

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

на тему: **«Підвищення довговічності колінчастих валів двигунів на-
несенням зносостійкого покриття»**

Виконав: студент II курсу групи Маш-22сп

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва)

Євген ГУТ

(Ім'я та прізвище)

Керівник: д.т.н. проф. Віталій ВЛАСОВЕЦЬ

(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.
“ _____ ” _____ 2023 р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту
Гут Євгену Тарасовичу

1. Тема роботи: **«Підвищення довговічності колінчастих валів двигунів нанесенням зносостійкого покриття»**

Керівник роботи: Власовець Віталій Михайлович, д.т.н., професор

Затверджена наказом по університету від 30.12.2022 року № 453/К-С

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 23.06.2023 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою відомих технологічних процесів поверхневого зміцнення; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; Методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення у виробництво.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Огляд інформаційних джерел і завдання дослідження

2. Оцінка зносу і пошкодженості колінчастих валів та вимоги до покриття

3. Оцінка покриття та технологія його нанесення.

4. Охорона праці.

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

1. Пошкоджуваність колінчастих валів при експлуатації - 1-ий аркуш.

2. Основні технологічні процеси відновлення навантажених деталей автотракторних двигунів - 2-ий аркуш.
3. Оцінка похідної структури колінчастого валу на показники магнітного контролю - 3-ий аркуш.
4. Вплив режиму обробки на властивості – 4 -ий арк.
5. Зміна властивостей зразків після гартування – 5 -ий арк.
6. Розробка вимог до ефективного матеріалу покриття – 6-ий арк.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата		Відмітка про вико- нання
		завдання видав	завдання прийняв	
1,2,4,5	Власовець В.М., д.т.н., проф. кафедри машинобу- дування			
3	Городецький І.М., к.т.н., до- цент кафедри УПБВ			

7. Дата видачі завдання: 30.12.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	<i>Виконання розділу: «Огляд інформацій- них джерел і завдання дослідження»</i>	23.01.23-17.02.23	
2.	<i>Виконання другого розділу: «Оцінка зносу і пошкодженості колінчастих валів»</i>	20.02.23-11.04.23	
3.	<i>Виконання третього розділу: «Вимоги до покриття та технологія його нанесення»</i>	12.04.23-26.06.23	
4.	<i>Виконання розділу: «Охорона праці»</i>	29.05.23-15.06.23	
5.	<i>Завершення оформлення розрахунково- пояснювальної записки. Завершення ро- боти в цілому</i>	16.06.23-23.06.23	

Студент _____ Євген ГУТ
(підпис)

Керівник роботи _____ Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(підпис)

УДК 664. 0025

Підвищення довговічності колінчастих валів двигунів нанесенням зносостійкого покриття

Гут Є.Т. - Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2023.

46 с. текст. част., 7 рис., 6 табл., 29 джерел, презентація графіч. част.

Виконано аналіз причин відмов в експлуатації колінчастих валів. Встановлено основні технології поновлення їх ресурсу. Обґрунтовано вимоги щодо рівня міцності зчеплення покриття для відновлення робочих поверхонь колінчастого валу. Ці вимоги забезпечили використанням покриття з добавками додаткових легуючих елементів молібдену, ванадію, титану.

Застосування покриття, що рекомендується, дозволить збільшити експлуатаційну стійкість відновлених деталей, за рахунок підвищення міцності зчеплення з основою до 2 разів.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	7
1.1. Аналіз конструкції, призначення, умови експлуатації колінчастих валів	7
1.2. Матеріали та технології виготовлення колінчастих валів автотракторних двигунів	11
1.3. Аналіз технологій відновлення колінчастих валів	13
Висновки, мета та завдання дослідження	22
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА ЗНОСУ І ПОШКОДЖЕНОСТІ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ ТА ВИМОГИ ДО ПОКРИТТЯ	23
2.1. Методика проведення досліджень	23
2.2. Ушкодження та знос колінчастих валів. Аналіз можливості їх відновлення шляхом формування електрометалізаційного покриття	25
2.3. Вимоги до матеріалу покриття. Оцінка працездатності колінчастого валу двигуна, відновленого шляхом формування електрометалізаційного покриття	30
2.4. Визначення ефективності вибраного матеріалу покриття	36
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	38
4.1. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори	38
4.2. Аналіз стану охорони праці	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42

ВСТУП

У зв'язку з схемою використання сільськогосподарської техніки, що склалася в Україні в останні роки, - тракторів, сільськогосподарських машин, коли до 75-80% від її складу перебуває в експлуатації з вичерпаним гарантованим терміном, виникає гостра необхідність у забезпеченні її довговічності при ремонті та технічному обслуговуванні. Це насамперед відноситься до двигунів внутрішнього згоряння. Підвищення експлуатаційних властивостей відповідальних і дорогих деталей, до яких, перш за все, можна віднести колінчастий вал дозволить суттєво збільшити ресурс вузла.

До методів, якими традиційно відновлюються такі деталі, відносяться, перш за все, наплавлення і зварювання, нанесення гальванопокриттів. Однак дані методи здебільшого знижують міцність деталей, а в ряді випадків і не забезпечують необхідний рівень якості та експлуатаційних властивостей.

Найбільш ефективним, з точки зору підвищення ресурсу деталей та зниження вартості ремонту, є застосування покриттів, нанесених газотермічними методами, і, насамперед, електродуговою металізацією. Основним недоліком таких покриттів є невисока міцність зчеплення із основою. Переваги методу: незначне нагрівання деталі, яке практично не змінює структуру матеріалу основи і не знижує її втомну міцність; ефективність застосування, зумовлена, з одного боку, високою продуктивністю процесу, низькою вартістю обладнання, з другого – можливістю легкого регулювання параметрів технології напилення. Така технологія нанесення покриттів дозволяє проводити багаторазове відновлення придатних для подальшого використання деталей. Однак покриття, нанесені даним методом, у ряді випадків мають недостатню міцність зчеплення з основою, і тому часто мають обмежене застосування. Тому робота спрямована на розв'язання практичної проблеми галузевого машинобудування, а саме на підвищення довговічності к.в. валів двигунів нанесенням зносостійкого покриття. Обґрунтування вибору складу покриття, що забезпечує підвищення міцності зчеплення.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз конструкції, призначення, умови експлуатації колінчастих валів

Збитки, які щорічно завдаються сільському господарству внаслідок передчасного виходу з ладу деталей автотракторних двигунів, особливо в період посівного та збирання врожаю, оцінюються сотнями мільйонів гривень. Витрати металу на запасні частини таких машин досягають рівня його споживання під час виробництва нових виробів. У таких умовах доцільним та економічно виправданим є, насамперед, відновлення, навантажених, відповідальних та дорогих деталей двигуна, що суттєво обмежують його ресурс. До таких деталей слід передусім віднести колінчастий вал [1-5].

Дана деталь знаходиться під впливом зовнішніх сил і моментів від сил тиску газів і сил інерції мас, що рухаються, є періодичними функціями кута повороту кривошипа. Одночасно у валі виникають знакозмінні напруги від крутильних та згинальних коливань. Нерівномірність посилюється концентрацією напружень у галтелях щік і у країв масляних отворів шийок валу. У зв'язку з цим дійсна напруга значно перевищує номінальну.

