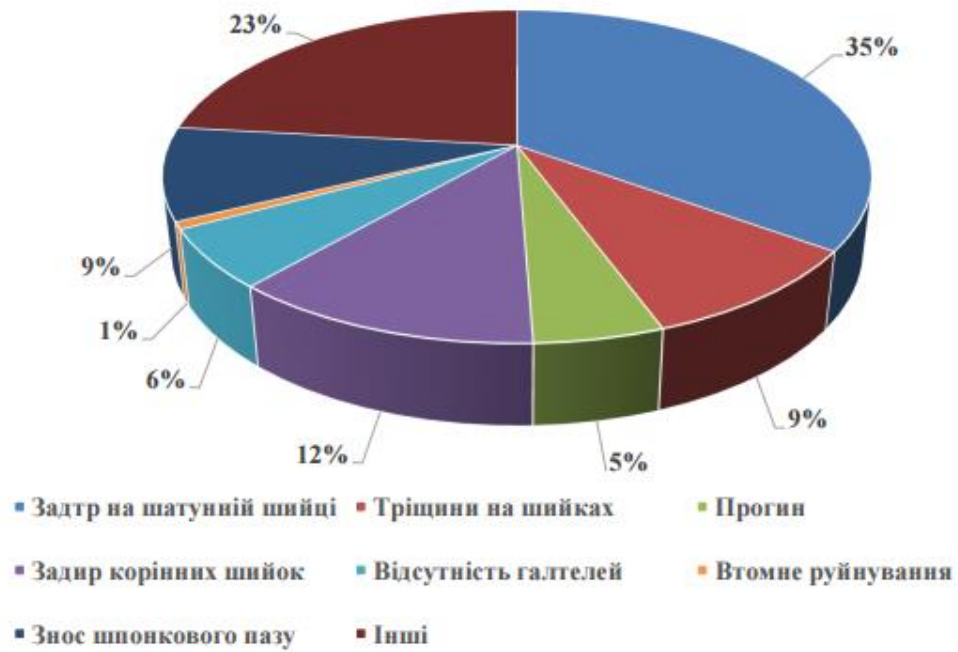


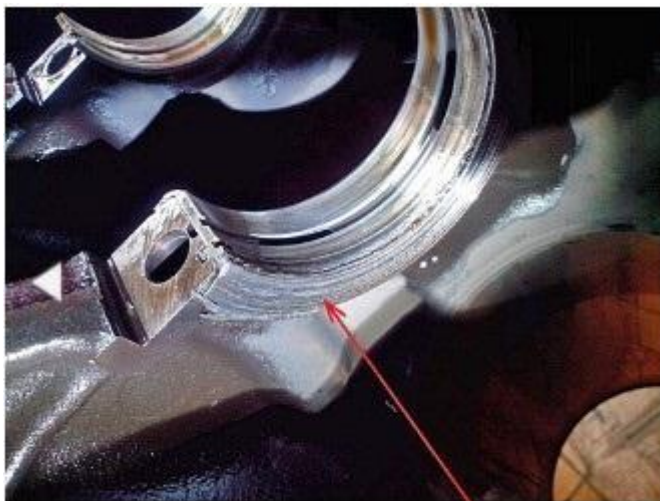
Рисунок 1.1 – Дефекти колінчатих валів



Рисунок 1.2 – Руйнування частини щоби валу



Рисунок 1.3 – Перезняття бабітового шару вкладишів на шийку валу



Задир упорного підшипника



Задир упорної поверхні вала

Рисунок 1.4 – Задири упорних поверхонь



Рисунок 1.5 – Знос шатунної шийки V подібного двигуна

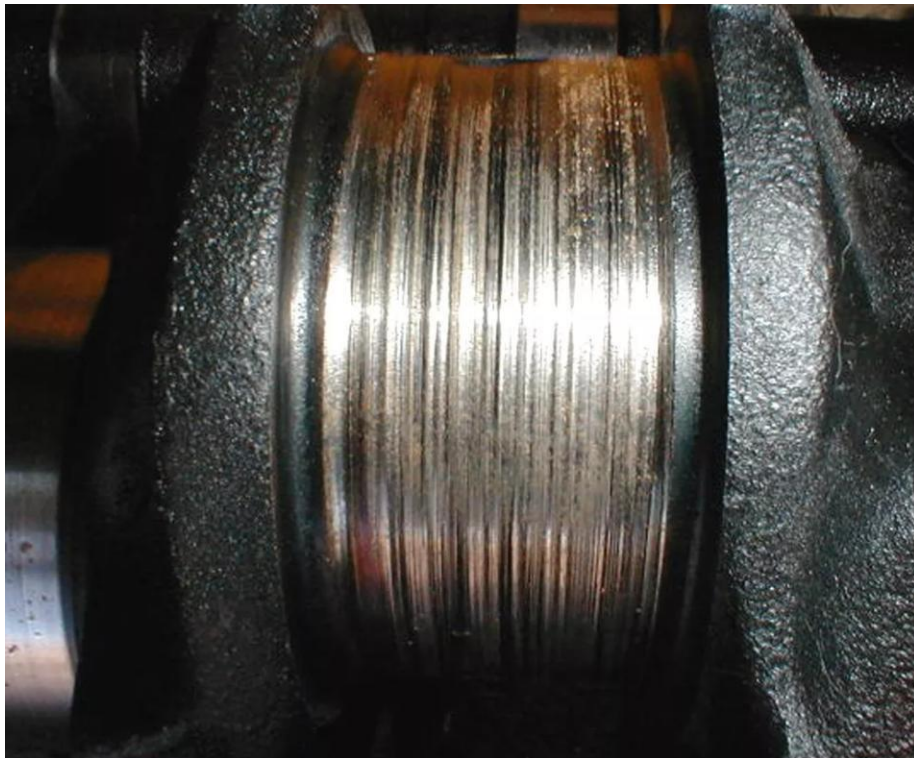


Рисунок 1.6 – Задир шийки вала



Рисунок 1.7 – Знос шпонкового пазу



Рисунок 1.8 – Приварювання вкладиша до шийки внаслідок проворачування валу



Рисунок 1.9 – Руйнування колінчатого валу

1.2. Сучасні наплавочні матеріали й технології відновлення колінчатих валів

Як зазначалося раніше, відновленням колінчастих валів займаються численні компанії у всьому світі. Сучасна концепція передбачає універсалізацію ремонтних підприємств, які повинні забезпечувати виконання широкого спектра робіт у стислі терміни та за помірною вартістю.

Одним із провідних постачальників обладнання та матеріалів на світовому ринку є компанія «Gleason Engineering Industries, Inc.».

Надійність відремонтованих машин значною мірою визначається стабільністю ресурсу відновлених деталей, що безпосередньо залежить від правильно обраного способу ремонту та суворого дотримання технологічного процесу [7].

У промисловості для індукційно-загартованих поверхонь шийок колінчастих валів прийнято застосовувати твердість у межах 50...55 HRC на глибині до 0,05 дюйма. При цьому зона радіуса галтелі зазвичай не піддається загартуванню. Окремі виробники, навпаки, зміцнюють і радіуси галтелей, що робить вали менш пластичними та підвищує ризик розвитку втомних тріщин. За аналогією з вітчизняними технологіями, в таких випадках загартуванню піддаються також внутрішні поверхні щік.

Технологія «Глісон-Процес» (компанія *Hillcrest Camshaft Service, Inc.*, США) [8]:

У даному варіанті відновлюються колінчасті вали дизельних двигунів довжиною до 120 дюймів (понад 3 м). Основні етапи:

- очищення вала зануренням у мийний розчин і промивання масляних каналів під тиском;
- повна дефектоскопія з використанням магнітних часток;
- визначення твердості за шкалою Роквелла двома методами;
- попередній підігрів і виправлення для зняття внутрішніх напружень;
- шліфування пошкоджених шийок перед наплавленням;
- перевірка наявності азотованого шару;
- наплавлення галтелей дротом із твердістю близько 30 HRC;
- відновлення корінних та шатунних шийок дротом, що забезпечує твердість покриття 47...50 HRC;
- правка колінчастого вала перед чорновим шліфуванням;
- чорнове шліфування та повторна магнітна дефектоскопія;
- термічна обробка для зняття напружень у печі при контрольованих параметрах;
- остаточне шліфування, третинна дефектоскопія й розмагнічування;
- полірування до нормативної шорсткості;
- пакування готових валів у дерев'яні ящики.

Технологія компанії **Azspa Machine Tools** (Італія) [9]:

Схема процесу (рис. 1.10) включає: очищення → магнітна дефектоскопія → у разі відсутності тріщин: правка на пресі → якщо є припуск: шліфування → балансування → при відсутності припуску: наплавлення → термообробка (максимально 450 °C) → виправлення на пресі → шліфування → балансування.

Лазерні технології (**Technolaser**) [10]:

Фірма розробляє методи лазерного наплавлення для промисловості та медицини. Наводяться приклади відновлення корінних шийок колінчастих валів малопотужних компресорів, а також можливість застосування для автомобільних валів.

Українські розробки [11]:

В окремих підприємствах застосовують технологію контактної приварки попередньо спеченої твердосплавної стрічки до шийок колінчастих валів, що є перспективним напрямом локального зміцнення.

Газотермічне напилювання («*Технологічні системи захисних покриттів*») [12]:

Методика застосовується для відновлення робочих поверхонь колінчастих валів, бабітових підшипників, штоків та плунжерів насосно-компресорного обладнання, гідравлічних систем, корпусів електродвигунів. Перевагою є низька температура процесу (не більше 120 °C), що виключає термічні деформації, а також можливість локального відновлення та широке застосування різних матеріалів, що перевищує за технологічними можливостями гальванічні методи.

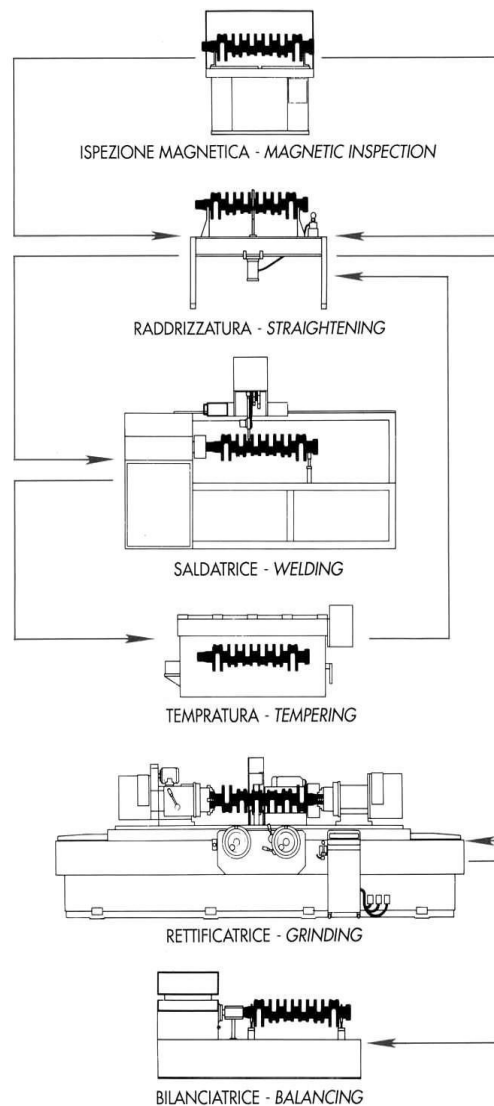


Рисунок 1.10 – Схема технологічного процесу відновлення колінчатого вала від компанії «Azspa» [13]

Загальним недоліком газотермічних покриттів, отриманих традиційними методами – електродуговим чи газополуменевим дрововим напилюванням – є відносно низька адгезійна міцність. Крім того, використання суцільних дровів під час нанесення покриття забезпечує лише помірні показники твердості. Значно кращими характеристиками відзначаються плазмові та детонаційні порошкові покриття, проте обладнання для їх нанесення відзначається високою складністю й вартістю.

Метод детонаційного напилювання також має низку обмежень: низьку продуктивність, потребу у дорогому спеціальному устаткуванні, а сам процес вважається екологічно небезпечним через високий рівень шуму, утворення пилу та аерозолів металів. Крім того, дослідження довели, що при товщині детонаційного покриття понад 0,7 – 0,8 мм спостерігається його розтріскування.

Певні переваги має газополуменеве «холодне» шнурове напилювання [14]. До них належать: вищий коефіцієнт використання матеріалу, поліпшення адгезійних і когезійних властивостей покриття, зменшення його пористості, а також можливість механізації та автоматизації процесу. Даний метод може здійснюватися як у звуковому, так і в надзвуковому режимі швидкості нанесення частинок. Важливою особливістю є можливість формування стискаючих залишкових напружень у покритті при використанні деяких видів шнурових матеріалів. Однак отримані таким способом покриття за твердістю поступаються іншим методам.

У сучасній зарубіжній практиці активно застосовується лазерне відновлення прецизійних деталей (рис. 1.11). Даний метод використовується там, де необхідні висока твердість і зносостійкість поверхні, надійність та довговічність, зокрема й для колінчастих валів. На відміну від газотермічного напилювання, лазерне наплавлення формує суцільний монолітний шар, який має металургійний зв'язок з основним матеріалом. Економічний ефект є суттєвим: наприклад, відновлення одного колінчастого вала дизеля **M756** у локомотивному депо дає економію близько 2500 доларів США [15].

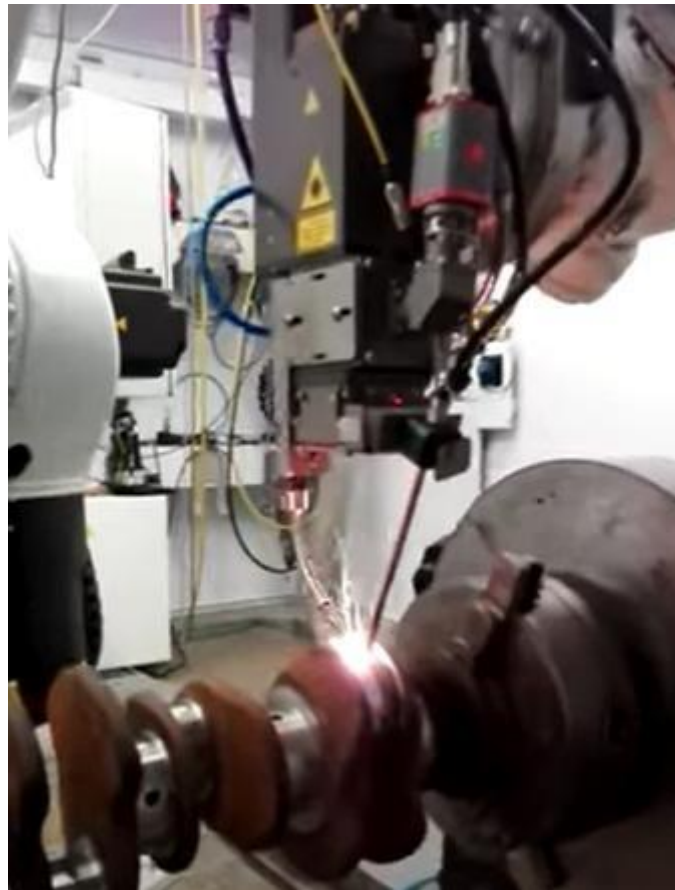


Рисунок 1.11 – Відновлення колінчатого вала дизеля лазерним наплавленням

У світовій практиці застосовуються різні технологічні методи відновлення колінчастих валів дизельних двигунів.

1. При зношуванні шатунних та корінних шийок використовується електродугове наплавлення електродами типу Нп-30ХГСА або плазмодугове наплавлення порошковим матеріалом ПХ20Н80 1,5 [16].

2. Якщо пошкоджені робочі поверхні під шків чи зубчасті колеса, тоді застосовують напівавтоматичне наплавлення у середовищі CO_2 з використанням дроту Св-18ХГСА. У деяких випадках виконується також газополуменеве напилення. Такі покриття характеризуються адгезійною міцністю близько 30 МПа та твердістю до 35 HRC. Відновлення шатунних і корінних шийок зазвичай здійснюється методом напилення з подальшим шліфуванням до необхідного розміру. Цей спосіб ефективно використовується для колінчастих валів дизелів тепловозів, морських двигунів, вантажних автомобілів. Водночас ремонт колінчастих валів легкових автомобілів у більшості випадків економічно недоцільний.

1.3 Основні завдання, які розв'язуються при відновленні колінчатих валів

Найбільш ефективне використання ресурсу двигуна, закладеного під час його проєктування та виготовлення, можливе лише за умов правильної експлуатації та своєчасного якісного ремонту (рис. 1.12). Рівень надійності капітального ремонту та застосованої технології значною мірою залежить від характеру дефектів основних деталей силового агрегату, зокрема колінчастих валів [17].

У процесі роботи колінчастий вал зазнає дії радіальних і тангенціальних складових сил, що передаються на шатунні шийки, відцентрових сил від обертових мас, реакцій опор, а також моменту опору від трансмісії. Періодичний вплив цих навантажень викликає появу пружних коливань вала, серед яких найбільш небезпечними є вигинальні та крутильні. Найбільші зусилля сприймають шатунні шийки та щоки.

Основним видом пошкоджень колінчастого вала при нормальній експлуатації є зношування. Однак перевантаження, втома матеріалу та порушення умов мащення тертьових поверхонь призводять до локального нагрівання, пластичних деформацій, інтенсивного зносу, появи задирів та явища схоплювання. При тривалій дії цих факторів можливе руйнування деталі через втому металу. Значна різноманітність зовнішніх чинників, що впливають на роботу вала, обумовлює зміну швидкості зношування його поверхонь і формування різних поєднань дефектів.

Найпоширенішими пошкодженнями колінчастих валів є: злам у зоні шийок або щік (рис. 1.4, 1.5, 1.6), утворення тріщин у шийках (рис. 1.3), задирність робочих поверхонь, поява овальності корінних і шатунних шийок, дефекти вузлів з'єднання вала з насосами та розподільними валами, а також його вигин [18]. Важливим критерієм оцінки якості процесу відновлення є відсутність внутрішніх дефектів (пор, тріщин) у наплавлених або напилених покриттях на робочих ділянках вала.

Слід відзначити, що випадки руйнування колінчастих валів доволі

поширені й у світовій практиці, проте ступінь їхньої ймовірності суттєво відрізняється залежно від умов експлуатації. Прогнозування таких відмов потребує використання сучасних методів комп'ютерного моделювання з подальшою верифікацією на основі експлуатаційних даних.

Згідно з дослідженнями, понад 50% пошкоджень деталей пов'язані саме з процесами втоми матеріалу [19].



Рисунок 1.12 – Злам колінчатого вала через множинні втомлювані тріщини в області щоки



Рисунок 1.13 – Злам колінчатого вала двигуна «RABA-MAN» по щоках від дії нормальних напружень



Рисунок 1.14 – Злам шийки колінчатого вала від напружень вигину



Рисунок 1.15 – Тріщина в шийці колінчатого вала двигуна КамАЗ-740

Тріщини на шийках колінчастих валів належать до основних причин їх вибракування. За статистикою, для колінчастих валів частка таких пошкоджень становить близько 9...16 %, а у випадку деяких моделей, зокрема двигунів КамАЗ-740, цей показник може досягати 40...50 % серед деталей, що надходять у капітальний ремонт. До причин вибракування належать: тріщини на галтелях корінних і шатунних шийок; пошкодження на циліндричній частині шийок на відстані менше 6 мм від їх торців; тріщини на крайках отворів масляних каналів; наявність кількох тріщин, що розташовані ближче ніж на 10 мм одна від одної й під кутом понад 30° до осі вала; понад вісім тріщин довжиною менше 5 мм на циліндричних поверхнях і в зоні масляних каналів; а також більше трьох тріщин довжиною понад 5 мм.

Зношування робочих поверхонь колінчастого вала усувають різними методами: шляхом обробки під ремонтний розмір, установлення додаткових ремонтних деталей, використання технологій наплавлення чи напилення металу тощо. Існує значна кількість методик ремонту й відновлення колінчастих валів (рис. 1.16). При цьому вибір конкретного способу залежить від умов роботи деталі, її технічного стану та якості поверхні, масштабів виробничої програми, а також економічної доцільності проведення ремонту.

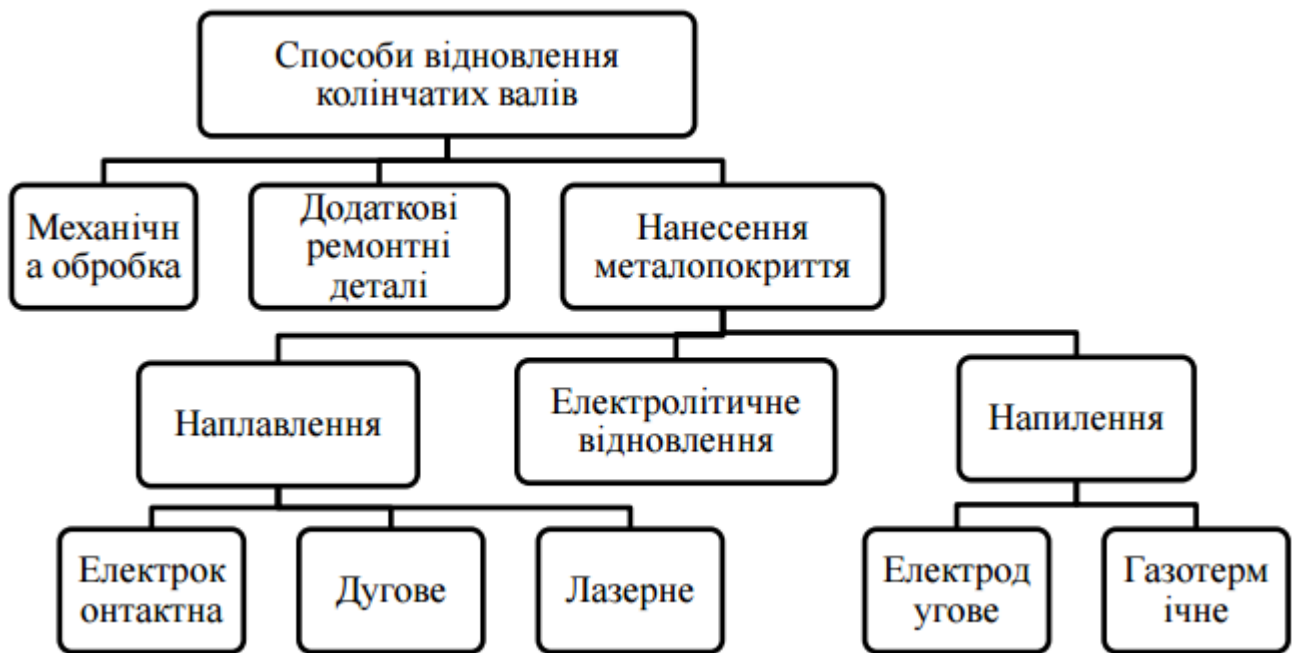


Рисунок 1.16 – Класифікація способів ремонту і відновлення кривошипів колінчатих валів дизельних двигунів

1.4. Постановка основних завдань роботи

За підсумками аналізу матеріалів першого розділу можна зробити такі висновки:

1. Колінчасті вали належать до найбільш навантажених деталей дизельних двигунів, що працюють у складних умовах.
2. Процеси ремонту та відновлення колінчастих валів є одними з найскладніших серед усіх операцій технологічних схем ремонту деталей.
3. Найбільш розповсюдженим на сьогодні методом відновлення колінчастих валів, які вичерпали запас ремонтних розмірів, є наплавлення

металопокриття під шаром флюсу.

4. Значна частина існуючих вітчизняних технологій не забезпечує необхідного ресурсу відновленої деталі кривошипного механізму й поступається зарубіжним методикам, оскільки характеристики та довговічність таких валів істотно відрізняються від нових.

5. Проведене дослідження відомих способів і технологій відновлення дозволяє зробити висновок про доцільність застосування наплавлення під шаром флюсу з використанням різних марок дроту для відновлення шийок та галтель колінчастого вала.

Відповідно до сформульованої мети визначені такі завдання дослідження:

1. Виконати аналітичний огляд причин відмов колінчастих валів, їх характерних дефектів і методів усунення.

2. Створити фізичну та математичну модель колінчастого вала для визначення напружено-деформованого стану з використанням методу кінцевих елементів і методу фотопружності, що дозволить прогнозувати місця можливого зародження руйнувань у зоні шийок.

3. Обґрунтувати оптимальний режим термічної обробки при нанесенні наплавлених покриттів на великогабаритні колінчасті вали, враховуючи специфіку розподілу температур для зменшення концентрації напружень.

4. Дослідити зміни мікротвердості металу колінчастого вала по глибині при використанні різних наплавочних матеріалів, що є основою для формування раціонального технологічного процесу відновлення та подальшої механічної обробки.

5. Встановити особливості макро та мікроструктури нанесених покриттів, провести рентгенографічний аналіз залишкових внутрішніх напружень другого роду.

6. Розробити комплекс технологічних операцій, які забезпечують високу якість відновлення великогабаритних колінчастих валів, та надати техніко-економічне обґрунтування ефективності підвищення їхнього ресурсу.

2 ТЕОРИТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Використання методу кінцевих елементів і прогнозування місць руйнування в колінчатих валах

Основним критерієм у проведенні аналізу є співпадіння характеру фактичного руйнування досліджуваного елемента з очікуваним, визначеним за результатами моделювання [20]. Об'єктом роботи виступає колінчастий вал двигуна **Deutz TCD 2012**, який був відновлений методом наплавлення під шаром флюсу АН-348А із застосуванням дроту 1,6 Нп-30ХГСА.

Після виконання операцій наплавлення та подальшого шліфування (рис. 2.1) деталь піддалася експлуатаційним випробуванням до моменту її відмови. Руйнування спостерігалось у двох місцях: у зоні четвертої кривошипної шийки з боку заднього торця, а також у ділянці суміжної щоки з боку переднього фланця вала (рис. 2.2).

Класична схема силового навантаження, що використовується для розрахунків колінчастих валів [21], подана на рис. 2.3. При проектуванні таких деталей їхні основні розміри визначають попередньо, виходячи з емпіричних залежностей, та узгоджують із конструктивними параметрами двигуна. Після створення ескізного варіанту колінчастий вал розраховують на міцність і зносостійкість, що дає змогу остаточно встановити габарити окремих його елементів.

У якості розрахункових навантажень враховуються радіальна складова **Z** та тангенціальна складова **T**, прикладена до плеча, яке дорівнює радіусу кривошипа **r**. Через складність геометричної форми деталі виконати абсолютно точні розрахунки її міцності практично неможливо [21]. Тому найчастіше застосовується спрощена методика, де колінчастий вал розглядають як плоску двоопорну раму: один її кінець спирається на рухомий шарнір, інший – на нерухомий, при цьому осьові навантаження не враховуються.

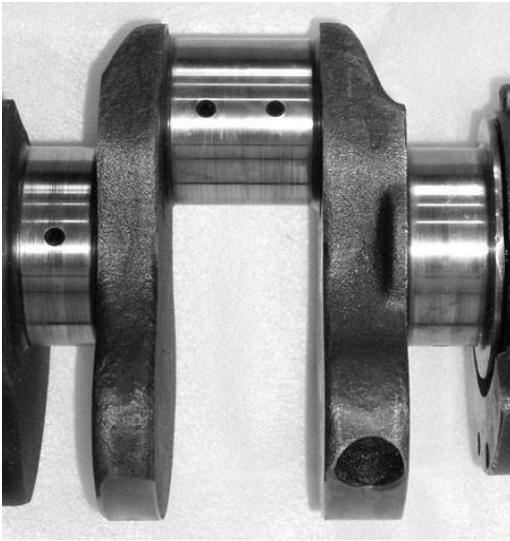


Рисунок 2.1 – Четверта кривошипна шийка колінчатого вала до руйнування

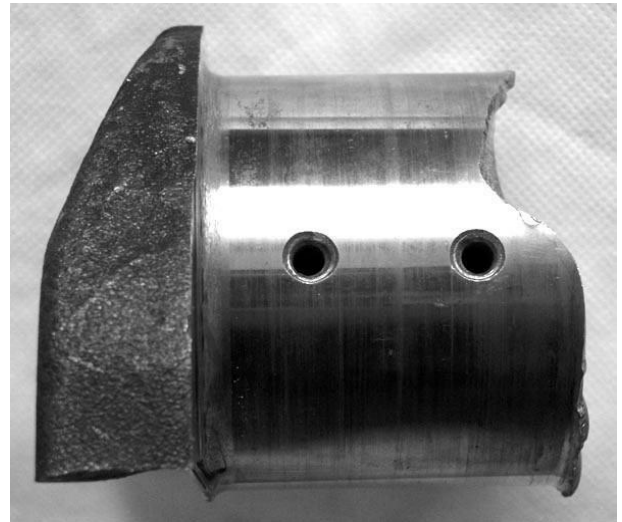


Рисунок 2.2 – Характер руйнування шийки колінчатого вала в результаті експлуатаційних випробувань

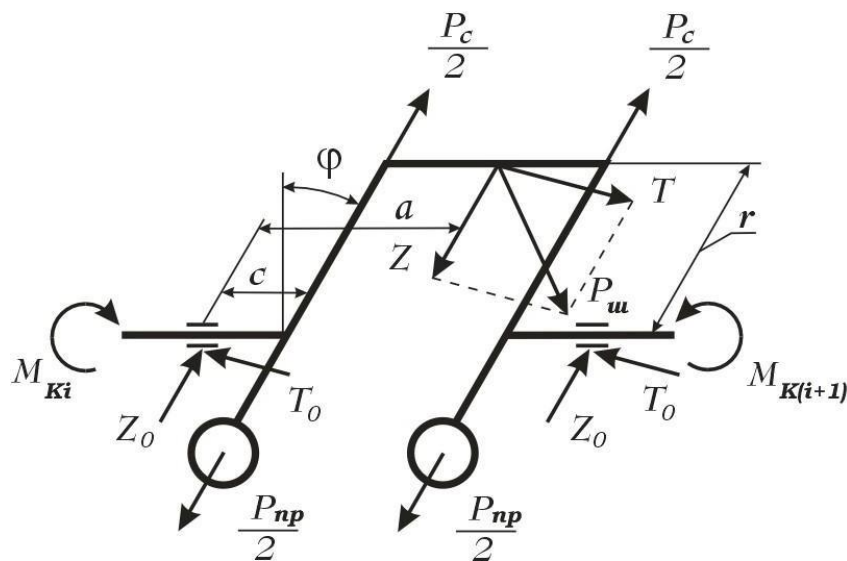


Рисунок 2.3 – Класична розрахункова схема колінчатого вала [21]

Аналіз причин руйнування колінчастих валів свідчить, що переважна більшість випадків їх поломок зумовлена явищами втоми матеріалу [22]. Результати фрактографічних досліджень, що підтверджують цей висновок, наведені на рис. 2.4 та 2.5.



Рисунок 2.4 – Макроструктура зламу в щоці: перехід із зони розвитку втомленої тріщини в зону тендітного руйнування (50:1)

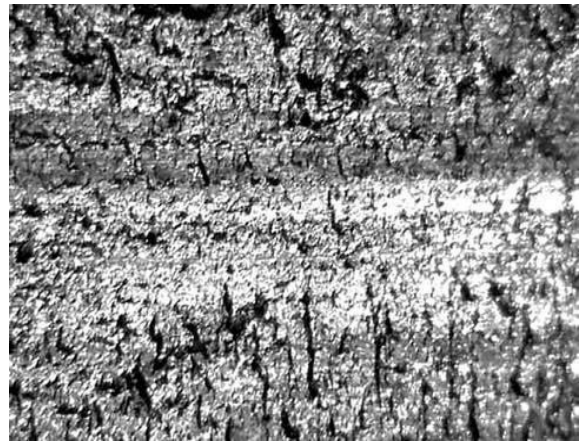


Рисунок 2.5 – Макроструктура поперечного зламу шийки: зона розвитку тріщини (50:1)

Найбільш небезпечними зонами колінчастого вала з точки зору виникнення руйнувань є ділянки з підвищеною концентрацією напружень. Дослідження показують, що у шатунних і корінних шийках критичними місцями виступають краї мастильних отворів, тоді як у щоках – області їх переходу до шийок. Практика лабораторних випробувань і результати експлуатації підтверджують, що у граничних умовах колінчасті вали зазвичай руйнуються під дією нормальних напружень, спричинених згинальними навантаженнями у площині кривошипа. Руйнування, зумовлені виключно крутильними моментами, трапляються вкрай рідко.

З теоретичної точки зору розподіл внутрішніх напружень у колінчастому валі може бути описаний за допомогою сіткових або варіаційних методів розрахунку. До останніх належить і метод кінцевих елементів. При його застосуванні було прийнято такі припущення:

- по-перше, розглядалася плоска модель, що відображає проекцію фрагмента реального колінчастого вала на площину, паралельну площині кривошипа;

- по-друге, враховувалася закономірність, наведена у формулі 2.1[21];

де $M_{зм}$ – величина згинального моменту,

Z_0 – реакція опори у площині кривошипа,
 a - відстань від опори до середини кривошипної
 шийки, $P_{пр}$ – відцентрова сила інерції від обертання
 проти ваг, P_c – відцентрова сила інерції від
 обертання кривошипа,
 c - відстань від опори до щок колінчастого вала.

У розрахунках було прийнято спрощення: сили $P_{пр}$ та P_c взаємно компенсують одна одну, тому їх впливом знехтували:

- по-перше, навантаження, яке діє на кривошипну шийку від двох шатунів, замінили рівномірно розподіленим і умовно прийняли рівним одиниці. Це припущення, відповідно до закону Гука, не впливає на співвідношення між внутрішніми напруженнями, тому загальна картина їх розподілу у деталі залишається незмінною.

- по-друге, зосереджені опори, прикладені у серединах корінних шийок, були замінені на розподілені опори з такими ж ступенями свободи, як у вихідній розрахунковій схемі (рис. 2.3).