Поломки колінчастого валу, як показує статистика дефектів [6], носять звичай втомний характер і викликаються змінною напругою вигину і кручення. Руйнування окремих елементів кривошипу починається у місцях концентрацій напружень: у країв масляних отворів корінних та шатунних шийок або у місцях сполучення шийок, із щоками (галтелях). При втомному руйнуванні шийки валу від змінних напружень кручення на поверхні шийки утворюється спіральна тріщина, що йде від країв масляного отвору в напрямку щік. Втомне руйнування шийки від змінної напруги вигину, стиснення - розтягнення і крутіння починається в середині щоки по перерізу жолобника - в місці максимальної концентрації напружень. Чинники, що визначають міцність валу та його конструктивні особливості, наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Чинники, що визначають міцність валу та його конструктивні особливості

Чинники, що визначають міцність валу	Чинники, що визначають конструктивні особливості валу
<ul style="list-style-type: none"> - розмір та форма окремих елементів кривошипу - корінні та шатунні шийки, щоки; - концентрація напружень, що виникає в галтелях (місця переходу від шийок до щік) та у країв масляних отворів у шийках; - межа плинності, межа витривалості матеріалу при згині та знакозмінному крученні; - Метод зміцнення – механічне, хіміко-термічне та термічне; - Неспіввісність корінних опор картера та биття корінних шийок, що викликають пружні деформації валу та навантаження підшипників з наступними втомними його руйнуваннями; - Спосіб виготовлення та матеріал валу (сталевий штампований або чавунний литий) 	<ul style="list-style-type: none"> - число корінних та шатунних підшипників; - Конструкція блоку циліндрів (окремі циліндри або блоки циліндрів, мокрі та сухі гільзи); - конструкція головки циліндрів (загальна головка для всіх циліндрів або роздільні на один, два, три циліндри); - тип зчленування шатунів у V – образних двигунах (центральне зчленування, з причіпним шатуном, послідовне розміщення двох шатунів на одній шийці);

У бензинових однорядних двигунах з меншими тисками згоряння застосовуються в основному повноопорні колінчасті вали і, за рідкісним винятком, вали з опорами через два циліндри – двопрогонові (рис. 1.1, а).

Розміри корінних шийок вибирають з урахуванням отримання необхідної міцності, що допускаються умовних тисків, віднесених до проекції опорної пове-

рхні, і жорсткості на кручення, що впливає на частоту власних коливань системи валу, а, отже, і резонансну частоту його коливань.

Переходи (галтелі) від щік до корінної та шатунної шийок, щоб уникнути виникнення великих концентрацій напруги роблять радіусом, рівним 0,06-0,08 від діаметра останньої.

Для розвантаження корінних підшипників двигуна на колінчастий вал встановлюють противаги. Їх кріплення, що здійснюється за допомогою ластівчиного хвоста (рис. 1.2, а) дозволяє розвантажити кріпильні болти від дії відцентрових сил. У конструкції, зображеній на рис. 1.2, б, то монтажні болти додатково завантажений лише після затягування під дією відцентрових сил від маси противаг.

Масило від корінних шийок до шатунних подається по просвердлених каналах (див. рис. 1.1, а і б), або, запресованих трубок.

Незважаючи на наявність внутрішніх порожнин для центрифугування олії знос шатунних шийок і підшипників переважно вище, ніж корінних. Це пояснюється їх вищою навантаженістю, підвищеним температурним режимом роботи та відповідно зниженою несучою здатністю масляного шару.

Останніми роками отримали широке застосування цільнолиті колінчасті вали, встановлювані як і карбюраторних двигунах, і у дизелях. До переваг таких колінчастих валів відносяться: менша витрата металу на їх виготовлення, скорочення операцій обробки; підвищення втомної міцності при експлуатації.

Внутрішні порожнини у литих колінчастих валів роблять бочкоподібними, а щоки - з кишнями, що розвантажують.

Мінімальні запаси міцності шатунних шийок по перерізу масляних каналів для чавунних валів лежать у межах 3,3-3,5 та для щік у зоні жолобників на рівні 3,5-4,0.

При зазначених величинах запасів міцності полумок колінчастих валів за умов експлуатації немає. Надійність чавунних валів при відносно малих запасах міцності пояснюється меншою чутливістю чавуну до концентрації напружень, більш рівномірним розподілом напружень за обсягом та його підвищеними властивостями, що демпфують.

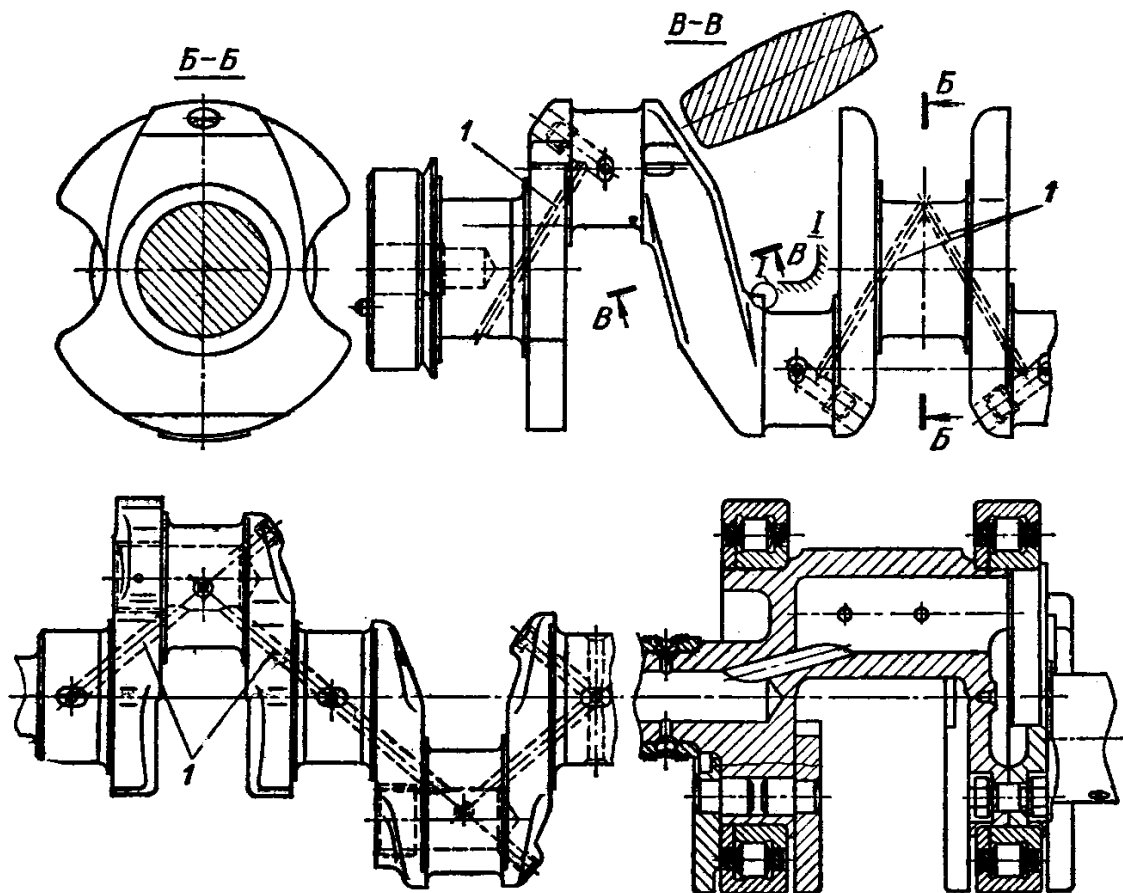


Рисунок 1.1 – Сталеві штамповані колінчасті вали

а - з опорами через два циліндри; б - повноопорний; в – збірний (1 – масляні канали)

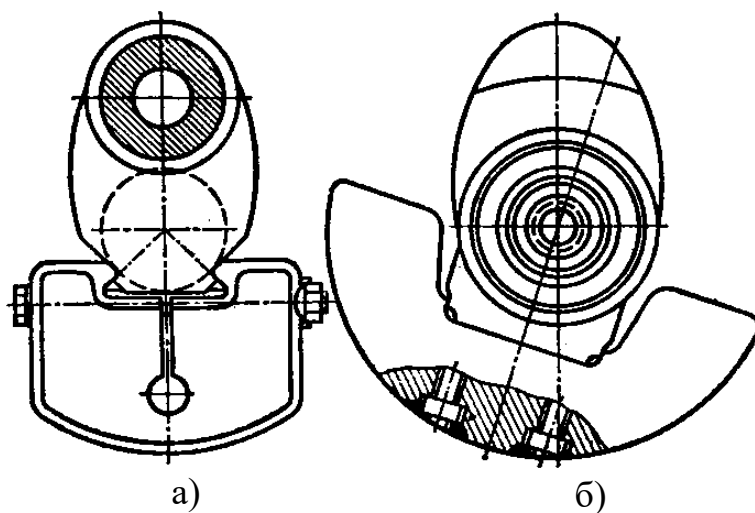


Рисунок 1.2 – Способи кріплення противаг

а – за допомогою ластівчиного хвоста; б – з додатковим навантаженням болтів кріплення відцентровими силами маси противаг

1.2. Матеріали та технології виготовлення колінчастих валів автотракторних двигунів

Для того, щоб забезпечити якісне нанесення покриття, необхідно ознайомитися з хімічним складом матеріалів, що застосовуються при виробництві деталей, способами виробництва та зміцнення поверхонь. Як матеріал при виробництві колінчастих валів автотракторних двигунів застосовують різні марки сталей і чавунів, які найбільшою мірою відповідають вимогам, що пред'являються до даних. Вироби формують штампуванням та литтям.

У литих валах виникають менші концентрації напружень, і вони мають підвищену втомну міцність. У литих колінчастих валів при меншій механічній міцності чавуну допускаються підвищені амплітуди напруги при згині та крученні до 90-100 МН/м². Маса повністю обробленого литого колінчастого валу в існуючих конструкціях зменшується на 10-15% [7]. Незважаючи на ефективне використання таких валів, ще досить широко застосовуються і сталеві ковані, виготовлені зі сталі 45. Тому при нанесенні покриттів слід розглядати обидва ці матеріали.

У вітчизняній автотракторній промисловості штамповані колінчасті вали, в основному, виготовляють із середньовуглецевої та марганцовистої. Для виробництва валів серійних тракторних часто також застосовується сталь марки 45. Твердість заготовок знаходиться у межах 163-197 НВ. Крім цього, колінчасті вали виготовляють також і з легованих сталей, зокрема хромистих - сталь 40Х [8].

Для виготовлення колінчастих валів на автотракторних двигунів за кордоном (США, Великобританія, Німеччина [8]) застосовують, в основному, леговані середньовуглецеві сталі. Довговічність колінчастих валів залежить не тільки від марки сталі, але і від застосовуваного процесу попередньої термічної обробки, який забезпечує отримання необхідних механічних властивостей, готує мікроструктуру металу валу для остаточного поверхневого гарту, а також забезпечує хорошу оброблюваність різанням. Поширені два основні види попередньої термічної обробки: нормалізація та покращення.

Нормалізацію поковок колінчастих валів сталі марки 45 здійснюють при 850-870°C; час витримки при нагріванні вибирають з таким розрахунком, щоб одержати після охолодження поковки на повітрі однорідну мікроструктуру з невеликим розкидом по твердості (не більше 163-197 НВ). Поліпшення поковок валів з тієї ж сталі складається із гарту у воду з 850-870°C високої відпустки на твердість 255-285 НВ. Температурні режими нормалізації та покращення вибирають залежно від марки сталі. Однак за такої технології термічної обробки виникають деформації валу та нерівномірність розподілу твердості. Альтернативною технологією, позбавленою певною мірою даних недоліків, є термообробка в соляних ваннах, що передбачає нагрівання протягом 20 хв у ванні при 850°C, різке охолодження водою до 315°C, високу відпустку при 580°C на твердість 248-2.

Остаточною операцією термічної обробки колінчастих валів є поверхневе загартування корінних і шатунних шийок з нагріванням струмами високої частоти. Відомо, що чим глибше загартований шар, тим деформація колінчастого валу збільшується і зменшується ефективний робочий переріз. Тому твердість 52 HRC на шийці колінчастого валу встановлюється на глибині до 2,14 мм, а на жолобник до 1,5 мм. Відпуск жолобників проводиться при температурі 270°C. У зв'язку з тим, що слідом за термічною обробкою слід механічна (зі значним припуском на обробку), то товщина загартованого шару, що має необхідну твердість (не менше 52 HRC) зменшиться. У процесі експлуатації відбувається подальше зменшення товщини з кожним ремонтним розміром на 0,25 або 0,50 мкм. В результаті на момент закінчення експлуатації товщина знятого металу перевищує 2,5 мм, що відповідає шару, що має лише окремі зерна мартенситу відпустки (40 HRC). Тому при нанесенні відновлювальних покриттів на вал після останнього ремонтного розміру немає необхідності додаткового знімання матеріалу. У разі нанесення покриття на деталь в період експлуатації, необхідно для підвищення міцності зчеплення та збільшення її післяремонтного ресурсу, провести механічну обробку з припусками, достатніми для усунення структур загартованого шару.

Сучасні досягнення в галузі ливарного виробництва дозволяють отримувати

ти литі колінчасті вали з високою точністю і тим самим суттєво скоротити витрати металу. Застосування пустотілого литого валу дає додаткову можливість знизити його вагу та забезпечити більш рівномірні умови кристалізації. При переході від штампованої заготовки до виливки маса заготовки знижується більш ніж 20%, а відходи металу в стружку зменшуються більш як 50% [8].

Все більшого поширення останнім часом при виробництві литих колінчастих валів набувають чавуни з включеннями графіту кулястої форми. Це пов'язано з тим, що дані чавуни добре поглинають вібрацію в умовах високих циклічних навантажень, мають хорошу зносостійкість, опір тепловим і корозійним впливам.

В результаті проведеного аналізу матеріалів і технологій, що використовуються в даний час при виробництві найбільш навантажених і дорогих деталей автотракторних двигунів колінчастих валів, встановлено, що серед найбільш поширених отримали середньовуглецеві сталі і різні види чавунів. Найбільш ефективними завдяки гарному поєднанню фізико-механічних і ливарних властивостей є високоміцні чавуни з включеннями графіту кулястої форми. Однак високотемпературна термообробка таких матеріалів супроводжується виникненням високого рівня напруги, що пов'язано зі значною кількістю дефектів у виливках (раковини, бульбашки, пори), а також схильністю до формування твердих та крихких структурних складових – мартенситу та ледебуриту, що викликають утворення тріщин. У разі традиційні методи відновлення, засновані на високотемпературних процесах наплавлення і зварювання, виявляються непридатними. Тому особливу гостроту нині набуває питання вибору ефективної технології відновлення навантажених і дорогих деталей, що забезпечує високий рівень якості без істотного прогріву поверхні, у якому має місце формування у перехідній зоні термічного впливу загартованих структур.

1.3. Аналіз технологій відновлення колінчастих валів

Основне завдання нанесення покриттів та зміцнення робочого шару при ремон-

ті колінчастих валів пов'язане з відновленням необхідної точності розмірів, форми, взаємного розташування поверхонь, забезпечення необхідних властивостей робочих поверхонь із збереженням достатньої міцності деталі в цілому. У процесі експлуатації колінчастого валу виникають різні дефекти (див. табл. 1.1) та деякі з них відновити загальноприйнятими методами неможливо [9].

Основними дефектами, що обмежують ресурс колінчастого валу, є знос корінних та шатунних шийок, тріщини та задираки на окремих шийках [10].

Встановлено, що у процесі експлуатації межа витривалості колінчастих валів загалом знижується на 20-30% [11]. Це пов'язано здебільшого з накопиченням втомних ушкоджень. При цьому у валів карбюраторних двигунів вони накопичуються переважно в центральній частині шийок - в зоні отворів маслопроводних, а у дизельних - в зоні переходу галтелі в щоки валу. Небезпечним навантаженням для дизельних двигунів вважається згинальний момент, а для карбюраторних – крутний. Тому типові руйнування колінчастих валів перших відбуваються по щоках, других – по шийках. При традиційному шліфуванні валів карбюраторних двигунів у ремонтний розмір видаляються поверхневі шари матеріалу шийок з втомними ушкодженнями, що накопичилися. Все це сприяє відновленню ресурсу деталі. Повністю видалити таким способом напружені та гранично зруйновані шари металу валів дизельних двигунів у зоні жолобників важко, тому їх ресурс часто не вдається відновити. Таким чином, проблема відновлення колінчастих валів найбільш навантажених дизельних двигунів зводиться до зняття напруги в зоні жолобника та створення умов, спрямованих на зменшення накопичень втомних ушкоджень.