- по-третє, враховано, що найбільше навантаження від газового тиску передається через шатун у момент, коли колінчастий вал знаходиться під кутом близько $\varphi = 15^\circ$ після верхньої мертвої точки такту стискання. Через мале значення цього кута майже вся сила $P_{ш}$ діє як поперечне навантаження на кривошипну шийку. Тангенціальна складова T у цей момент є незначною, так само як і момент T_0 , тому вплив крутних моментів M_{Ki} та $M_{K(i+1)}$ (що відповідно набігає та збігає) у розрахунках не враховувався.

Таким чином, у дослідженні була застосована двовимірна (2D) модель (рис. 2.6). Апроксимація виконувалася за допомогою трикутних кінцевих елементів. Сітка кінцево-елементного розбиття включала 194 вузли, чого виявилось достатньо для наочної візуалізації результатів (рис. 2.7).

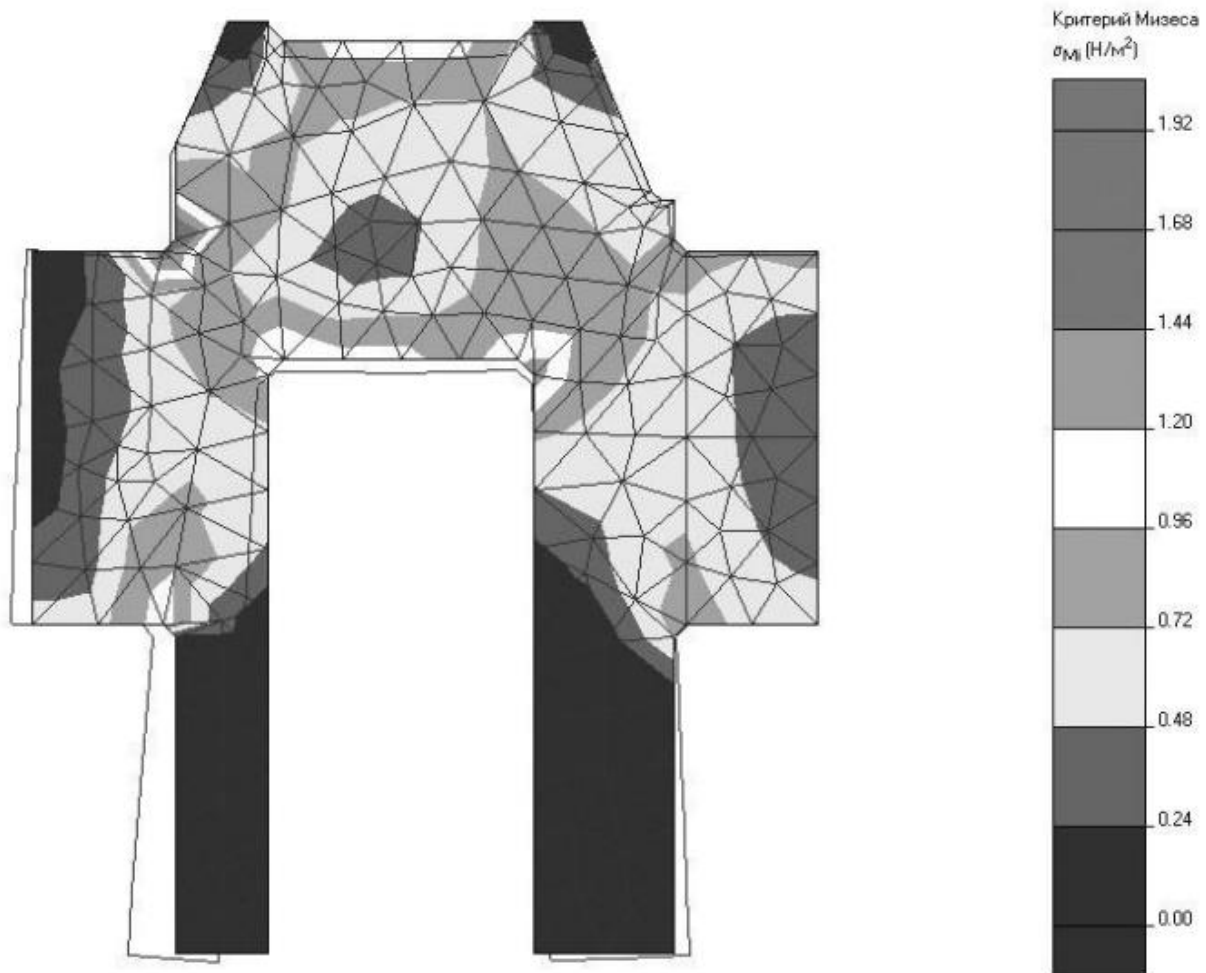


Рисунок 2.8 – Результати розрахунків

При зниженні роздільної здатності результатів розрахунків стає можливим чіткіше виділити зони, у яких концентруються підвищені напруження (рис. 2.9). Визначення таких областей має ключове значення для подальшого аналізу втомних тріщин під час діагностики технічного стану колінчастого вала як у процесі його експлуатації, так і в умовах ремонту.

З метою підвищення достовірності та відтворюваності результатів було виконано аналогічні дослідження ще у двох випадках, дані щодо яких наведені в літературних джерелах і зафіксовані документально та фотографічно, причому один із них є унікальним і має характер раритету. Отримані результати виявилися досить близькими до наведених вище, що підтверджує можливість практичного прогнозування й наочної візуалізації процесу руйнування колінчастого вала.

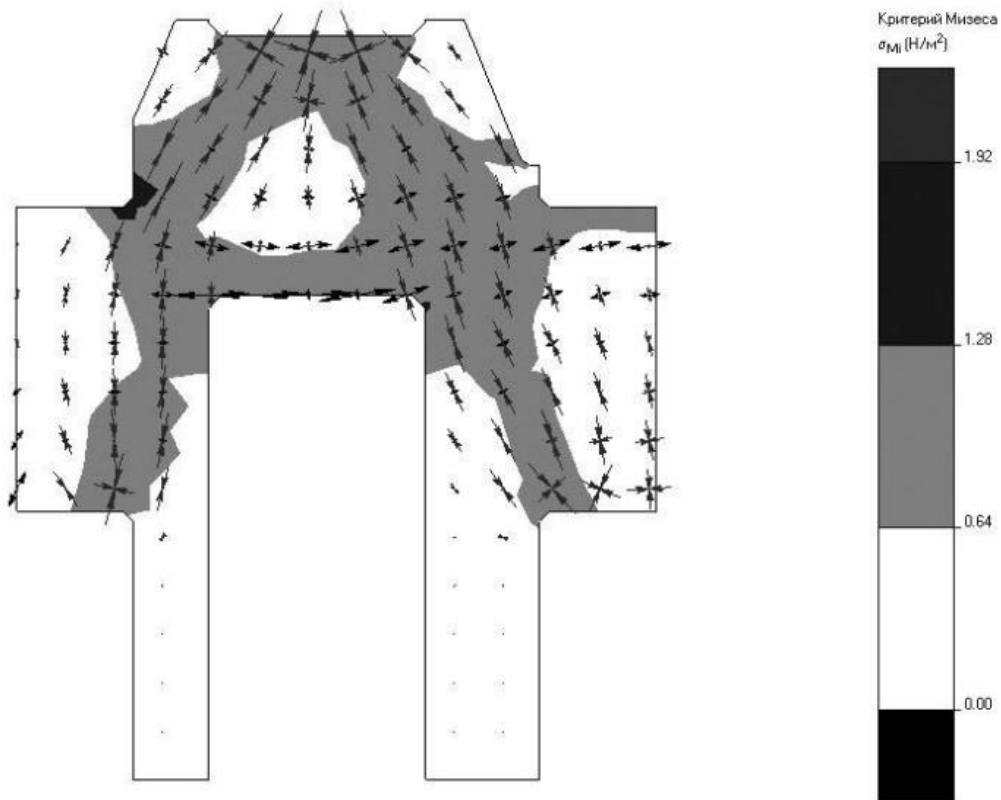


Рисунок 2.9 – Області значних напружень у кривошипі

Після виконання наплавлення доцільно проводити механічну обробку робочих поверхонь із використанням лезового різального інструменту. Схему силової взаємодії між різальним інструментом та поверхнею оброблюваної деталі наведено на рис. 2.10

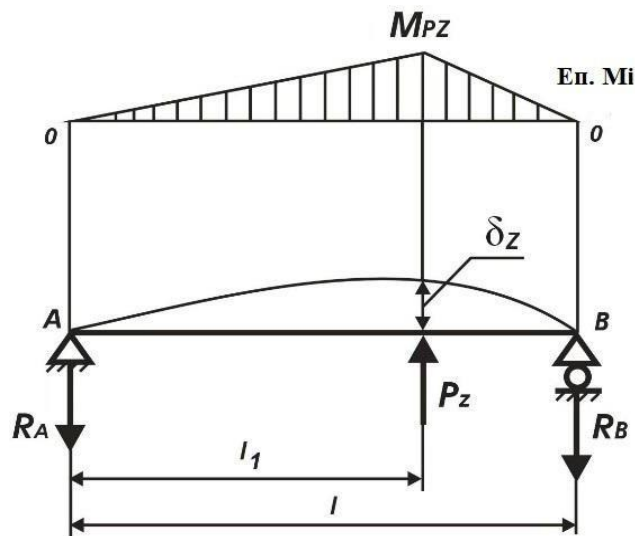


Рисунок 2.10 – Схема навантаження колінчатого вала тангенціальною силою

різання при механічній обробці

Реакції опор, що виникають під час базування деталі у верстаті, подані у формулі 2.3.

P_Z – тангенціальна сила різання;

R_B визначається за формулою 2.4.

l_1 – відстань від лівої опори до зони різання; l – довжина оброблюваної деталі.

Згинальний момент M_{PZ} , що виникає під дією тангенціальної складової сили різання P_Z , подано у формулі 2.5.

Згинальний момент M_{1Z} , який виникає під дією одиничної сили, наведено у формулі 2.6.

Максимальне значення прогину δ_Z , що виникає під дією тангенціальної складової сили різання, показано у формулі 2.7.

E – модуль Юнга; J – момент інерції перетину деталі.

2.2 Висновки

1 На основі методу кінцевих елементів створено фізичну та математичну моделі кривошипа, призначені для визначення внутрішніх напружень.

2 Побудовано двовимірну плоску модель шатунної шийки колінчастого вала Deutz TCD 2012, а також модель небезпечного перерізу з відповідною схемою його навантаження.

3 Запропоновано оригінальну розрахункову схему кривошипа у вигляді стрижневої системи, що дала змогу визначити розподіл внутрішніх зусиль у зоні перекриття шатунної та корінної шийок.

4 Отримані результати розрахунків узгоджуються зі статистичними даними щодо руйнувань реальних деталей під час експлуатації.

3 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Загальна методика дослідження

З огляду на широкий спектр чинників, що впливають на якість відновлення колінчастих валів дизельних двигунів, дана робота базувалася на використанні системного підходу до розв'язання поставлених завдань.

Загальна методика передбачала комплексне дослідження ключових факторів технологічного процесу у взаємозв'язку з основними об'єктами, якими виступають властивості відновлених поверхонь та якісні показники відновлених деталей у цілому.

Практична частина досліджень проводилася на базі підприємств Bosch service (м. Павлоград) [23] та Impulse 4 (м. Запоріжжя) [24], що співпрацюють із компанією «Альбіон».

Структура дослідження подана на рис. 3.1. Вона передбачає представлення технологічного процесу відновлення у вигляді двох взаємопов'язаних модулів: теоретичного та експериментального, причому другий ґрунтується на результатах першого. Кожен із модулів характеризується власними ключовими параметрами, тоді як кінцевий результат визначається не лише якістю технології, але й техніко-економічною ефективністю процесу.

На основі загальної методики були розроблені спеціалізовані підходи, зокрема:

- методика оцінювання стану ремонтного фонду та виявлення тріщин у колінчастих валах;
- методика дослідження температурних полів при нанесенні наплавлених покриттів;
- методика визначення внутрішніх напружень із застосуванням методу фотопружності;
- методика аналізу зміни мікротвердості;
- методика дослідження макро- та мікроструктури;
- методика рентгенографічного аналізу для вивчення напружень

другого роду й визначення параметрів кристалічних ґрат;

– методика дослідження характеристик процесів різання при механічній обробці наплавлених шарів.



Рисунок 3.1 – Загальна структура проведення досліджень

3.1.1. Наплавочне устаткування

Нанесення металопокриттів на робочі поверхні колінчастих валів дизельних двигунів виконувалося на модернізованому токарно-гвинторізному верстаті моделі 1K62, обладнаному наплавочною головкою А-580М та джерелом живлення дуги ВДУ-506 (рис. 3.2 а, б).

У якості об'єкта дослідження використовувався колінчастий вал двигуна Deutz TCD 2012, виготовлений зі сталі 42ХМФА. Хімічний склад цього матеріалу має такі характеристики: вуглець – 0,40...0,45%; кремній – 0,27...0,37%; марганець – 0,5...0,8%; ванадій – 0,08...0,12%; хром – 1,0...1,8%; молібден – 0,35...0,45%; сірка – 0,01...0,035%; фосфор – 0,025%; мідь – 0,35%; нікель – 0,3%; решта – залізо.

Відновлення проводилося методом наплавлення під флюсом АН-348А відповідно до вимог ДСТУ 9087-95. Хімічний склад флюсу характеризується такими параметрами: $\text{SiO}_2 = 41\ldots44\%$; $\text{MnO} = 34\ldots38\%$; $\text{CaO} \leq 6,5\%$; $\text{MgO} = 5\ldots7,5\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 4,5\%$; $\text{CaF}_2 = 4\ldots5\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 2,1\%$; $\text{S} \leq 0,15\%$; $\text{P} \leq 0,12\%$.

3.1.2. Матеріали та зразки

Для формування металопокриттів застосовувалися наплавочні матеріали у вигляді дротів суцільного перерізу марок: Св-08Г2С, Св-08Х20Н9Г7Т, Св-15ГСТЮЦА (ДСТУ 2246-96), Нп-30ХГСА (ДСТУ 10543-98), а також порошковий дріт Пп-Нп-35В9Х3СФ (ДСТУ 26101-94). Хімічний склад зазначених матеріалів подано в табл. 3.1.

Наплавлення здійснювали на зразках, якими виступали корінні та шатунні шийки колінчастих валів дизельних двигунів Deutz TCD 2012.

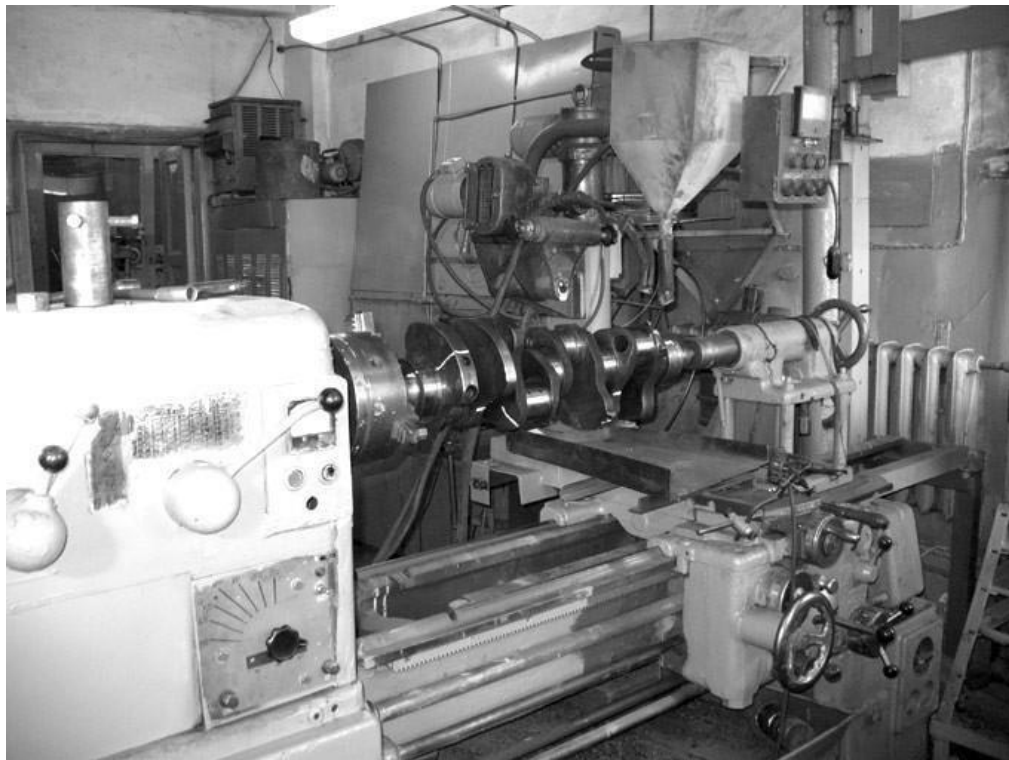


Рисунок 3.2 – а. Переустановлений токарно-гвинторізний верстат моделі 1К62 з наплавочною головкою А-580М и джерелом живлення дуги ВДУ-506 (загальний вид)