Традиційні методи відновлення працездатності шийок колінчастих валів [12] можна розділити на дві основні групи: розточування до ремонтних розмірів та відновлення нарощуванням до номінальних.

Внаслідок простоти та низької вартості [13], метод перешліфування шийок у ремонтний розмір є найбільш поширеним. Однак він має недоліки. Встановлено, що поєднання вал – вкладиш з перешліфуваними (зменшеними) у ремонтний розмір шийками часто має знижений термін служби [12]. Починаючи з третього ремонтного розміру, знос корінних шийок збільшується на 15-20% проти новими, а межа витрива-

лості знижується на 20% [13]. Цей факт пов'язують із зменшенням поверхневої твердості матеріалу деталі. Так, середня твердість шийок нового колінчастого валу становить 51,1 HRC. Для гранично зношеної шийки, вона дорівнює 44,1 HRC, що нижче за вимоги. Одним із способів, що підвищують ресурс таких колінчастих валів за рахунок збільшення зносостійкості поверхневого шару, є застосування азотування після кожних двох перешліфувань [14].

Вимогам забезпечення якості та надійності задовольняють ті способи відновлення геометричних параметрів шийок до номінальних розмірів, у яких числові значення відношень твердості та межі втомної міцності відновлених і нових колінчастих валів більше або одно одиниці. Тому в ремонтній практиці застосовують в основному механізоване електродугове наплавлення під шаром флюсу. Цим методом відновлюють близько 95% всіх колінчастих валів автотракторних двигунів.

Особливий інтерес представляє залучення під час ремонту колінчастих валів, технологій відновлення, основою яких закладено мінімальний температурний вплив на матеріал деталі. До них, перш за все, слід віднести газотермічні методи, сутність яких полягає в утворенні направленої потоку дисперсних крапель матеріалу, що напилюється на деталь. Головна відмінність даних технологій від традиційних методів наплавлення полягає практично у відсутності зони термічного впливу, можливості формування покриттів практично з будь-якими заданими властивостями, у ряді випадків відносна простота технологічного процесу та обладнання, що застосовується. Основний недолік – порівняно невисока міцність зчеплення покриттів із підкладкою (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 - Переваги та недоліки основних видів газотермічних методів нанесення покриттів

Переваги	Недоліки
Плазмово-дугова металізація	
<ul style="list-style-type: none"> - можливість отримання покриттів з різних матеріалів без обмеження за температурою плавлення; - Можливість використання для утворення струменя дугової плазми газів різного роду: інертних (аргону, гелію), відновлювальних (водню) та окисних (повітря, азоту), що дозволяє в широких межах регулювати властивості середовища, в якому нагріваються та рухаються краплі; - можливість гнучкого регулювання електричного та газового режимів роботи плазматрону, у тому числі в процесі нанесення покриття; 	<ul style="list-style-type: none"> - низька для низки умов експлуатації міцність зчеплення покриття з підкладкою (10-50 МПа при випробуваннях на відрив); - невисокий коефіцієнт корисного використання енергії плазмового струменя на нагрівання порошку (2-8%); - Високий рівень шуму (110-130 дБ) та випромінювання; - Висока вартість обладнання та його стаціонарність
Газополум'яна металізація	
<ul style="list-style-type: none"> - можливість отримання покриттів з більшості матеріалів, що плавляться при температурі до 3000°C без розкладання; - відносно низький рівень шуму та світлових випромінювань; - Легкість та простота обслуговування, невисокі вартість та мобільність обладнання, що дозволяє виробляти напилення на місці, без демонтажу виробів. 	<ul style="list-style-type: none"> - Обмеження напилюваних матеріалів за температурою плавлення (не більше 3000°C); - низька міцність зчеплення покриттів із основою; - Невисокий коефіцієнт використання енергії газополум'яного струменя на нагрівання порошкового матеріалу (2-12%).

Продовження табл. 1.2

Детонаційне напилення	
<ul style="list-style-type: none"> - Можливість отримання покриття з підвищеною міцністю зчеплення (10-160 МПа) і щільністю (пористість 0,5-1%) завдяки високій кінетичній енергії крапель матеріалу, що наноситься; - можливість нанесення покриттів з високою міцністю зчеплення на деякі види підкладок (сталь, нікелеві сплави та ін.) без струменево-абразивної підготовки поверхні; - Відносна простота конструкції установки. 	<ul style="list-style-type: none"> - високий рівень шуму (125-140дБ), виділення окремого приміщення для обробки
Електродугова металізація	
<ul style="list-style-type: none"> - висока продуктивність процесу (до 50 кг/год); - високий коефіцієнт корисного використання енергії електричної дуги на нагрівання дроту (70-90 %); - Легкість зміни ентальпії напилюваних крапель у широких межах 2000-10000 кДж/кг; - можливість отримання покриття з високою міцністю зчеплення (до 60-80 МПа) завдяки застосуванню порошкових дротів та проміжних шарів з покращеними адгезійними властивостями. 	<ul style="list-style-type: none"> - інтенсивна взаємодія частинок з активною газовою фазою; - використання для напилення тільки дроту; - Високий рівень шуму (110-130 дБ).

Вибір способу підготовки поверхні при відновленні найбільш навантажених і дорогих деталей автотракторних двигунів – колінчастих валів, насамперед, визначається максимальною міцністю зчеплення покриття з матеріалом основи. Встановлено, що способи, що забезпечують поверхневий наклеп (накатка, обробка дробом та ін), підвищують міцність втоми на 20-30 %; способи, що створюють на виробі концентратори напружень і викликають нерівномірні зміни структури основного металу (нарізка різьблення і різних канавок, електроіскрова та електродугова обробка, насічка зубилом та ін), знижують втомну міцність (до 60%) від початкової [15]. Найбільший позитивний ефект при відновленні зазначених вище деталей, дають струменево-абразивні методи, що пов'язано з оптимальним поєд-

нанням межі витривалості та міцності зчеплення.

Таблиця 1.3 - Вимоги до деталей, що відновлюються, і поверхні, підготовленої під напилення

Вимоги до деталей, підготовлених до нанесення покриттів	Вимоги, що висуваються до поверхні
<ul style="list-style-type: none"> - На поверхні виробів не повинно бути задирок, зварювальних бризок від попередніх ремонтів, припалів, раковин, тріщин. Поверхня повинна бути вільна від окалини, іржі, окислів і різних забруднень; - Розміри внутрішніх поверхонь, що напиляються (діаметр, довжина) повинні відповідати технічній характеристиці установки для напилення. При використанні стандартного обладнання покриття наноситься на внутрішні поверхні, відкриті з двох сторін, якщо відношення довжини діаметром не перевищує 1,8; - Покриття на виїмки та глухі отвори слід наносити за відношення ширини або діаметра отвору до його глибини понад 2. 	<ul style="list-style-type: none"> - підготовлена поверхня повинна мати кімнатну температуру; якщо температура виробу нижче 0°C, перед операцією підготовки його підігривають до кімнатної температури, так як конденсаційний шар вологи значно знижує міцність зчеплення покриття з основним матеріалом; - розміри зони спеціальної обробки повинні бути на 5-20 мм більше зони напилення (для блок-картерів); - необхідно оберегати підготовлену поверхню від зіткнення з олією, водою; не чіпати руками; при обробці та нанесенні покриттів використовувати чистий знежирений інструмент або рукавиці; - При необхідності транспортування підготовлений виріб слід упаковувати у папір або спеціальну тару.

У процесі експлуатації колінчастий вал накопичує на поверхні та в порах залишки паливно-мастильних матеріалів, асфальто-смолисті відкладення, нагар, накіп, оксиди, продукти корозії, що зменшує міцність зчеплення покриття з мета-

лом деталі. Тому при підготовці поверхні до нанесення покриттів перед дробоструминною обробкою поверхню деталей знежирюють різними методами.

Отвори для мастила, щоб уникнути пошкоджень і попадання в них крапель, закупорюють гумовими термостійкими пробками [16].