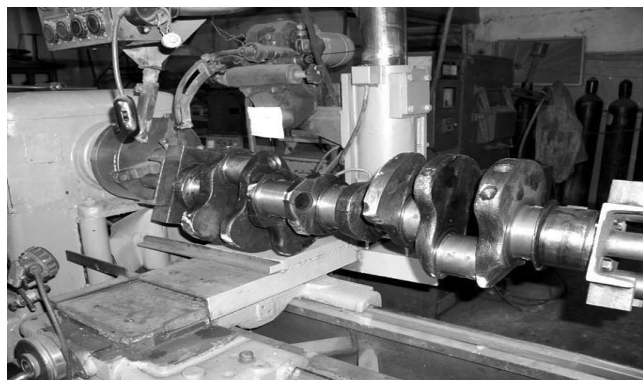
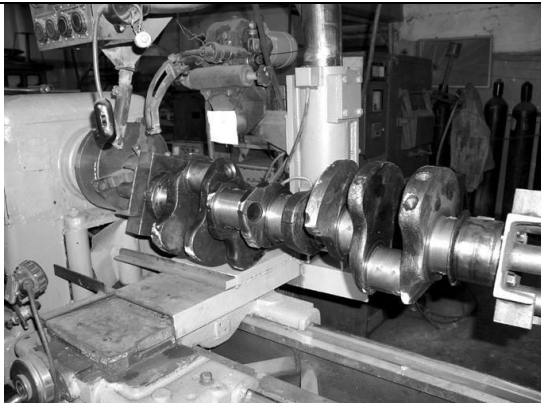


Рисунок 3.2 – б. Переустаткований токарно-гвинторізний верстат моделі 1К62 з на-плавочною головкою А-580М і джерелом живлення дуги ВДУ-506
(вид із центрозміщувач й наплавлюваним колінчатим валом)

Таблиця 3.1 – Хімічний склад використовуваних наплавочних матеріалів

Найменування матеріалу	Зміст хімічних елементів, %								
	Вуглець	Марганець	Кремній	Хром	Нікель	Титан	Сірка	Фосфор	Інші елементи
Св-08Г2С	0,10	1,80	0,90	-	-	-	-	-	-
	...	...	...	-	-	-	-	-	-
	0,15	2,00	1,10	-	-	-	-	-	-
Св-08Х20Н9Г7 Т	0,8	6,90	-	19,00	8,00	0,9	-	-	-
	...	...	-	...	...	0,9	-	-	-
	0,10	7,10	-	20,00	9,00	0,9	-	-	-
Нп-30ХГСА	0,3	0,95	0,95	-	-	-	-	-	-
	...	...	...	-	-	-	-	-	-
	0,33	1,07	1,20	-	-	-	-	-	-
ПП-Нп-35В9Х3СФ	0,30	0,30	0,30	2,20	-	-	-	-	-
	...	...	...	...	-	-	-	-	-
	0,43	0,80	0,80	3,50	-	-	-	-	-
Св-15ГСТЮЦА	0,12	0,60	0,45	0,30	0,40	0,05	0,25	0,025	≥ 0,04 Сe, 0,05-0,15 Zr, 0,2-0,50 Al
	...	...	...	...	...	...	...	...	
	0,18	1,00	0,85	...	...	0,02	...	...	

3.2. Дослідження стану ремонтного фонду та утворення тріщин в колінчатих валах

Результати аналізу твердості шийок колінчастих валів із ремонтного фонду (28 зразків) виявили низку характерних особливостей. Для шийок із нормальним зносом середні значення твердості змінювалися незначно – від 56,5 до 54 HRC (що становить 4...5%) при допустимих межах 47...63 HRC [25]. Всі шийки без ознак задирів мали твердість у межах поля допуску, середнє значення становило близько 57 HRC.

На відміну від цього, у шийках із задирами середня твердість дорівнювала лише 45 HRC, причому у 64% випадків показники виявилися нижчими за граничні значення. Це вказує на необхідність додаткового зміцнення після їх перешліфування. При переході на ремонтний розмір також порушуються допуски на радіус галтелей. Так, на нових колінчастих валах радіус галтелей шатунних шийок перебував у межах 3,5...4 мм (у середньому 3,98 мм) при нормативному значенні $4 \pm 0,15$ мм, а для корінних шийок – 2,5...3 мм (у середньому 2,94 мм) при допустимому $3 \pm 0,15$ мм. У перешліфованих же валах спостерігалися відхилення: на шатунних шийках від 2 до 4,5 мм (середнє — 3,8 мм, що виходило за межі допуску у 15% випадків), а на корінних – від 2 до 3,5 мм (середнє – 2,66 мм, понад норми у 22%). Окремо відзначені випадки формування некругових галтелей (5%). Подібні відхилення спричинюють зростання концентрації напружень та зниження втомної міцності колінчастих валів.

Схожі закономірності підтверджені й результатами втомних випробувань на симетричне кручення, представленими на рис. 3.3 та в табл. 3.2. На рис. 3.3 заштриховано довірчу область із ймовірністю $p = 0,9$.

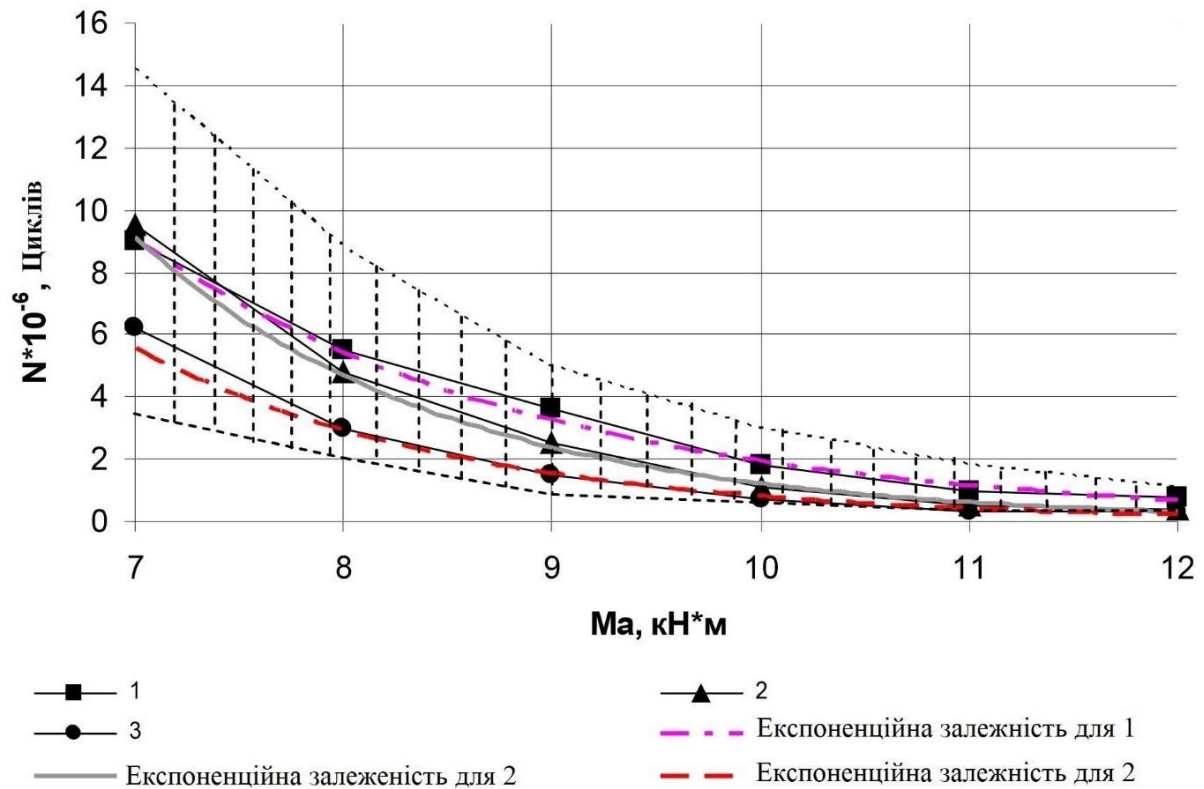


Рисунок 3.3 – Криві втоми колінчатого вала при крученні: 1 – нові; 2 – нормально зношені; 3 – аварійно зношені

Як показано на рис. 3.3, усі три криві потрапляють у 90% довірчу область, що свідчить про незначні відмінності у параметрах. Для колінчастих валів із нормальним зносом граничний момент витривалості при кручинні в середньому менший на 3% порівняно з новими деталями, тоді як для аварійно зношених валів цей показник знижується приблизно на 10%.

Таблиця 3.2 – Параметри експонентної залежності числа циклів до руйнування від амплітуди крутного моменту

Характеристика валів	Число валів	Параметри			
		$N_0 \cdot 10^6$	b	r^2	$M-1^\infty$, кН·м
Нові	32	381,14	0,5155	0,984	6,90
Нормально зношені	13	1129,9	0,6889	0,998	6,70
Аварійно зношені	15	917,34	0,713	0,967	6,29

Основним чинником, що визначає залишковий ресурс колінчастого вала, є

його втомлювана міцність при роботі на вигин. У процесі експлуатації внаслідок накопичення втомних пошкоджень відбувається поступове зниження втомної міцності, а відповідно і скорочення ресурсу. Особливо суттєво ці показники знижуються у випадках аварійних пошкоджень шийок – до 44%. Важливим фактором, який також впливає на втомну міцність, є якість шліфування, зокрема точність дотримання радіуса галтелей.

Варіація характеристик кривих втоми пояснюється як відмінностями у поставках сталі, так і різницею у вибраних технологічних режимах. Ці обставини необхідно враховувати при оцінюванні довговічності вала. Дослідження показали, що колінчасті вали з різними межами витривалості характеризуються неоднаковою глибиною загартованого шару у зоні галтелі по R4 під кутом 45° до поверхні (R4 45°). Навіть в межах однієї шийки спостерігається різниця у глибині зміцненого шару, що визначає місце зародження тріщин. Так, для валів із межею витривалості $2M_{из} = 9 \text{ кН}\cdot\text{м}$ глибина загартування становила $h = 2,4 \text{ мм}$, тоді як для валів із межею витривалості $2M_{из} = 7 \text{ кН}\cdot\text{м}$ – лише $h = 0,9 \text{ мм}$. При цьому вимоги креслення заводу-виробника передбачають діапазон $h = 0,8 \dots 3,0 \text{ мм}$.

Таким чином, встановлено залежність між межею витривалості колінчастого вала при вигині та глибиною загартованого шару галтелі, навіть якщо вал виготовлено з якісної сталі. У межах допустимих значень, закладених у креслення, не забезпечується стабільна якість вала. Тому мінімальна глибина загартованого шару під кутом 45° до поверхні шийок повинна становити не менше 2 мм.

Отримані міцнісні характеристики колінчастих валів Deutz TCD 2012 відповідають технології поверхневого зміцнення індукційним загартуванням (СВЧ). Запаси по межі витривалості для нефорсованих дизельних двигунів змінюються залежно від постачальника металу та становлять: для вигину $n_\sigma = 3,3 \dots 4,4$, для кручення $n_\tau = 2,9 \dots 3,75$.

Сталь 42ХМФА, що використовується у виробництві, призначена для виготовлення азотованих колінчастих валів. Однак у серійному випуску двигунів

Deutz TCD 2012 перевагу було надано індукційному гартуванню завдяки його простоті, високій продуктивності та ремонтпридатності. Проте для високофорсованих дизелів цього типу необхідно підвищити втомну міцність і зносостійкість шийок, чого можна досягти шляхом об'ємного азотування сталі 42ХМФА.

На рис. 3.4 наведені результати досліджень мікротвердості колінчастих валів за різних способів поверхневого зміцнення, отримані Петрідісом А.В. та Толкушевим А.А. [26]. Вимірювання проводилися за шкалою $HV_{0,3}$ у перерізах, перпендикулярних до досліджуваних поверхонь. Мінімально допустиме значення для забезпечення ремонтпридатності становить $HV_{0,3} = 453 \text{ кгс/мм}^2$ ($\approx 45 \text{ HRC}$).

Іонне азотування забезпечує найменшу глибину зміцнення. Вали, оброблені цим методом, допускають перешліфування лише під ремонтний розмір 0,5 при природному зносі, однак у випадку задирів відновлення неможливе. Каталітичне азотування (карбонітрування) із твердістю серцевини HB5/750/10-255 забезпечує мінімально допустиму мікротвердість на глибині близько 0,4 мм, що є кращим показником, ніж у випадку іонного азотування. У цьому випадку колінчасті вали можна відновлювати до ремонтних розмірів 0,5...1, як при природному зношуванні, так і за наявності задирів вкладишів у процесі експлуатації.

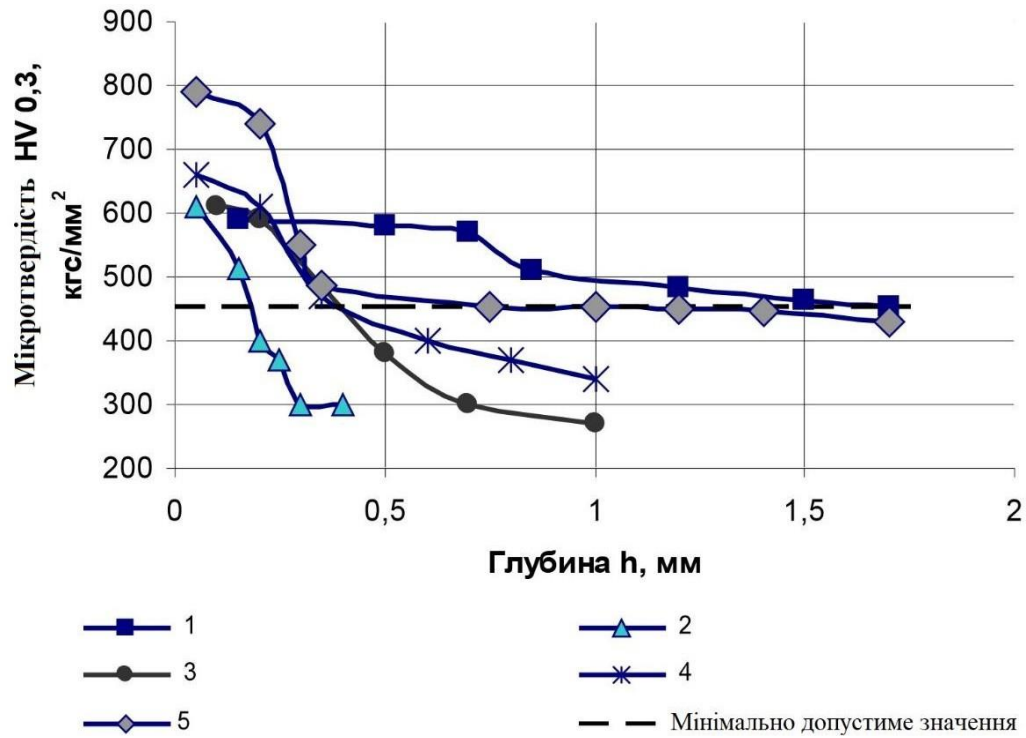


Рисунок 3.4 – Залежність мікротвердості від глибини зміцненого шару:

1 – загартування СВЧ; 2 – іонне азотування, серцевина *HB 10/3000-248*; 3 – карбонітрування, серцевина *HB 5/750/10-255*; 4 – карбонітрування, серцевина *HB 5/750/10-341*; 5 – комбіноване зміцнення (СВЧ + відпуск при $t = 600 \pm 10^\circ\text{C}$ 4 години + іонне азотування), серцевина *HB 5/750/10-241*.

Підвищення твердості серцевини до *HB5/750/10-341* дозволяє збільшити категорію ремонтного розміру до 1,5. Найбільш ефективним за критерієм ремонтпридатності виявилось комбіноване зміцнення, яке включає індукційне загартування, стабілізуючий відпуск при температурі 600°C протягом 4 годин та подальше іонне азотування. При цьому твердість серцевини становила *HB5/750/10-241*, а допустиме перешліфування забезпечувалося в діапазоні ремонтних розмірів 0,5...3.

Для колінчастих валів із радіусом кривошипа R65 та R60, що зазнали іонного азотування, було встановлено такі результати: твердість серцевини вала з R60 дорівнювала *HB 321*, а межа витривалості зросла на 11%. Для вала з радіусом R65 без грязевловлювачів межа витривалості на кручення збільшилася на 21%. При цьому запас міцності шатунної шийки на кручення для

високофорсованого дизеля Deutz TCD 2012 становив $n_{кр} = 3,9$. Незважаючи на підвищення міцнісних характеристик, основним дефектом залишаються тріщини в зоні шатунних шийок.

Статистичні дані, зібрані під час дослідження понад 450 колінчастих валів двигунів Deutz TCD 2012, показали експонентний характер розвитку втомних тріщин (рис. 3.5, 3.6, табл. 3.3). Аналіз включав оцінку як кількості тріщин, так і їх середньої довжини залежно від наробітку двигуна. Під час оцінки технічного стану двигунів, що підлягали капітальному чи поточному ремонту, було також визначено кількість зруйнованих колінчастих валів.

Встановлено, що число поламаних валів зростає з напрацюванням за експонентною залежністю (рис. 3.7, табл. 3.3). Коефіцієнт r^2 підтверджує високу збіжність цієї залежності з експериментальними результатами. Наведені на рис. 3.5...3.7 дані також свідчать про вагомий вплив якості матеріалу колінчастого вала та умов його роботи на інтенсивність втомного руйнування.

Колінчасті вали двигунів Deutz TCD 2012 виготовлені зі штампової сталі 42ХМФА, яка характеризується високою зносостійкістю, але водночас має схильність до утворення тріщин. Додатковим фактором, що впливає на прискорення втомних процесів, є підвищена номінальна частота обертання колінчастого вала, яка становить 2600 хв^{-1} , що значно збільшує амплітуду циклічних навантажень.

Таблиця 3.3 – Параметри залежності показників втомлюваного руйнування колінчастого вала від наробітку двигунів згідно досліджень [26]

Показники технічного стану	Параметри		
	y_0	b	r^2
Кількість тріщин, шт.:			
КамАЗ-740	0,793	0,0075	0,984
ЯМЗ-238	0,076	0,0125	0,966
Середня довжина втомлюваної тріщини, мм:			
КамАЗ-740	0,805	0,0090	0,993

ЯМЗ-238	0,428	0,0089	0,958
Середня частка поламаних колінчатих валів, %:			
КамАЗ-740	0,264	0,00128	0,962
ЯМЗ-238	0,088	0,0118	0,987

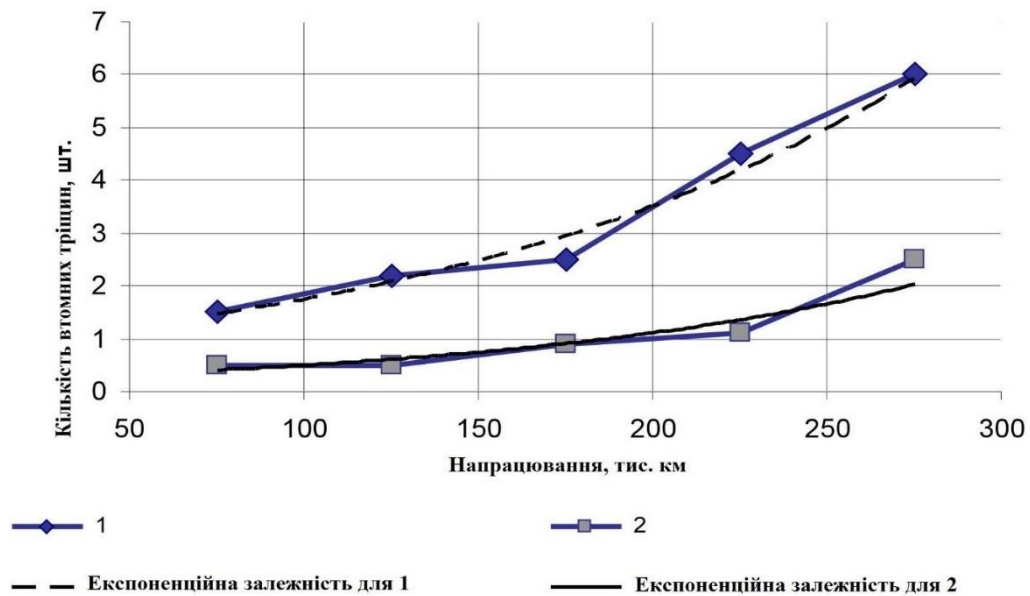


Рисунок 3.5 – Залежність кількості втомлюваних тріщин на колінчатому валу двигунів КамАЗ-740 (1) і ЯМЗ-238 (2) від наробітку

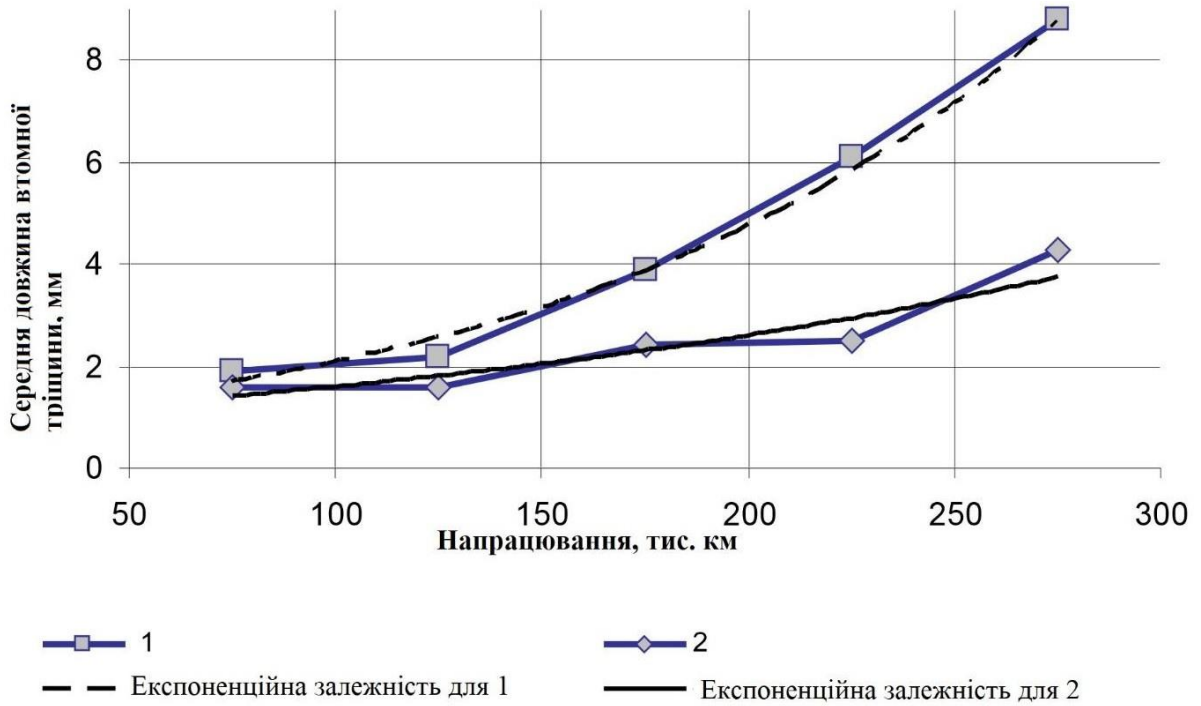


Рисунок 3.6 – Залежність середньої довжини втомлюваної тріщини на колінчатому валу двигунів КамАЗ-740 (1) і ЯМЗ-238 (2) від наробітку

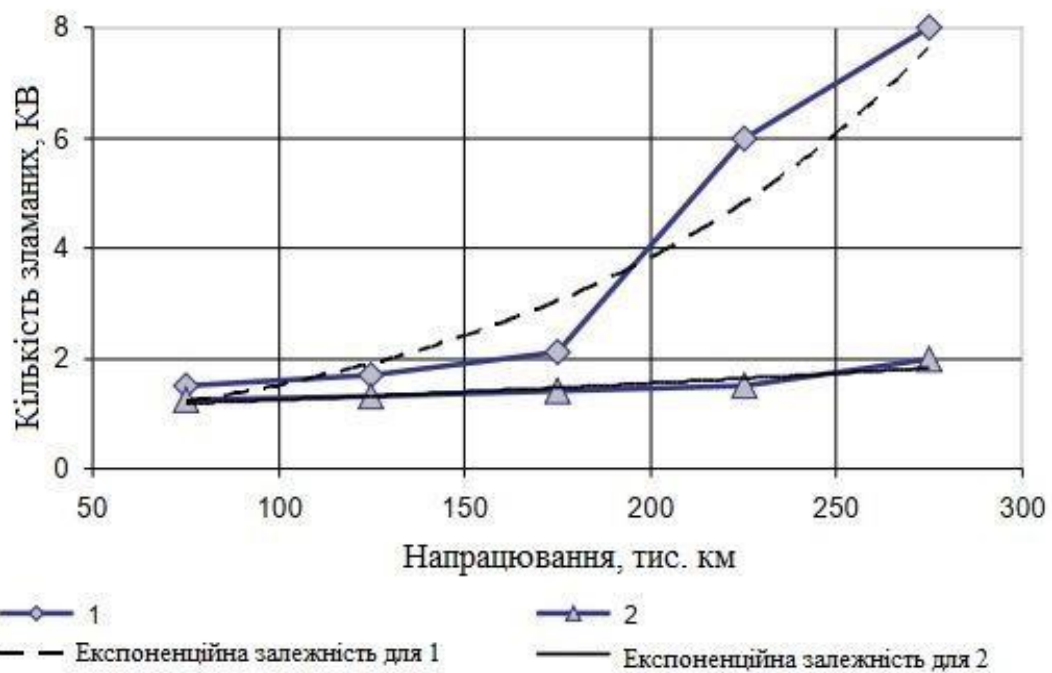


Рисунок 3.7 – Залежність частки поламаних колінчатих валів двигунів КамАЗ-740 (1) і ЯМЗ-238 (2) від наробітку

Усі зазначені фактори зумовлюють значно більшу інтенсивність втомних руйнувань колінчастих валів двигунів КамАЗ-740 порівняно з валами ЯМЗ-238 – у 2 – 4 рази. Так, вже до напрацювання близько 200 тис. км середня довжина тріщин у валах КамАЗ-740 досягає граничних значень 4 мм (рис. 3.6), після чого зазвичай проводиться ремонт. Для двигуна Deutz TCD 2012 простежується подібна тенденція, проте через недостатню кількість статистичних даних наразі складно однозначно стверджувати, що інтенсивність тріщиноутворення є ідентичною до КамАЗ.

Перешліфування шийок під черговий ремонтний розмір ефективно усуває тріщини лише приблизно у половині випадків. До цього ж рівня напрацювання частка поламаних колінчастих валів досягає 4% (рис. 3.7). Навіть після відновлення методом наплавлення під час дефектації відбраковується понад половина ремонтного фонду валів із напрацюванням понад 200 тис. км.

Важливо відзначити, що втомна міцність колінчастих валів Deutz TCD 2012, відновлених шляхом наплавлення, виявляється нижчою, ніж у тих, що не проходили ремонт. Це пояснюється тим, що в матеріалі деталі вже накопичені значні втомні пошкодження, які не завжди вдається виявити на етапі дефектації.

Отже, основні напрями підвищення надійності та якості колінчастих валів включають:

- вибір оптимального хімічного складу матеріалу та способу його виробництва;
- застосування відповідних методів і забезпечення високої якості хіміко-термічної обробки;
- зниження концентрації напружень шляхом удосконалення конструкції окремих елементів (галтелей, масляних каналів) і підвищення точності механічної обробки;
- розвиток більш досконалих методів втомних випробувань;
- забезпечення ремонтпридатності колінчастих валів на всіх етапах їх експлуатаційно-ремонтного циклу.

3.3. Дослідження розподілу температури при нанесенні наплавочного металопокриття

При виконанні наплавлення корінних шийок колінчастого вала без застосування попереднього підігріву деталі спостерігалися такі закономірності: температура кожної наступної корінної шийки під час наплавлення підвищувалася на лівих щоках у середньому на 12 °С, а на правих — приблизно на 7 °С. У підсумку це не відповідає рекомендаціям щодо попереднього підігріву, оскільки фактичні температури корінних шийок безпосередньо перед наплавленням перебували в межах 21...83 °С замість необхідного діапазону 100...250 °С.

Отримані експериментальні дані дозволили зробити висновок про доцільність попереднього підігріву колінчастого вала до температури 100...250 °С перед проведенням наплавлення. Це значно знижує ризик виникнення тріщин у процесі відновлення.

Окрім цього, було проведено аналіз розподілу температури у реальних умовах технологічного процесу наплавлення шатунних і корінних шийок колінчастого вала двигуна КамАЗ-740 [26]. Етапи виконання наплавлювальної операції наведено на рис. 3.8 та 3.9.

Для підтвердження результатів експерименти виконувалися на чотирьох колінчастих валах Deutz TCD 2012, що забезпечило їх відтворюваність та надійність.

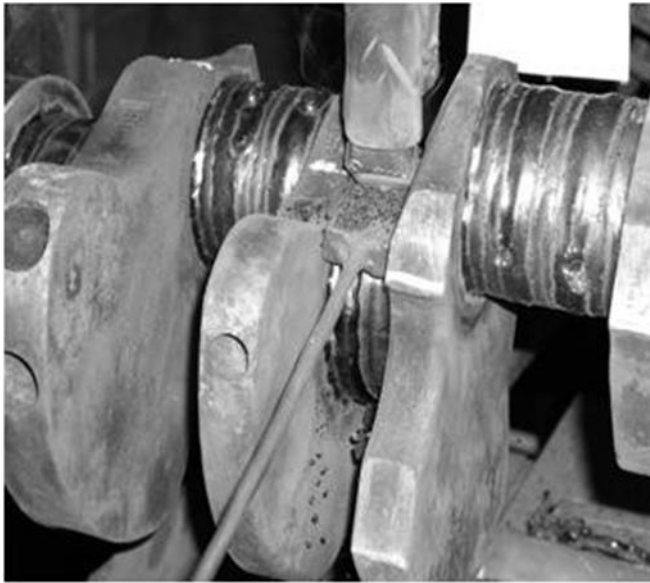


Рисунок 3.8 – Процес наплавлення шатунної шийки колінчатого вала



Рисунок 3.9 – Процес наплавлення корінної шийки колінчатого вала

Проведені експерименти засвідчили таке:

1. Під час наплавлення без попереднього підігріву, навіть за оптимально підібраних режимів, досягти необхідної температури підігріву лише за рахунок енергії дуги практично неможливо, а на окремих етапах – взагалі недосяжно.

2. Для якісного наплавлення без утворення тріщин потрібен температурний інтервал 100...250 °С.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про обов'язковість додаткового попереднього підігріву колінчастого вала до температури 100...250 °С перед процесом наплавлення. Це значно знижує ризик утворення тріщин і забезпечує підвищення надійності відновленої деталі.

3.4. Дослідження мікротвердості

При використанні дроту Св-15ГСТЮЦА (рис. 3.10) було зафіксовано зростання мікротвердості від поверхні наплавленого металу (1900 МПа) до перехідної зони, де спостерігаються максимальні значення (3000 МПа). Далі твердість поступово знижується, і за межами зони термічного впливу вона досягає мінімальних величин (1800 МПа). Варто підкреслити, що межа між зонами у даному випадку має умовний характер: перехід здійснюється поступово за рахунок зміни мікроструктури, а різкої границі між наплавленим металом та

основою не виявлено. Подібна закономірність спостерігається і у зразках, відновлених дротом Св-08Г2С.

У випадку зразка, наплавленого дротом Св-08Г2С (рис. 3.11), також відмічалось зростання показників мікротвердості: від 1600 МПа в зоні наплавленого шару до 2000...2100 МПа у перехідній зоні та зоні термічного впливу.

Для зразків, наплавлених дротом Св-08Х20Н9Г7Т (рис. 3.12), спостерігається дещо інша тенденція: значення мікротвердості мають тенденцію до зниження від поверхні наплавленого металу (1700 МПа) у напрямку до основи (1500 МПа). Водночас на межі наплавленого металу та основи відзначається локальний пік (2400 МПа), а на окремих ділянках у зоні термічного впливу твердість може досягати 3000 МПа і більше. При цьому на відміну від попередніх зразків, для цього матеріалу характерна чітко виражена межа між наплавленим шаром і основним металом.