Параметри технологічного процесу очищення поверхні металевим дробом залежать від фізико-механічних властивостей абразиву, його параметрів (тиску стисненого повітря, швидкості його витікання із сопла, відстані від сопла до оброблюваної поверхні, кута атаки), а також від структури та фізико-механічних властивостей деталі, що відновлюється. [17].

В результаті дій абразивних зерен, деформований зміцнення шару 0,2-0,4 мм довжиною передбачений, що підвищує рівень енергії і дифузійну проникність металу. З подальшим мікроударного дією абразивних частинок, через нездатність кристалічної решітки до подальшого зміцнення, необоротне явище «повторне зміцнення» може статися - металевий послаблюється, з'являються тріщини [18].

Для попередньої обробки поверхні перед напиленням блок-картерів використовують електрокорунд цирконієвий або білий з зернистістю 80-125, а також сталевий або чавунний колотий дріт ДСК і ДЧК №08К і №15К. При цьому не допускається наявність у ньому слідів іржі. Металевий дріб рекомендується для обробки матеріалів з твердістю до HRC 50 (переважно до HRC 40). Циклічну стійкість сталевого дробу, згідно з рекомендаціями [19], можна підвищити до 10 разів, змінивши її структуру з крупнодисперсного мартенситу до трооститу та дрібнодисперсного мартенситу. Для цього проводять нагрівання під загартування дробу до $(780-830) \pm 10^\circ\text{C}$ (залежно від розміру фракцій) у захисному середовищі, охолодження у воді та середньотемпературну відпустку при $360 \pm 20^\circ\text{C}$.

Після дробоструминної обробки деталь обдують стисненим повітрям для видалення абразиву. Поверхні, що не підлягають напиленню, захищають [20].

Після попередньої підготовки виробляють напилення. Принципова схема процесу електродугової металізації представлена на рис. 1.3.

Горіння дуги відбувається за умов впливу потужного швидкісного потоку газу. Площа активних плям на електродах обмежена невеликими діаметрами дро-

тів, що використовуються для розпилення. Це зумовлює стиснення стовпа дуги. Іншою особливістю горіння дуги є мінливість її довжини. Принципово можливі дві схеми горіння: без коротких замикань та з періодичними замиканнями. Їх характер визначається, перш за все, родом струму та режимом процесу. При живленні дуги змінним струмом уникнути коротких замикань неможливо. Застосування джерел постійного струму дає можливість ведення процесу, як із короткими замиканнями, і без них. І тут у горінні дуги простежується циклічність [21].

Виробничий досвід застосування покриттів, нанесених електродуговим напиленням, показав [22], що їх механічну обробку доцільно проводити наступних режимах. При токарній обробці швидкість різання 15-16 м/хв, глибина різання 0,1-0,5 мм, подача 0,1-0,5 мм/об. Різці слід застосовувати з напаяними пластинами із твердих сплавів вольфрамової або титановольфрамової групи.

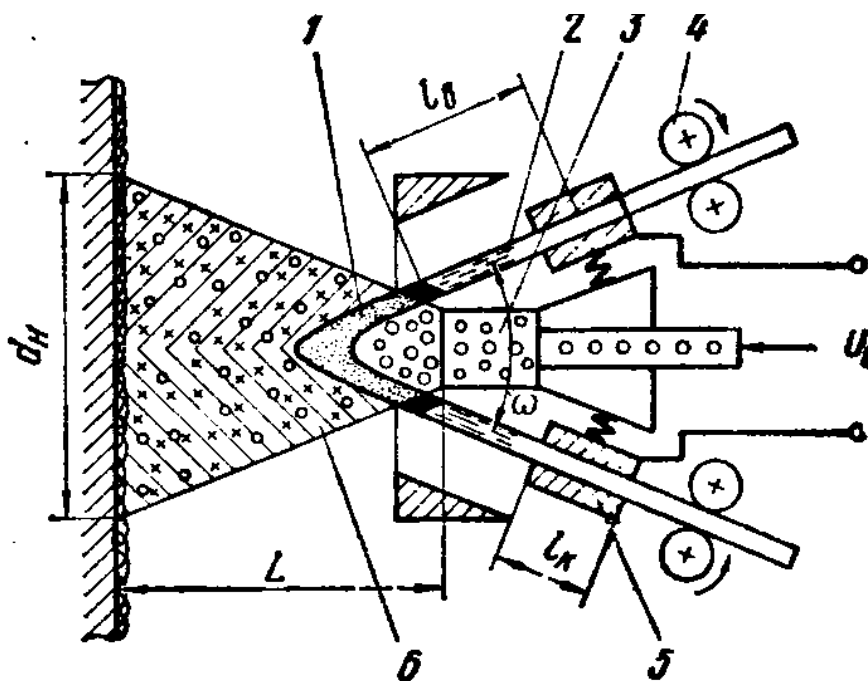


Рисунок 1.3. Схема процесу електродугової металізації

1 – зона горіння дуги; 2 – дріт; 3 – повітря; 4 – механізм подачі проволочки;
5 – напрямні; 6 – потік повітря; l_k - довжина контакту; l_v - довжина вильоту дрота; d_n – діаметр пята напилення; L – відстань від сопла металізатора, до поверхності; ω - кут між електродами

При чорновому шліфуванні швидкість обертання кола 20-25 м/с швидкість обертання деталі 10-12 м/хв, глибина різання до 0,02 мм, подача до 0,7 м/хв. При чистовому шліфуванні швидкість обертання кола 25-30 м/с швидкість обертання деталі 12-15 м/хв, глибина різання до 0,005 мм, подача до 0,4 м/хв. Покриття, нанесені напиленням дроту з підвищеним вмістом вуглецю, найдоцільніше шліфувати корундовими колами М7 або М8. Рекомендується використовувати електрокорундові круги зернистістю 40-60 на зв'язці М1, М2. Для шліфування покриттів, нанесених електродуговим напиленням дротиками Св-15ГС, Св-15С2 або Нп-30ХГСА, рекомендується використовувати круги з абразивного матеріалу 44А зернистістю 30 на керамічному зв'язуванні, що мають структуру 9 і твердість СМ2.

При відновленні деталей методом електродугової металізації широко використовують серійні установки електродугового напилення типу КДМ-2 та стаціонарні металізатори ЕМ-12М та ЕМ-15.

На підставі аналізу існуючих технологій відновлення деталей можна зробити висновок, що основним способом збільшення міцності зчеплення покриттів з основою є нанесення додаткових проміжних шарів, що мають підвищені адгезійні властивості. При цьому найкращих показників досягають при використанні молібдену [23]. Однак, за даними [24], його використання може погіршити експлуатаційні властивості деталей. Тому для визначення можливості застосування проміжного молібденового шару для відновлення деталей, що працюють в умовах підвищених навантажень, необхідно провести додаткові дослідження.

Незважаючи на широке поширення методу електродугової металізації при відновленні деталей різних машин отримання покриттів, що володіють високими якісними характеристиками, придатними для відновлення навантажених деталей автотракторних двигунів, є досі складною проблемою [20]. Так, дані, отримані дослідниками по міцності зчеплення різних покриттів з основою, коливаються у межах від 14-18 МПа [21], до 60-80 МПа [24]. Немає єдиної думки у питанні зносостійкості напилених матеріалів [15-18]. Тому виникає необхідність у вивченні процесів структуроутворення при формуванні покриттів, нанесених електродуговою металізацією, що мають високу міцність зчеплення.

Висновки, мета та завдання дослідження

На підставі дослідження умов роботи найбільш навантажених, відповідальних та дорогих деталей автотракторних двигунів – колінчастих валів, зміни їх якісних характеристик у процесі експлуатації та після відновлення, а також на підставі огляду літературних джерел можна зробити такі висновки:

1. При виробництві колінчастих валів найбільшого поширення набули різні види сталей та чавунів. Проте високотемпературна термообробка таких матеріалів супроводжується виникненням високого рівня напружень, а також схильністю до формування твердих і крихких структурних складових – мартенситу та ледебури-ту, що викликають утворення тріщин. У разі традиційні методи відновлення, засновані на високотемпературних процесах наплавлення і зварювання, виявляються непридатними.

2. Встановлено, що одним з найбільш ефективних методів з точки зору вартості та ефективності використання є газотермічні, зокрема використання методу електродугової металізації.

Виходячи з вищевикладеного, метою роботи є підвищення довговічності колінчастих валів нанесенням покриття з використанням методу електродугової металізації. Необхідно, також, вирішити наступні завдання:

- дослідити основні дефекти колінчастих валів в експлуатації;
- сформулювати вимоги до технології нанесення та матеріалу покриття;
- на основі вивчення можливості забезпечення найкращої зчеплюваності нанесеного шару з матеріалом відновлюваної деталі та задоволення вимог експлуатації обґрунтувати вибір складу компонентів покриття.

РОЗДІЛ 2

ОЦІНКА ЗНОСУ І ПОШКОДЖЕННОСТІ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ ТА ВИМОГИ ДО ПОКРИТТЯ

2.1 Методика проведення досліджень

Хімічний склад досліджуваного матеріалу колінчастих валів, а також покриття наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад матеріалу колінчастих валів та матеріалу покриття для відновлення

Матеріал	Зміст хімічних елементів, % мас.					
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Mg</i>
Сталь 40X ¹	0,45-0,50	0,17-0,37	0,5-0,8	до 0,04	до 0,04	-
Покриття для відновлення ²	0,08-0,15	до 0,5	до 0,8	до 0,04	до 0,02	-

Як матеріал покриття використовували порошковий дріт на основі ферохромалюмінію легований додатковими легуючими компонентами – Мо, Ті, V. Покриття невеликої товщини, що компенсують незначну величину зношування (до 0,5 мм) оцінювали на спеціально приготовлених зразках. Перед напиленням проводили очищення та відпал при температурі від 200 до 250°C (1-1,5 год.). Така обробка мала стабілізувати мікронапруження робочого шару. Відпалений колінчастий вал піддавали дробеструменевій обробці механічною сумішшю чавунного дробу та кварцового піску під тиском $0,5 \pm 0,05$ МПа і швидкістю повітряного потоку $2,5 \text{ м}^3/\text{хв}$. Дистанцію обробки змінювали в межах 130-150 мм. Кут нахилу падіння робочої суміші до оброблюваної поверхні змінювали від 55 до 70°. Час між напиленням і дробеструминною обробкою вибирали виходячи з умов найбільшої повноти перебігу явища рекристалізації на деформованій поверхні і недопущення появи плівки оксидів, що перешкоджає міцному зчепленню краплі з по-

верхнею, що відновлюється. Оптимальна величина проміжку становила 1,5-2 год. Нарощування шару робили на стаціонарній установці EM-17.

Для проведення вимірювань напружено-деформованого стану матеріалу покриття використали метод оцінки коерцитивної сили (коерцитиметр КРМ-Ц). Градування проводили на еталонних зразках. Подвійне намагнічування дозволило підвищити достовірність вимірювань, які у лабораторних умовах становили $\pm 0,1$ А/см діапазоні вимірювань 1-20 А/см. Оцінку коерцитивної сили виконали з використанням щупів двох видів: 1 – звичайні у формі прямокутників; 2 - у формі правильних трикутних призм. Необхідність використання різних щупів була продиктована тим, що в ряді випадків було важко провести виміри в результаті обмеження площі досліджуваної поверхні через конструктивні елементи деталі.

При відновленні зношених деталей методом електродугової металізації якість відновлення залежить найбільше від міцності зчеплення покриття з основним металом. Аналіз існуючих методів оцінки міцності з'єднання покриття з основним металом дозволяє загалом розділити їх на випробування на відрив, зсув, механічні та інші.

Різноманітність та взаємодія факторів, що визначають міцність з'єднання покриття з основою, а також відсутність стандартної методики ускладнює, а іноді і унеможлиблює зіставлення даних, отриманих з різними покриттями, розмірами та формою зразків у різних дослідників [24]. Крім цього для покриттів, що містять значну кількість пір, що характерно для досліджуваного методу електродугової металізації, характерне заниження результатів у разі застосування штифтових методик. При визначенні адгезійної міцності з використанням клейових композицій на досліджуваній параметр впливає глибина просочення і склад клейової композиції, що підбираються методом проб і помилок [24]. Істотним недоліком більшості з перерахованих вище методів визначення міцності покриття з основою є залежність визначеного показника від розмірів зразка [25]. Так, для окремих методів зміна масштабного фактора призводить до падіння величини руйнівної напруги майже в 2 рази [26], що є неприпустимим при оцінці доцільності застосування покриття для відповідальних деталей.

В якості основної прийняли методику випробувань на зсув. Незважаючи на те, що в результати випробувань можуть вноситися елементи невизначеності, пов'язані з тим, що прикладене навантаження розподіляється нерівномірно по не регламентованій довжині циліндричної частини зразка, проте простота виготовлення та проведення випробувань за даним методом зумовили її широке поширення та можливість зіставлення отриманих даних із результатами інших дослідників [20]. Матрицю виготовляли з твердістю не нижче за HRC 60. Товщина покриття становила 2-2,5 мм. Торцеві поверхні зразків виконували горизонтальними. Для запобігання переміщенню зразка в горизонтальній площині в процесі проведення випробувань у матриці виточили канавку діаметром рівним зразку, глибиною 1 мм. При цьому допуск діаметрів для матриці склав $H7$ для зразка $h7$. Кількість зразків для випробувань вибирали з розрахунку 5 випробувань на поєднання покриття – міцний чавун. Випробування проводили на гідравлічному пресі ОКС-16711. Відносна похибка вимірювання не перевищувала $\pm 5\%$.

2.2. Ушкодження та знос колінчастих валів. Аналіз можливості їх відновлення шляхом формування електрометалізаційного покриття

Колінчастий вал належить до найбільш відповідальних і коштовних деталей двигуна. Вартість його виготовлення часто досягає 25-30% вартості самого двигуна.

У процесі експлуатації колінчастий вал, працюючи у складних умовах, втрачає початкову точність і частково запас міцності, що призводить до скорочення його ресурсу. Це також знижує ресурс двигуна в цілому.

Умови роботи деталі характеризуються впливом зовнішніх сил, моментів від тиску газів та інерції рухомих мас, що є періодичними функціями кута повороту кривошипу, що викликають появу знакозмінних напружень від крутильних та згинальних коливань. Крім цього в процесі експлуатації та ремонту двигунів відбувається зміна просторового положення елементів колінчастих валів внаслідок недостатньої пружності матеріалу та жорсткості конструкції, поява додаткових залишкових напружень. Просторові відхилення, а також вплив частинок абра-

зиву, що циркулюють з маслом у двигуні, ведуть до підвищення інтенсивності процесів зношування, чому сприяє неоднорідність загартованого шару по глибині, тому рівень якісних показників колінчастого валу знижується в процесі традиційного ремонту [11]. Сукупність впливу різних факторів призводить до того, що в процесі експлуатації та ремонту змінюється як рівень напружено-деформованого стану колінчастого валу, так і властивості його робочих поверхонь, що може призвести до появи втомлених ушкоджень (рис. 2.1) та відхилення геометричних параметрів елементів від технічних. вимог.