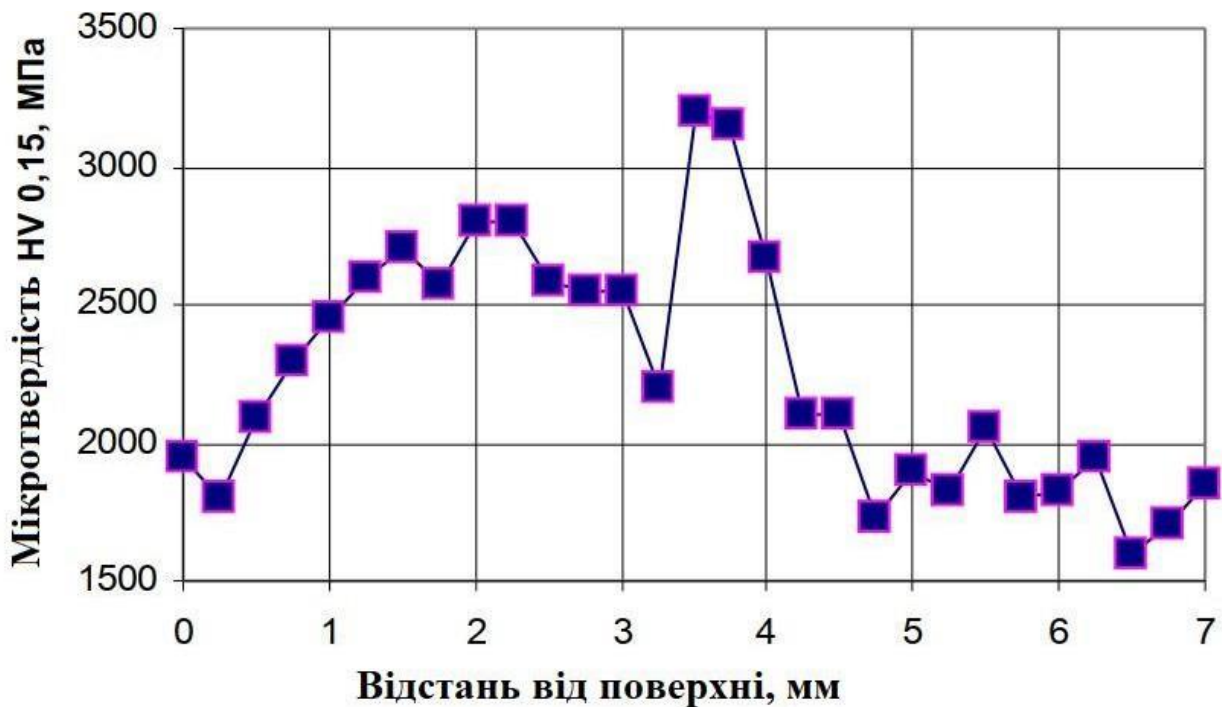


Рисунок 3.10 – Розподіл мікротвердості за глибиною зразка наплавленого дротом Св - 15ГСТЮЦА

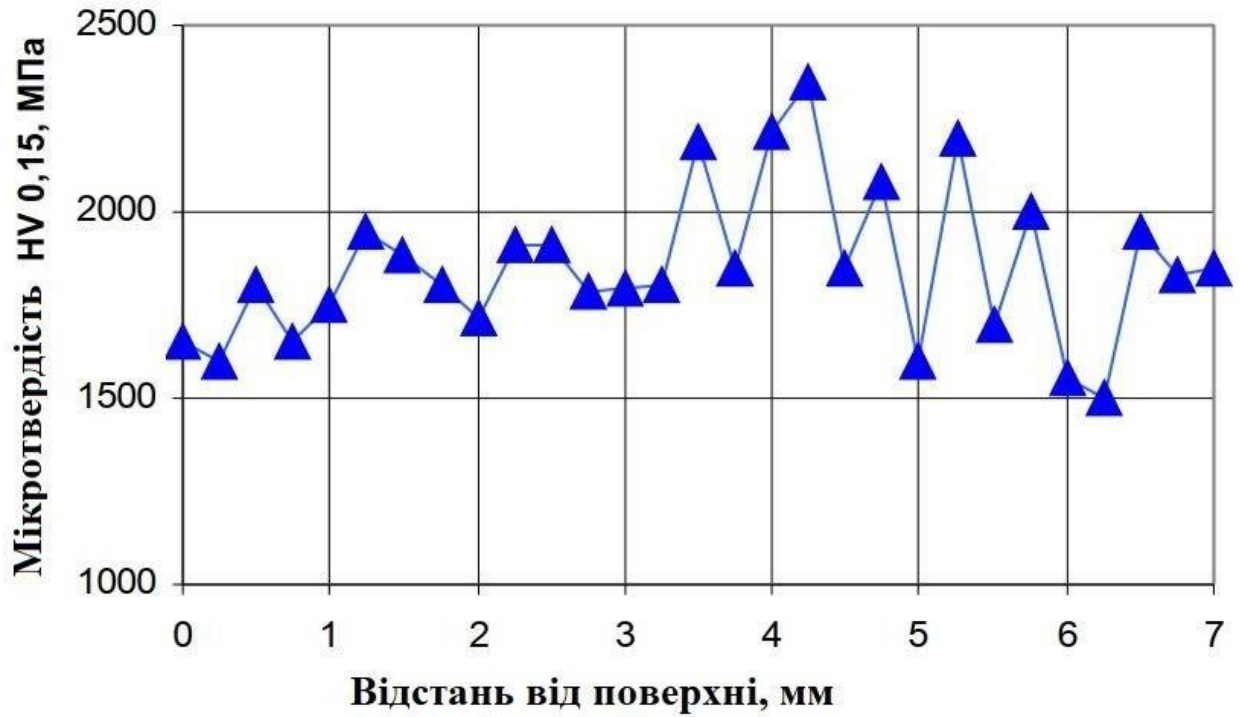


Рисунок 3.11 – Розподіл мікротвердості за глибиною зразка, що наплавлений дротом Св-08Г2С

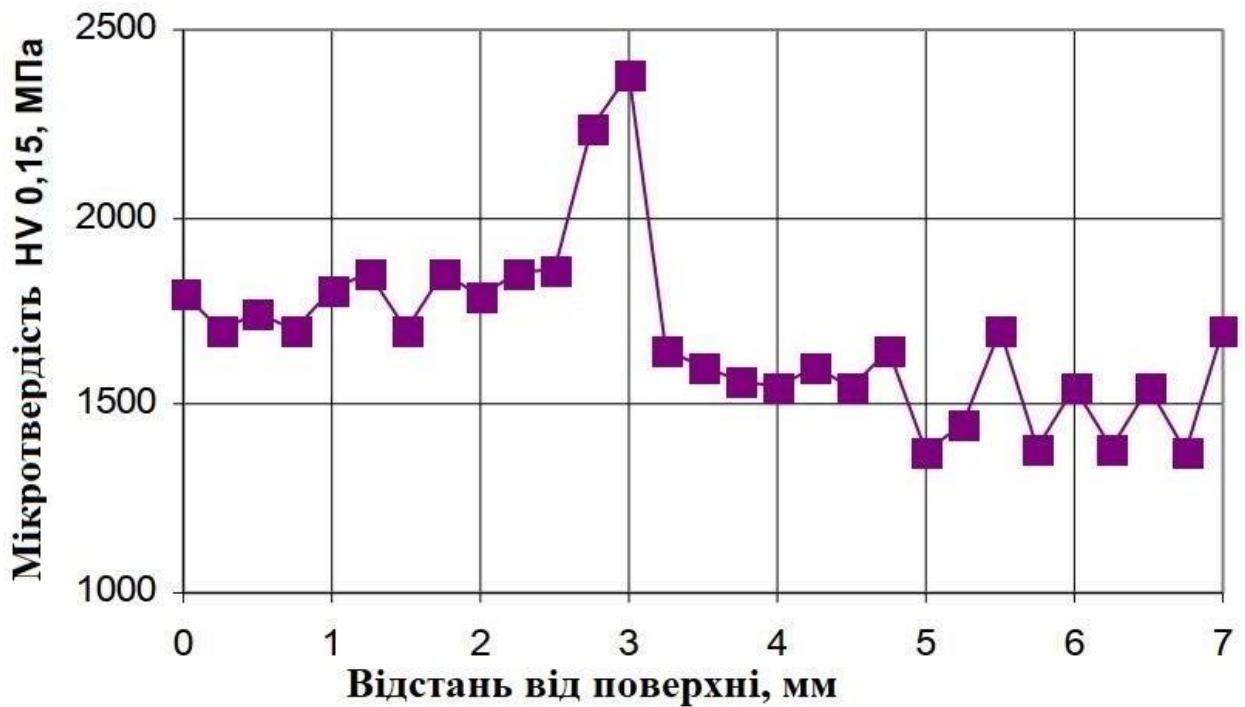


Рисунок 3.12 – Розподіл мікротвердості за глибиною зразка, що наплавлений дротом Св-08Х20Н9Г7Т

Було виконано дослідження процесу наплавлення колінчастого вала двигуна Deutz TCD 2012 із використанням двох різних типів дротів для порівняння:

1. Наплавлення шийок проводилося порошковим дротом Нп-35В9Х3 Т-Ф-3,6 під шаром флюсу АН-348-А. Після цього зразки піддавалися відпуску при температурі 500 °С протягом однієї години.

2. Наплавлення галтелей здійснювалося дротом 1,6 Нп-30ХГСА на попередньо підігріті до 200...230 °С поверхні.

3.5. Дослідження макро і мікроструктури

Результати дослідження мікрошліфів колінчастого вала Deutz TCD 2012, відновленого наплавленням дротом 1,6 Нп-30ХГСА під флюсом АН-348А, представлені на рис. 3.13 і 3.14.

При аналізі мікрофотографій мікро- та макроструктури мікрошліфа шатунної шийки вала встановлено таке: зона термічного впливу характеризується структурою сорбіту з включеннями α -заліза, у зоні наплавленого металу формується структура троститу, тоді як в основному металі зберігається сорбіт.

Дослідження мікроструктури зразків із нанесеними наплавленими покриттями (рис. 3.15–3.17) дозволило виділити загальні закономірності, притаманні всім досліджуваним матеріалам незалежно від використаного дроту. Серед них відзначено наступне:

1. Основний метал, на який проводилося наплавлення, має структуру сорбіту (рис. 3.15 в). На відстані понад 3–4 мм від межі наплавлення у структурі з'являється ферит із крупними зернами (рис. 3.16 б, 3.17 б). При наближенні до зони наплавлення зерна стають значно дрібнішими. Мікротвердість структурних елементів у таких зернах і колоніях становить 2300–2500 МПа.

2. У зоні термічного впливу сорбіт поступово зникає, тоді як перліт набуває зернистої та високодисперсної структури (рис. 3.17). У цих ділянках у всіх зразків зафіксоване зростання мікротвердості до 2700 МПа, а на окремих ділянках — навіть до 3000 МПа і більше (зокрема у зразку, наплавленому дротом 08Х20Н9Г7Т).

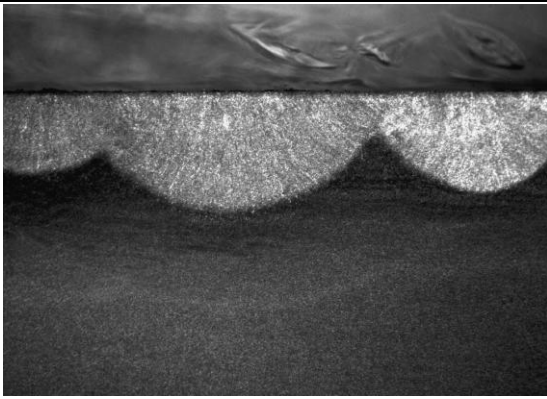


Рисунок 3.13 – Фотографія макроструктури шийки колінчатого вала двигуна, на- павленого дротом 1,6 Нп-30ХГСА, під флюсом АН-348А (50:1)

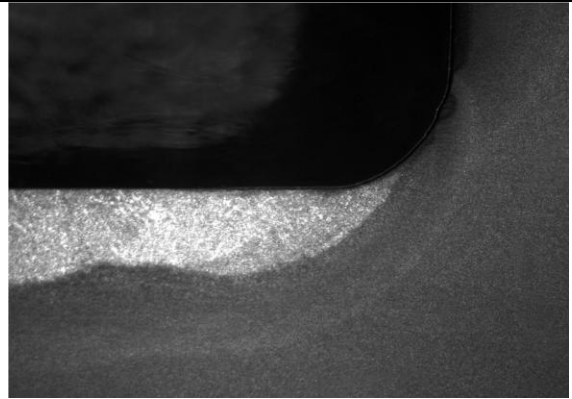
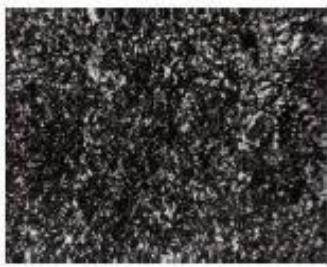
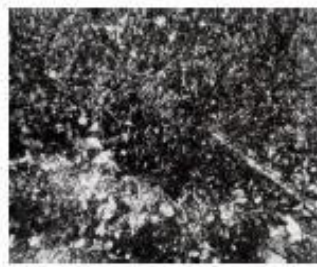


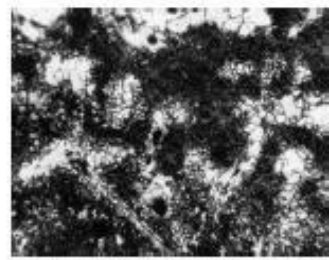
Рисунок 3.14 – Фотографія макроструктури зони галтелі колінчатого вала двигуна, напавленим дротом 1,6 Нп-30ХГСА, під флюсом АН-348А (50:1)



а)

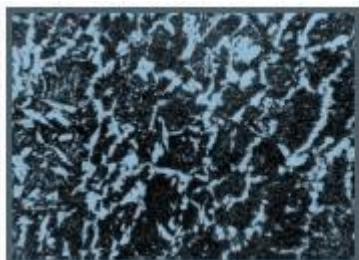


б)

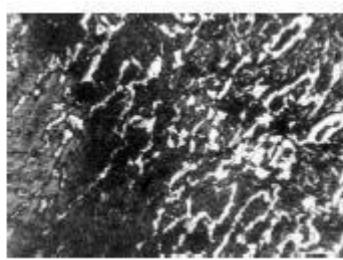


в)

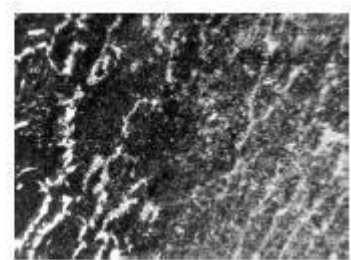
Рисунок 3.15 – Мікроструктура зразка, що напавлений дротом 15ГСТЮЦА (200:1): а – зона напавлення; б – перехідна зона; в – зона термічного впливу



а)



б)



в)

Рисунок 3.16 – Мікроструктура зразка, що напавлений дротом 08Г2С (200:1): а – зона напавлення; б – перехідна зона; в – зона термічного впливу



а)

б)

в)

Рисунок 3.17 – Мікроструктура зразка, наплавленого дротом 08X20H9Г7Т (200:1): а – зона наплавлення; б – перехідна зона; в – зона термічного впливу

1. Зона наплавлення характеризується такими структурними особливостями:

– Для зразків, відновлених дротом 15ГСТЮЦА, спостерігається дисперсна перлітна структура зернистого типу (рис. 3.15 а). Величини мікротвердості знаходяться у діапазоні 1900–2800 МПа, що близьке до значень сорбіту. У ділянках, прилеглих до перехідної зони, завдяки нижчій швидкості охолодження можлива більш повна сфероїдизація цементиту, що спричиняє локальне підвищення мікротвердості (рис. 3.15 б).

– Для дроту 08X20H9Г7Т характерна структура легованого аустеніту (рис. 3.17 а, б). Висока швидкість охолодження зберігає аустеніт, у ґратах якого розчинені легуючі елементи. У перехідній зоні й поблизу основи, де охолодження відбувається повільніше, виділяються мілкодисперсні карбіди, що обумовлює локальний стрибок мікротвердості (рис. 3.17 в).

– У зразках, наплавлених дротом 08Г2С, виявлено зони з відманштеттовою структурою та мілкодисперсним перлітом (рис. 3.16 а). Відманштеттова структура концентрується на периферії наплавлення, тоді як у центральній частині формується перліт дрібнозернистої будови. В окремих ділянках спостерігається ферит, розташування якого відповідає напряму кристалізації металу (рис. 3.16 б, в).

2. Перехідна зона має специфічні особливості.

– У зразках, наплавлених дротами 15ГСТЮЦА та 08Г2С, вона являє собою поєднання ферито-перлітної відманштеттової структури та звичайної

ферито-перлітної зернистої будови (рис. 3.16 в). У цих зонах перліт набуває «розмитої» будови внаслідок сфероїдизації цементиту й його розподілу по межах зерен фериту. В окремих випадках (для зразків 08Г2С та 30ХГСА) спостерігаються великі ділянки високодисперсного перліту, твердість яких сягає 3000 МПа.

– Слід зазначити, що у випадку наплавлення дротами 08Г2С, 30ХГСА та 15ГСТЮЦА перехідна зона не має чіткої межі. Це вказує на поступовий перехід від структури основного металу до наплавленого шару (рис. 3.15, 3.16), що підтверджує міцний зв'язок між ними.

– У зразку, наплавленому дротом 08Х20Н9Г7Т (рис. 3.17 в), навпаки, спостерігається різка межа. Це пояснюється суттєвою різницею в ізоморфності кристалічних ґрат: у наплавленому шарі – гранецентровані кубічні, тоді як в основному металі – об'ємноцентровані кубічні.

У процесі наплавлення були створені умови, за яких на межі поділу «основа – наплавлений метал» відбувалося перерозподілення перліту. Це призвело до утворення тонкої перехідної зони високодисперсного перліту по всій контактній поверхні (рис. 3.17 в).

3.6. Розробка плану операцій раціонального технологічного процесу

На основі виконаного комплексу теоретичних і експериментальних досліджень було сформовано технологічний процес відновлення колінчастих валів дизельних двигунів. Детальна послідовність операцій цього процесу представлена в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Технологічний процес відновлення

Номер з/п.	Найменування операції	Мета технологічної операції
005	Мийна	Ретельне очищення колінчатого вала
010	Слюсарна	Зачищення шийок перед дефектоскопією
015	Дефектувальна 1. 2.	1. Магнітна дефектоскопія; 2. Контроль-Сортування

020	Кругошліфувальна	Попереднє шліфування з мінімальним припуском або на 0,5 мм менше останнього ремонтного розміру
025	Слюсарна	Видалення, якщо можливо, тріщин
030	Дефектувальна	Контрольна магнітна дефектоскопія
035	Термічна	Попередній підігрів шийок колінчатого вала до температури від 100 °С до 250 °С
040	Наплавочна	Наплавлення шийок вала (центральної частини шийки - порошковим дротом марки Пп-Нп-35В9Х3СФ, галтелі - дротом сульфідного перетину марки Нп-30ХГСА

Номер з/п.	Найменування операції	Мета технологічної операції
045	Термічна	Відпуск при температурі 500 °С протягом 1 години
050	Токарно-гвинторізна	Чорнове гостріння шийок у межах 0,5 мм до номінального розміру
055	Слюсарна	Розкриття й зенкування масляних отворів
060	Термічна	Нагрівання колінчатого вала в межах 340...400 °С
065	Пресова	Виправлення вала в гарячому стані
070	Дефектувальна	Магнітна дефектоскопія
075	Кругошліфувальна	1. Відновлення поверхні шліфувального кола до встановленого заводом-виготовлювачем розміру радіуса галтелі; 2. Чистове шліфування шийок колінчатого вала; 3. Полірування шийок колінчатого вала
080	Слюсарна	Монтаж знімних противаг, заглушок і інших деталей
085	Балансувальна	Динамічне балансування колінчатого вала
090	Дефектувальна	Остаточна магнітна дефектоскопія
095	Мийна	Мийка із продувкою маслосканалів
100	Контрольна	Контроль основних геометричних параметрів колінчатого вала (діаметрів корінних і шатунних шийок, величини биття центральної корінної шийки)
105	Пакувальна	Упакування з консервацією

Розподіл напрацювання до моменту ремонту колінчастих валів отримано на основі статистичної обробки даних по 80 нових та 80 відновлених зразках.

Узагальнені результати представлено на рис. 3.18 а, 3.18 б, а основні параметри розподілу подані в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Параметри розподілу міжремонтного ресурсу великогабаритних колінчатих валів

Найменування валів	Середні значення, L (тис. км)	стандартне відхилення, σ (тис. км)	Коефіцієнт варіації	Відносний вторинний ресурс (L2/L1)
Нові	195,2	106,2	0,544	—
Відновлені	157,4	84,54	0,537	0,806

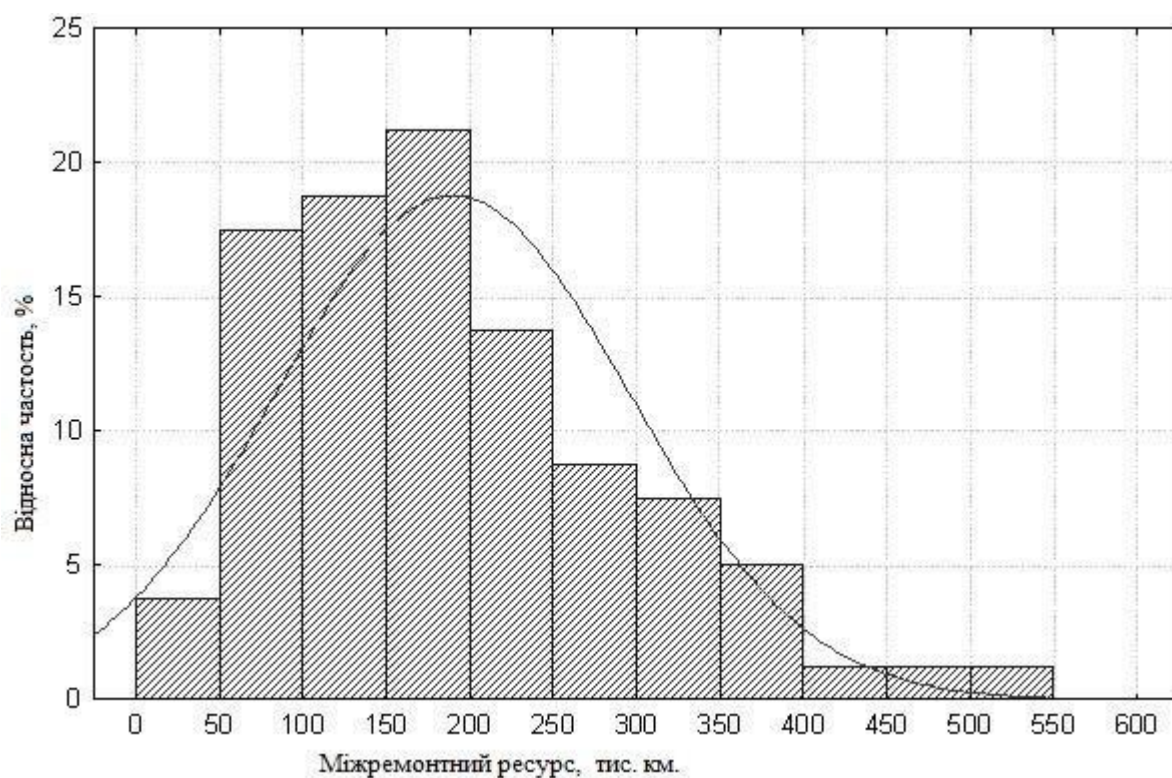


Рисунок 3.18 а – Параметри розподілу для нових валів

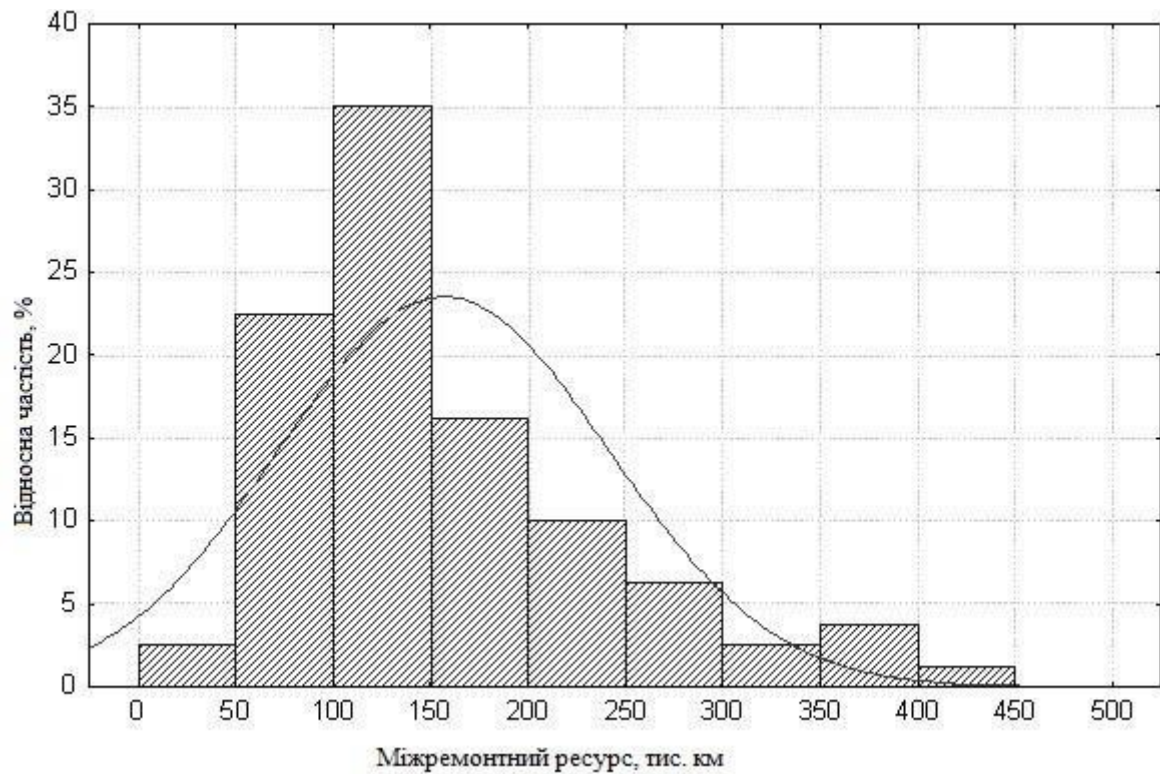


Рисунок 3.18 б – Параметри розподілу для відновлених колінчатих валів

Порівняльні характеристики застосованих технологій відновлення наведено у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Порівняльна характеристика технологій відновлення колінчатого валу

Технологія відновлення	Механічні характеристики		Триботехнічні характеристики				Технологічні характеристики	
	Твердість, HRC	Жорсткість, R_a мкм	Коефіцієнт тертя, f	жоння задиротворення	Знос, мг	Припрацювання, год	Кількість технологічних операцій	Час на проведення операцій, год
Існуюча технологія	54-58	0,7-0,72	0,8-0,12	1,7	30-33	8,5	Однакова	0,2
Розроблена технологія	60-64	0,6-0,65	0,02-0,05	2,0	13-16	6,0		0,15

3.7. Висновки

1. Дослідження розподілу температур під час нанесення наплавлених металопокриттів показало, що при роботі без попереднього підігріву, навіть за

оптимально підібраних режимів, досягти необхідної температури нагріву (100...200 °С) лише за рахунок тепла зварювальної дуги складно, а в окремих випадках – взагалі неможливо.

2. Аналіз внутрішніх напружень із використанням методу фотопружності підтвердив відповідність реальних картин руйнувань результатам, отриманим за фізичними та математичними моделями.

3. Вивчення мікротвердості зразків, наплавлених різними матеріалами, виявило наявність локальних піків твердості. Вони обумовлені різницею температур між шийкою та наплавленим металом. У зоні галтелей значення піків нижчі, оскільки ці ділянки вже були підігріті під час наплавлення, що підтверджує доцільність попереднього нагріву деталі. За відсутності подальшої термообробки в зоні сплавлення формується «пік» твердості близько 6800 МПа, що свідчить про появу надто крихких структур, неприйнятних для експлуатації. Проведення відпуску при 500 °С протягом 1 години після наплавлення повністю усуває цей негативний ефект. Водночас додаткові операції загартування з подальшим відпуском не забезпечили суттєвого вирівнювання значень мікротвердості по глибині. Найбільш оптимальні експлуатаційні характеристики спостерігалися при комбінованій технології: наплавлення центральної частини шийки порошковим дротом Пп-Нп-35В9Х3СФ із наступним відпуском при 500 °С протягом 1 години та наплавлення галтелей дротом суцільного перерізу Нп-30ХГСА з попереднім підігрівом деталі до 200...230 °С.

4. Дослідження макро і мікроструктури наплавлених покриттів, результати рентгенографічного аналізу та вивчення внутрішніх напружень другого роду, а також характеристик різання при обробці наплавлених шарів показали наступне: наплавочні матеріали Св-08Г2С, Нп-30ХГСА та Св-15ГСТЮЦА утворюють основу й покриття зі структурою λ -Fe типу об'ємноцентрованого куба, тоді як матеріал Св-08Х20Н9Г7Т формує структуру γ -Fe з гранецентрованими кубічними ґратами.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні відомості про охорону праці на підприємстві

Товариство з обмеженою відповідальністю є однією з провідних компаній в Україні, що спеціалізується на продажу та сервісному обслуговуванні сільськогосподарської техніки [27]. Організаційна структура підприємства подана на рис. 4.1.

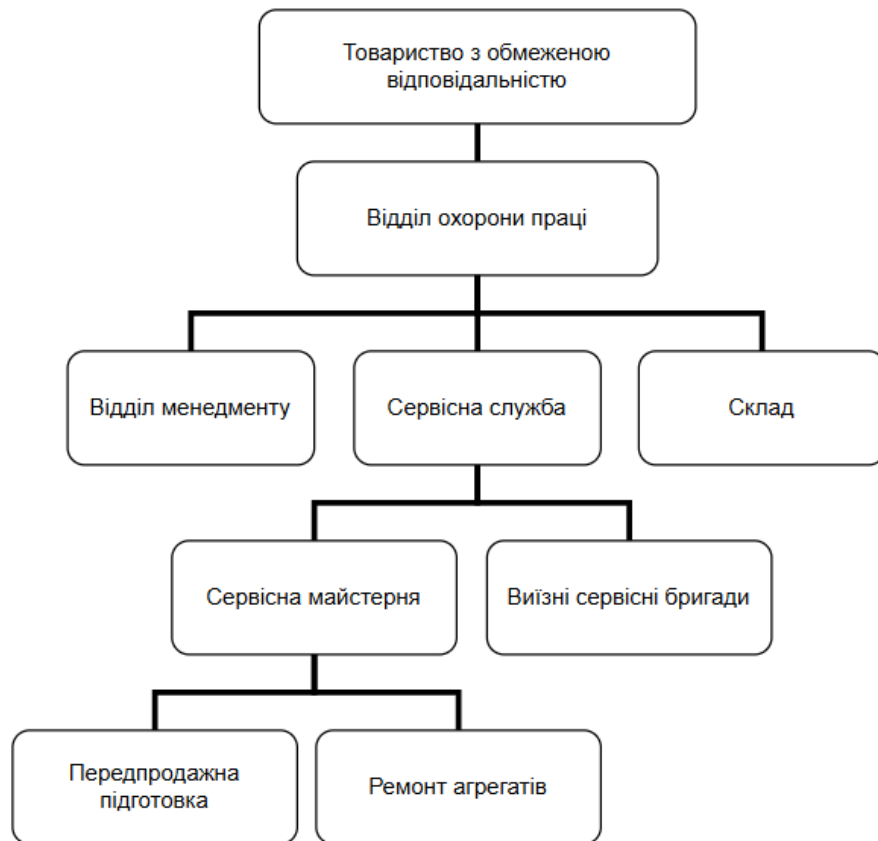


Рисунок 4.1 – Структура служби охорони праці

Охорона праці визначається як система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на забезпечення збереження життя, здоров'я та працездатності людини в процесі її трудової діяльності [28].

Відповідальність за стан охорони праці на підприємстві покладається на керівника та штатного спеціаліста з охорони праці. Оскільки на підприємстві працює 59 осіб, введено постійну посаду фахівця з охорони праці.

До його основних обов'язків належить підготовка звітної документації, розробка планів щодо поліпшення умов праці, забезпечення персоналу

методичними матеріалами, контроль за дотриманням правил і норм охорони праці на робочих місцях. Також спеціаліст аналізує діяльність працівників і надає керівництву рекомендації щодо усунення недоліків та підвищення рівня безпеки. Окремим напрямом його роботи є участь у діяльності профспілки, зокрема у процесах укладання колективних договорів і вирішенні питань страхування співробітників [29].

Крім цього, спеціаліст проводить вступний інструктаж і інструктажі для керівників підрозділів. Усі інші види інструктажів здійснюються безпосередньо керівниками підрозділів на робочих місцях.

4.2. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів на ділянці з відновлення деталей зварюванням та наплавленням

У приміщеннях майстерні можуть діяти такі шкідливі та небезпечні фактори:

- підвищений рівень шуму, що виникає як від працюючих машин, так і від обладнання, яке використовується для виконання ремонтних операцій;
- загазованість повітря, спричинена роботою двигунів машин у закритому приміщенні;
- ультрафіолетове випромінювання, яке виникає під час виконання зварювальних процесів;
- вплив вібрацій.

На ділянці, де здійснюється наплавлення колінчастих валів, основними шкідливими чинниками виступають: загазованість приміщення внаслідок виділення диму, інтенсивне ультрафіолетове випромінювання та підвищений рівень шуму.

4.3. Заходи по забезпеченню захисту працівників від дії шкідливих та небезпечних факторів

Розробка організаційно-технологічної карти безпечного виконання робіт з наплавлення валів

У процесі відновлення посадкових поверхонь під підшипники методом наплавлення виникають небезпечні виробничі зони та фактори, що можуть спричинити травмування працівника. Тому під час організації робіт на такому робочому місці необхідно враховувати потенційні ризики та передбачати комплекс заходів для їх попередження й усунення.

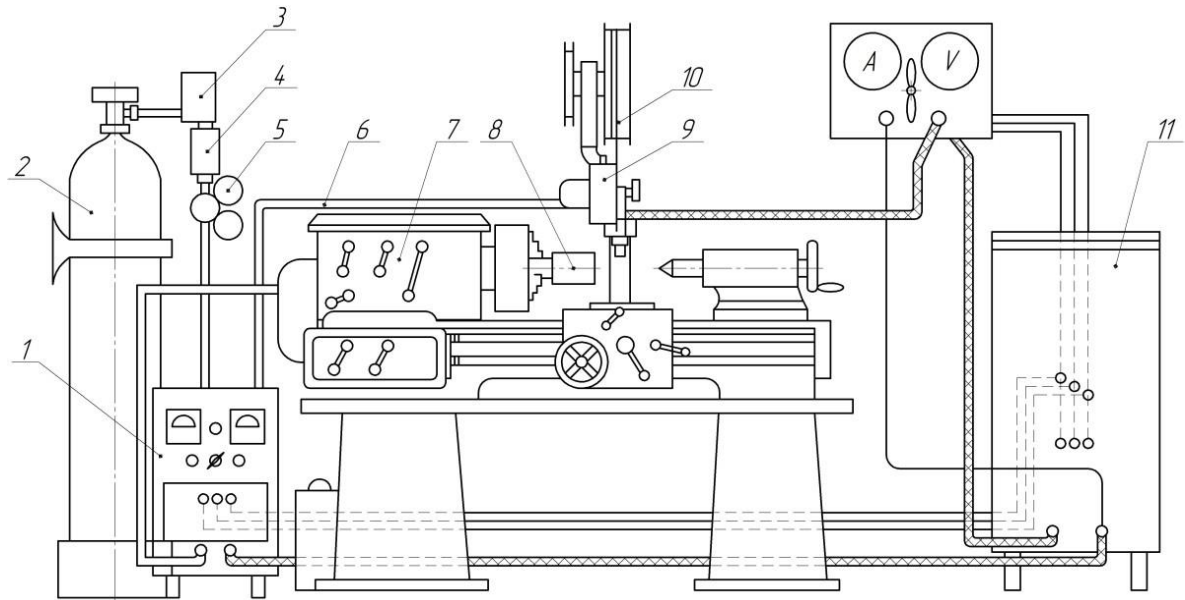


Рисунок 4.2 – Схема установки для автоматичного наплавлення деталей в захисному середовищі вуглекислого газу:

- 1 – апаратна шафа; 2 – балон з вуглекислотою; 3 – електричний підігрівач; 4 – осушувач; 5 – редуктор; 6 – шланг підведення газу; 7 – токарний верстат; 8 – деталь; 9 – механізм подачі електродного дроту; 10 – касета з дротом;
11 – селеновий випрямляч.