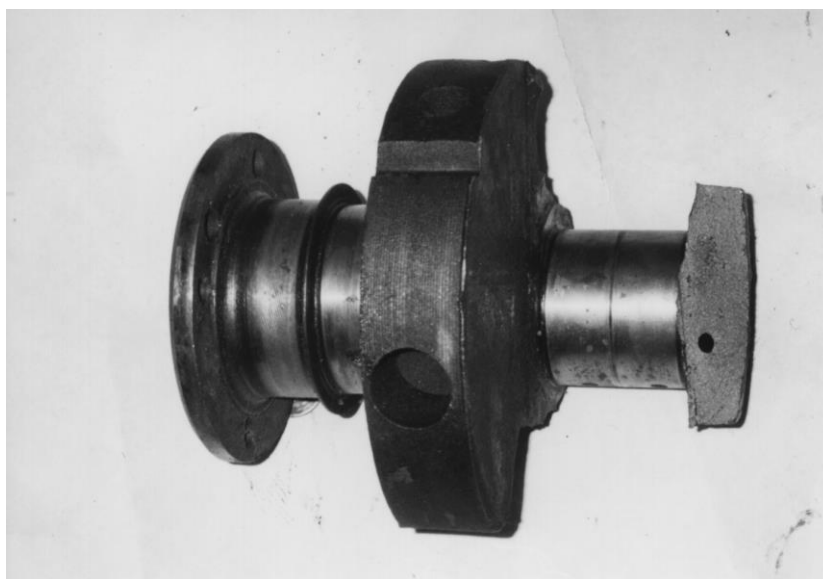


Рисунок 2.1 – Втомне руйнування матеріалу колінчастого валу двигуна вантажного автомобіля

Тому необхідним є вивчення та аналіз зносу робочих поверхонь колінчастого валу, оцінка зміни його напружено-деформованого стану у процесі експлуатації та ремонту.

Для оцінки інтенсивності та характеру зношування основних робочих поверхонь валу – корінних та шатунних шийок, їх овальності та конусності був проведений мікрометраж 120 колінчастих валів двигунів та ряду інших. У процесі досліджень аналізували характеристики величини геометричних параметрів номінальних та ремонтних розмірів.

Провели аналіз розподілу основних дефектів на поверхні шийок залежно від номерів ремонтних груп колінчастого валу.

Встановлено, що істотний вплив на ресурс деталі надають такі дефекти як задири та риски на поверхні шийок, що часто супроводжуються схоплюванням матеріалів, та вимагають перешліфування валу в ремонтний розмір, що забезпечує його усунення (рис. 2.2). Їхній внесок у загальний обсяг вибірки становив від 26% до 60% залежно від номера ремонтної групи.

Аналіз середніх величин зносу корінних та шатунних шийок колінчастих валів автотракторних двигунів показав, що у процесі експлуатації знос нерівномірний. Так, збільшення зносу першого ремонтного розміру відповідає 26%, а четвертого 44%, що відповідає зниження зносостійкості матеріалу під час експлуатації. В результаті оцінки середніх величин зносу шийок колінчастих валів різних двигунів встановлено, що найбільш навантаженими в експлуатації є деталі тракторних двигунів. Цілком можливо, що ця зміна пояснюється підвищеним температурним режимом роботи і відповідно зниженою несучою здатністю масляного шару [2].

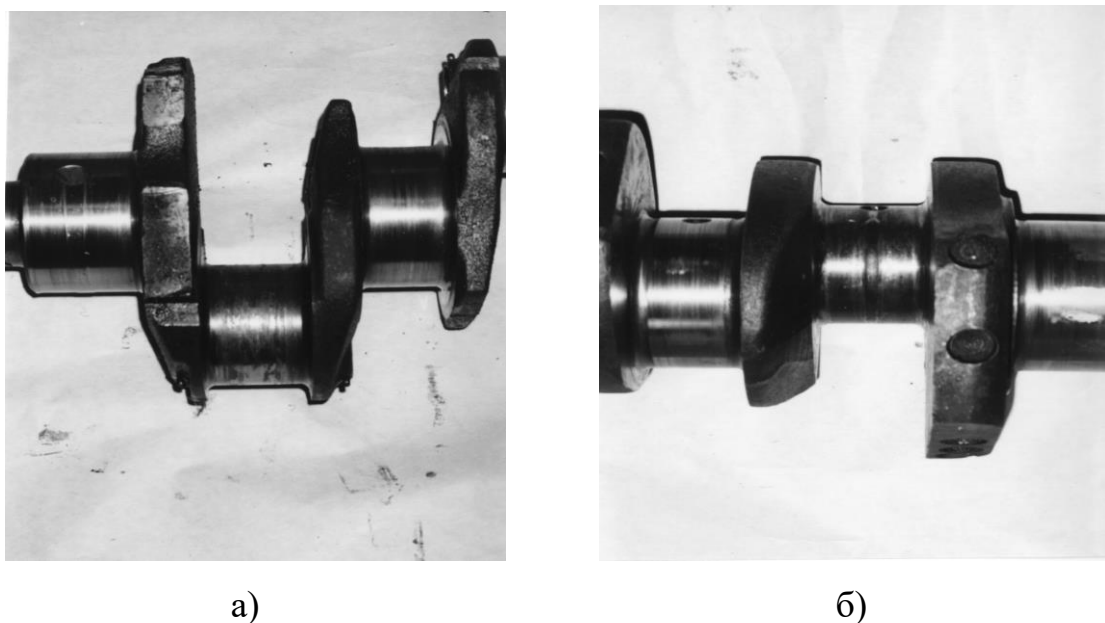


Рисунок 2.2 Колінчастий вал двигуна, що вийшов з експлуатації внаслідок порушення температурного режиму роботи підшипника ковзання

а - відзначено наявність рисок та задирів на робочій поверхні першої шатунної шийки, а також слідів перенесення антифрикційного матеріалу вкладишів; б - сліди підвищеного зносу робочій поверхні шийки.

Відмінність за умов роботи відбивається також і таких геометричних характеристиках, як конусність і овальність шийок.

Для всіх номерів ремонтних груп характерна підвищена овальність шатунних шийок у порівнянні з корінними. Збільшення середніх значень овальності та конусності шийок зі збільшенням напрацювання деталей, на нашу думку, відбувається у зв'язку зі зміною властивостей поверхневого шару, вираженим у зменшенні його твердості під час переходу на наступний ремонтний розмір. Крім цього, через нерівномірне зношування по діаметру шийок, для відновлення їх геометричної форми виникає необхідність у перешліфуванні минаючи один-два розміри. Кількість колінчастих валів, що потребують перешліфування у другий ремонтний розмір, обмежена.

В результаті виконаної оцінки пошкоджуваності робочих поверхонь шийок колінчастих валів після експлуатації за допомогою проведення мікрометражу встановлено, що шийки зношуються неоднаково, а саме зношування шатунних шийок в середньому вище, ніж корінних і може збільшуватися в міру напрацювання деталі майже в 1,4 рази. Крім цього наявність таких дефектів як задири та риски, питома вага яких в обсязі деталей, що надійшли в ремонт, становить, залежно від ремонтної групи, від 26 до 60%, при традиційній технології відновлення, призводить до необхідності їх перешліфування минаючи один-два ремонтні розміри, що значно скорочує ресурс деталі. Загальна кількість деталей, що надійшли в капітальний ремонт через наявність зазначеного дефекту, відновлення яких доцільно виробляти методом електродугової металізації, становить до 40%. Інші деталі вийшли з експлуатації у зв'язку зі зносом шийок і можуть бути піддані традиційному перешліфуванню в наступний ремонтний розмір.

Як зазначалося вище, великий вплив на ресурс колінчастого валу має також напружено-деформований стан, викликаний складними умовами його роботи.

Проведена статистична обробка 144 колінчастих валів після експлуатації та відновлених методом електродугової металізації із застосуванням рекомендованого матеріалу покриття дозволила оцінити рівень їх напружено – деформованого стану робочих поверхонь (табл. 2.2)

В результаті встановлено, що рівень напружено-деформованого стану колінчастих валів автомобільних двигунів після експлуатації відповідає показникам коерцитивної сили, що дорівнює в середньому для корінних шийок 1,76 А/см, для шатунних 2,18 А/см. При цьому найбільші середньоквадратичні відхилення відповідно становили 0,46 та 1,06.

Проведення механічної обробки, шліфування в ремонтний розмір, дещо підвищує рівень напружень для корінних шийок у 1,30 рази, а шатунних у 1,08 рази. Для колінчастих валів, робочі поверхні яких відновлені методом електродугової металізації і піддані потім шліфування номінальний розмір, величини цих коефіцієнтів відповідно склали 1,35 і 1,12

Таблиця 2.2 - Статистичний аналіз напружено – деформованого стану, (H_c) оцінений за коерцитивною силою.