Карта небезпечних зон та вимоги безпечної роботи на установці ГМВК – 1 наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Карта небезпечних зон та вимоги безпечної роботи на установці ГМВК – 1

№	Небезпечна зона	Небезпечний фактор	Вимоги безпечної роботи
1	Зона наплавлення	Ураження електричним струмом, ураження очей та шкіри зварювальною дугою та краплями металу, ураження шкідливими випаровуваннями	1. Забороняється обслуговувати верстат якщо він увімкнений в мережу; 2. Не допускати роботу без захисної маски чи спеціального щитка з захисним склом. 3. Верстат повинен бути заземлений. 4. Забороняється робити будь які маніпуляції з дугою під час наплавлення. 5. Робоче місце повинно бути оснащено місцевою вентиляцією.
2	Деталь, що оброблюється	Травмування кінцівок, та органів зору	1. Вал повинен бути надійно закріплений у патроні. 2. Обов'язково вал повинен кріпитись центром задньої бабки. 3. При наплавленні деталей довжина яких перевищує 1 м використовувати люнет.

3	Наплавлювальна головка	Травмування кінцівок, органів зору та ураження електричним струмом	1. Заправляти касету дротом з використанням спеціальних пристосувань та рукавиць. 2. Головку надійно кріпити до установочних плит токарно-гвинторізного верстату. 3. Зміну швидкості подачі дроту проводити при вимкненому верстаті. 4. Не допускати зменшення зазору між мундштуком і валом менше 7 мм.
4	Зварювальний трансформатор	Ураження електричним струмом	1. Забороняється вмикати трансформатор при непрацюючій системі охолодження. 2. Контактні кабелі повинні надійно кріпитись до відповідних виходів "+, -". 3. Обслуговування трансформатора проводити при відключенні від мережі.

5	Балон з CO ₂	Ураження кінцівок	1. При отриманні балону зі складу перевірити його цілісність. 2. Слідкувати за проходженням перевірок балонів на герметичність. 3. При відігріванні замерзлого редуктора балона не допускається перевищення температури води вище + 25 0C. 4. Відстань від балонів до найближчого джерела випромінювання тепла повинно бути не менше 5 м.
6	Шланги та кабелі	Ураження кінцівок та електричним струмом	1. Шланги для подачі вуглекислоти повинні бути цілими і надійно закріплені на балоні та на входному парубку в мундштук. 2. Електрокабелі повинні бути надійно закріплені, не мати оголених частин. 3. Кабелі та шланги повинні бути прокладені у безпечному місці, потрапляння крапель металу на них не допускається.

Дотримання правил безпечної роботи на установці дозволяє запобігти травмуванню працівників і забезпечити, щоб процес наплавлення був швидким, надійним, технологічно ефективним та потребував мінімального залучення ручної праці.

4.4. Дії у разі настання надзвичайної ситуації

У випадку виникнення надзвичайної ситуації на підприємстві, з урахуванням специфіки його діяльності, можливими загрозами є:

- ураження електричним струмом;
- травмування внаслідок падіння важких предметів (машини з підйомника, агрегатів чи окремих деталей);
- виникнення пожежі;
- отруєння шкідливими випарами під час зварювальних робіт;
- отруєння чадним газом у процесі технічного обслуговування;
- травми під час роботи на верстатах та інші випадки.

У разі виявлення пожежі необхідно негайно повідомити за телефоном 101. Діяти слід оперативно, використовуючи всі наявні засоби пожежогасіння: пісок, воду, вогнегасники тощо. При евакуації з небезпечної зони потрібно швидко залишати палаючі чи задимлені приміщення, затримуючи дихання та прикривши рот і ніс щільною вологою тканиною.

Якщо доводиться проходити через сильно задимлені ділянки, пересуватися слід максимально швидко, захищаючи органи дихання тканиною (за можливості – змоченою водою). Обов'язково потрібно відключити обладнання від електромережі та, не наражаючи себе на небезпеку, намагатися врятувати майно.

У разі наявності постраждалих їм необхідно надати першу медичну допомогу та викликати швидку за номером 103.

4.5. Висновок

Аналізуючи стан охорони праці на підприємстві, можна відзначити, що заходи для покращення умов праці здійснюються, проте їхня ефективність залишається недостатньою. Існують додаткові резерви для підвищення рівня безпеки, оздоровлення виробничого середовища та усунення наявних недоліків.

Реалізація комплексу заходів із охорони праці дозволить знизити ризик травмування працівників, а створення комфортного мікроклімату в приміщеннях майстерні сприятиме зростанню продуктивності персоналу та покращенню

якості виконуваних ремонтних робіт.

Рекомендовано здійснити такі дії:

1. Завідувачу ремонтної майстерні – забезпечити виробничі підрозділи необхідними засобами медичної допомоги (аптечками).
2. Начальнику ПСО – обладнати приміщення майстерні порошковими вогнегасниками.
3. Головному енергетику – встановити додаткове освітлення у коридорах майстерні.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Економічну ефективність розраховуємо для річної програми відновлення валів у кількості $W = 100$ шт. Вартість технічного оснащення, необхідного для реалізації технологічного процесу, визначається за формулою 5.1 [32].

Де $C_{об}$ – питома вартість обладнання (40000 ... 45000 грн. на одного робітника), грн.;

$C_{осн}$ – вартість технологічного оснащення, грн.;

$C_{птз}$ – вартість підйомно-транспортних засобів, грн.

Проведемо відповідні розрахунки:

$$C_{осн} = 0,2 \cdot C_{об} = 0,2 \cdot 40000 = 8000 \text{ грн.}$$

$$C_{птз} = 0,25 \cdot C_{об} = 0,25 \cdot 40000 = 10000 \text{ грн.}$$

$$\Phi_{ос} = 40000 + 8000 + 10000 = 58000 \text{ грн.}$$

Собівартість виконання ремонтних робіт визначається за формулою 5.2.

Заробітну плату основних виробничих працівників визначаємо за формулами 5.3 – 5.6.

$$C_0 = 0,88 \cdot 85 \cdot 100 = 7480 \text{ грн.}$$

де T – трудомісткість виконання робіт, люд.-год,

$C_{год}$ – середня погодинна ставка робітника, грн.;

W – річна програма робіт, шт.

$$C_{дод} = 0,08 \cdot 7480 = 598 \text{ грн.}$$

$$C_{нрх} = 0,37(7480 + 598) = 2989 \text{ грн.}$$

$$C_{зпн} = 7480 + 598 + 2989 = 11067 \text{ грн.}$$

Нарахування на амортизацію обладнання визначаються за формулою 5.7.

$$A_{об} = 0,1 \cdot 40000 = 4000 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення ремонту обладнання визначаються за формулою 5.8.

$$C_{p.ob} = 0,035 \cdot 40000 = 1400 \text{ грн.}$$

Витрати на придбання ремонтних матеріалів визначаються за формулою 5.9.

$$C_m = 0,15 \cdot 7480 = 1122 \text{ грн.}$$

Витрати на споживану електроенергію визначаються за формулою 5.10.

$$C_e = 704 \cdot 3,26 = 2295 \text{ грн.}$$

$$C_{\pi} = 11067 + 4000 + 1400 + 1122 + 2295 = 19884 \text{ грн.}$$

Собівартість відновлення однієї деталі визначаємо за формулою 5.11.

$$B_d = \frac{19884}{100} = 198,8 \text{ грн.}$$

Приведені витрати визначаємо за формулою 5.12.

$$B_{\pi p}^1 = 198,8 + (0,15 \cdot 580) = 285,8 \text{ грн.}$$

де K_n – нормативний коефіцієнт відрахунків, $K_n = 0,15$;

K_d – капіталовкладення на одну деталь, грн.

Капіталовкладення на одну деталь можна визначити за формулою 5.13.

$$K_d = \frac{58000}{100} = 580 \text{ грн.}$$

З урахуванням ПДВ загальні витрати на відновлення однієї деталі визначимо за формулою 5.14.

$$B_{\pi p} = 285,8 + (0,2 \cdot 285,8) = 343 \text{ грн.}$$

Прейскурантна вартість відновлення однієї деталі визначаємо за:

$$C_d = 2000 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект визначимо за формулою 5.15.

$$E_p = (2000 - 343) \cdot 100 = 165700 \text{ грн.}$$

Термін окупності понесених витрат визначаємо за формулою 5.16.

$$O_p = \frac{58000}{165700} = 0,4 \text{ року}$$

Оцінювання доцільності впровадження розробленої технології відновлення деталі здійснюється за техніко-економічними критеріями, шляхом порівняння отриманих значень коефіцієнта ефективності K_e та терміну окупності O_p із нормативними показниками ($K_{e.н.} > 0,15$, $O_{p.н.} < 6,6$ років). Визначимо за формулою 5.17.

$$K_e = \frac{(2000 - 343) \cdot 100}{58000} = 2,8$$

За результатами виконаних розрахунків можна дійти висновку про раціональність та доцільність впровадження розробленого технологічного процесу відновлення колінчастого вала.

Таблиця 5.2 – Техніко-економічні показники відновлення вала зчеплення

Показники	Значення показників
Об'єм впровадження, шт.	100
Об'єм капіталовкладень, грн.	58000
Загальна трудомісткість, люд.-год.	88
Виробничі витрати, грн..	19884
Витрати 1 деталь з врахуванням ПДВ, грн.	343
Прейскурантна ціна на 1 деталь, грн.. (наплавлення)	2000
Коефіцієнта ефективності	2,8
Річний економічний ефект, грн.	165700
Термін окупності капіталовкладень, рок.	0,4

Висновок

Розрахунки, подані в таблиці 5.2, підтверджують доцільність упровадження заходів з удосконалення технології відновлення колінчастих валів у ремонтній майстерні. Зокрема, застосування методу наплавлення забезпечує річний економічний ефект у розмірі 165 700 грн, при цьому термін окупності додаткових матеріальних витрат становить лише 0,4 року.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Ремонт і відновлення колінчастих валів є одними з найбільш трудомістких і складних операцій серед технологічних процесів ремонту деталей. Проведений аналіз існуючих методів відновлення колінчастих валів дизельних двигунів показав доцільність застосування технології нанесення металопокриттів методом наплавлення під шаром флюсу, з використанням різних типів дротів для відновлення шийок та галтелей вала.

На основі методу кінцевих елементів були створені фізична та математична моделі кривошипа, що дали змогу визначити рівень і характер внутрішніх напружень. Окрім того, побудована плоска двовимірна модель шатунної шийки колінчастого вала Deutz TCD 2012, а також модель небезпечного перерізу та схема навантаження. Розрахункові результати підтвердили статистичні дані щодо характеру руйнувань деталі під час експлуатації.

Встановлено, що при наплавленні без попереднього підігріву, навіть за оптимальних режимів, практично неможливо досягти необхідного інтервалу температури нагріву (100...200 °C) лише за рахунок енергії дуги. Додатковий аналіз внутрішніх напружень методом фотопружності підтвердив подібність результатів моделювання та фактичних руйнувань.

Дослідження мікротвердості зразків, відновлених різними наплавочними матеріалами, виявило наявність піків твердості, що зумовлені контрастом температур між шийкою та наплавленим шаром. У зоні галтелей ці піки були нижчими, оскільки під час наплавлення вони вже мали попередній підігрів. Це підкреслює важливість попереднього нагрівання деталі. За відсутності термообробки в зоні сплавлення спостерігався «пік» твердості до 6800 МПа, що свідчить про утворення надмірно крихких структур, неприйнятних для подальшої роботи деталі. Водночас відпуск при 500 °C протягом однієї години повністю усував цей недолік. Додаткові операції загартування з подальшим відпуском не призвели до суттєвого вирівнювання мікротвердості по глибині. Найкращі показники були зафіксовані при поєднанні наплавлення центральної

частини шийки порошковим дротом Пп-Нп-35В9Х3СФ із подальшим відпуском (500 °С, 1 година) та наплавлення галтелей дротом Нп-30ХГСА після попереднього підігріву до 200...230 °С.

Дослідження макро- і мікроструктури наплавлених покриттів, а також результати рентгенографічного аналізу і вивчення внутрішніх напружень другого роду показали таке: матеріали Св-08Г2С, Нп-30ХГСА та Св-15ГСТЮЦА формують структуру λ -Fe з об'ємноцентрованими кубічними ґратами, тоді як наплавочний матеріал Св-08Х20Н9Г7Т характеризується структурою γ -Fe з ґранецентрованою кубічною ґраткою.

Аналіз стану охорони праці на підприємстві свідчить, що роботи з її покращення проводяться, проте їх ефективність залишається недостатньою. Існують можливості для подальшого підвищення безпеки, усунення недоліків та оздоровлення умов праці. Впровадження заходів із охорони праці дозволить зменшити ризик травматизму серед робітників. Створення сприятливого мікроклімату в майстерні сприятиме підвищенню продуктивності праці та якості ремонтних робіт.

Економічний аналіз підтвердив доцільність удосконалення технології відновлення колінчастих валів, зокрема впровадження методу наплавлення. Реалізація цієї технології забезпечує річний економічний ефект у розмірі 165 700 грн, при цьому термін окупності додаткових витрат становить лише 0,4 року.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Головчук А.Ф., Орлов В.Ф., Строконов О.П. Експлуатація і ремонт сільськогосподарської техніки: підручник: у 3 кн. Кн. 1: Трактори. Київ: Грамота, 2003. 336 с.
2. 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.
3. Калганков Є.В. Деякі проблеми гідроабразивно-втомного зносу деталей об'ємного гідроприводу мобільних машин. Геотехнічна механіка. 2013. №108. С. 133–142.
4. Калганков Є.В. Технічне діагностування об'ємних гідроприводів трансмісії як об'єктивна необхідність. У: Матеріали III Всеукр. наук.-практ. заочної конф. «Сучасна наука: теорія і практика». Запоріжжя, 2012. Т.II. С. 88–90.
5. Melyantsov P.T., Kalgankov E.V. Organizacja wykorzystania techniki w warunkach deficytu materialno-technicznych zasobów. Inżynieria i technologia. Teoria. Praktyka. 2010. S. 84–87.
6. Баранчук В.А., Баладін Ю.П. Відновлення деталей машин: технологія і обладнання. Київ: Вища школа, 2004. 423 с.
7. Лелеко В.Д., Філонов В.П. Технологія відновлення деталей машин. Харків: ХНТУ, 2011. 310 с.
8. Дьяків О.О., Дьяків С.О. Технологічні процеси відновлення й зміцнення деталей машин. Київ: Каравела, 2018. 256 с.
9. Войнов І.В., Качан А.І. Наплавлення та напилення в машинобудуванні. Київ: Либідь, 2009. 298 с.
10. Тарасюк В.Г. Технологія технічного обслуговування і ремонту машин. Львів: Новий Світ-2000, 2012. 364 с.
11. Черненко С.О., Сопильняк І.П. Діагностування технічного стану автотракторних двигунів. Київ: Аграрна освіта, 2015. 276 с.
12. Kalpakjian S., Schmid S. Manufacturing Engineering and

Technology. 7th ed. Pearson, 2014. 1216 p.

13. Rao S.S. The Finite Element Method in Engineering. 6th ed. Butterworth-Heinemann, 2017. 782 p.

14. Budynas R.G., Nisbett K.J. Shigley's Mechanical Engineering Design. 10th ed. McGraw-Hill, 2015. 1136 p.

15. Totten G. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, 2002. 499 p.

16. Banhart J. Advanced Methods in Materials Testing. Springer, 2018. 324 p.

17. Taylor C.M. Engine Tribology. Elsevier, 1993. 320 p.

18. Obert E.F. Internal Combustion Engines and Air Pollution. Harper & Row, 1973. 552 p.

19. Stachowiak G., Batchelor A. Engineering Tribology. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2013. 884 p.

20. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. Wiley, 2008. 656 p.

21. Lampman S. (Ed.) ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM International, 2005. 1200 p.

22. Basu B., Sujata M. Engineering Materials and Metallurgy. Tata McGraw-Hill, 2011. 538 p.