Вид досліджуваної поверхні	Тип використаного щупа	Межа відхилень, А/см		Середнє значення		Середньоквадратичне відхилення	
		корінна шийка	шатунна шийка	корінна шийка	корінна шийка	шатунна шийка	корінна шийка
Колінчасті вали автомобільних двигунів							
Після експлуатації	1	1,3-1,8	0,7-3,3	1,76	2,18	0,46	1,06
	2	5,2-6,0	5,4-6,3	5,58	5,80	0,36	0,34
Після шліфування	1	2,1-2,5	1,8-2,4	2,28	2,36	0,14	0,23
	2	5,6-6,2	5,9-6,2	5,88	6,1	0,22	0,11
Після напилення та шліфування	1	1,3-2,5	1,9-2,5	2,38	2,45	0,26	0,10
	2	5,6-6,5	6,0-6,8	6,14	6,34	0,28	0,29
Колінчасті вали тракторних двигунів							
Після напилення та шліфування	1	3,0-5,2	4,0-5,4	5,1	5,3	0,25	0,11
	2	8,5-9,1	9,1-10,0	8,9	9,8	0,29	0,18

Встановлено, що значення коерцитивної сили для шатунних шийок вище ніж для корінних у середньому у 1,03 рази. Це узгоджується з результатами проведеного мікрометражу і дозволяє зробити висновок про те, що більш важкі умови роботи шатунних шийок призводять не тільки до зростання інтенсивності зношування, але і до підвищення напружень поверхневого шару шийок. Для валів тракторних двигунів рівень напруженого стану робочих поверхонь вищий, у середньому, у 2,14 рази, що пояснюється більш важкими умовами роботи цих деталей та свідчить про більшу навантаженість.

В результаті проведеного дослідження встановлено, що застосування методу електродугової металізації незначно підвищує рівень напружено-деформованого стану шийки колінчастого валу в порівнянні з традиційною операцією шліфування, в середньому на 3-4%, що дозволяє рекомендувати даний метод для ефективного усунення перерахованих вище дефектів для колінчастих валів двигуна. Однак розробка технології відновлення зазначених дефектів вимагає визначення матеріалу покриття, що найбільш повно відповідає вимогам експлуатації.

2.3. Вимоги до матеріалу покриття. Оцінка працездатності колінчастого валу двигуна, відновленого шляхом формування електрометалізаційного покриття

Складні умови роботи найбільш навантажених і дорогих деталей автотракторних двигунів, спричинені дією знакозмінних навантажень від згинальних та крутних моментів, а також широкою зміною робочих температур, що мають місце в період експлуатації, викликає необхідність визначення та оцінки рівня основних вимог, що пред'являються до матеріалу покриття, необхідного для якісного усунення дефектів цих деталей.

Особливістю умов роботи у високофорсованих моторах є можливі температурні напруження, що виникають у матеріалі деталі у процесі її експлуатації. Тому особливий інтерес представляє оцінка рівня напружень, що формуються внаслідок відмінності коефіцієнтів лінійного розширення покриття і основи під впливом робочих температур.

У першому наближенні оцінку рівня напружень, викликаних різними коефіцієнтами лінійного розширення проводили на підставі теорії термопружності для нескінченної смуги покритої з двох сторін. Передбачали відсутність градієнта температур, а також прийняли умову, що коефіцієнти Пуассона, модулі пружності та коефіцієнти термічного розширення матеріалів незначно залежать від температури в інтервалі до 400°C (відповідає максимальній температурі для найбільш теплонапружених деталей двигуна [27]). Однак робочий інтервал температур досліджуваних навантажених деталей у переважній більшості випадків не перевищує 220-240°C. Вище зазначених температур починають розвиватися процеси лако- та нагароутворення в результаті контакту робочих поверхонь з моторним маслом.

Оцінку напружень у покритті проводили за формулою [28]:

$$\sigma_1 = \frac{E_1 E_2 (\alpha_1 - \alpha_2) T}{\frac{h_1}{h_2} E_1 (1 - \mu_2) + E_2 (1 - \mu_1)}, \quad (2.1)$$

де α_1 и α_2 - коефіцієнти термічного розширення покриття та основи, $1/^\circ\text{K}$; E_1 и E_2 - модулі пружності покриття та основи, Па; μ_1 и μ_2 - коефіцієнти Пуассона покриття та основи; T - температура, $^\circ\text{K}$; h_1 и h_2 - товщина покриття та основи, м. Розрахунок за цією формулою з урахуванням прийнятих обмежень дає максимальну похибку, що не перевищує 10%.

В результаті виконаної оцінки встановлено, що відмінність коефіцієнтів лінійного розширення матеріалу покриття та основи в $1 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{K}$ призводить до додаткового підвищення рівня напружень у покритті в інтервалі робочих температур у середньому до 18 МПа. Тому при виборі рекомендованого матеріалу слід прагнути максимально наблизити зазначену характеристику до коефіцієнта лінійного розширення матеріалу основи, і не допускати перевищення напружень, що виникають, в робочому матеріалі покриття вище його меж адгезійної і когезійної міцності.

У період роботи двигуна колінчастий вал навантажується періодичними силами від тиску газів і інерції мас, що поступово рухаються. Ці сили викликають знакозмінні крутні та згинальні моменти, тертя та знос деталі. Нерівномірність

крутного моменту обумовлюють крутильні, поздовжні та поперечні коливання, які в умовах резонансу можуть призвести до втомливого руйнування матеріалу та поломки валу.

Вимоги до конструкції деталі полягають у забезпеченні необхідної міцності, жорсткості та зносостійкості при порівняно невеликій масі, працездатності в межах заданого терміну служби, динамічної врівноваженості за відсутності вібрацій. Однак, внаслідок проведених ремонтів, що полягають у перешліфуванні шийок валу в ремонтний розмір, у період експлуатації конструктивні розміри валу змінюються. Зі зменшенням товщини загартованого шару, неоднорідного по глибині, також змінюється твердість поверхневого шару (відзначається її спад). Зниження зносостійкості робочих поверхонь валу під час експлуатації може досягати 20% [11]. Як показав аналіз 60% колінчастих валів виходить з ладу внаслідок зношування. Після останнього ремонтного розміру загартований шар практично відсутній і при нанесенні електрометалізаційного покриття не потрібне проведення попередньої обробки для його видалення. При усуненні таких дефектів, як задири та риски на поверхні робочого шару, виникає також необхідність оцінки максимально допустимих припусків на механічну обробку, що не знижують міцність втоми деталі.

Відповідно до того, що деталі дизельних тракторних двигунів в більшості випадків працюють у більш важких умовах, ніж карбюраторні автомобільних, то оцінку рівня пред'явленого до міцності зчеплення наноситься покриття з основою при відновленні колінчастих валів, формуванням електрометалізаційних покриттів проводили на підставі аналізу динаміки механізму таких двигунів. Для колінчастих валів зазначених двигунів характерна також наявність на робочих поверхнях шийки раніше розглянутих основних дефектів: задираки, риски та перенесення антифрикційного матеріалу вкладишів. У кривошипно-шатунному механізмі двигуна діють сили тиску газів, сили інерції мас, що рухаються, сили тертя, гравітаційні сили, а також реактивний момент, що випробовується двигуном з боку споживача потужності (момент опору). У розрахунках динаміки механізму, що проводяться для встановилися режимів роботи двигуна, враховуються лише сили тиску газів і сили інерції рухомих мас і моменти, що ними породжуються, оскільки

ки інші фактори відіграють несуттєву роль в умовах навантаження основних деталей двигуна. Для розрахунку використали методику [29].

Для визначення навантажень зсуву, що діють в найбільш навантаженій шийці 4-го циліндра після розрахунків за аналогією з діаграмами зносу [29], будували діаграму, що дає умовне представлення про характер розподілу тангенційної складової сили S , маючи припущення, що її дія проходить в секторі $\pm 60^\circ$ від миттєвого напрямку сили T . Для побудови діаграми під кутом 60° до кожного зусилля в обидві сторони проводили кільцеві смуги, висота яких була пропорційна відповідному зусиллю T . Сумарна площа цих смужок у результаті була умовною діаграмою розподілу навантажень від дотичної сили (рис. 2.3).

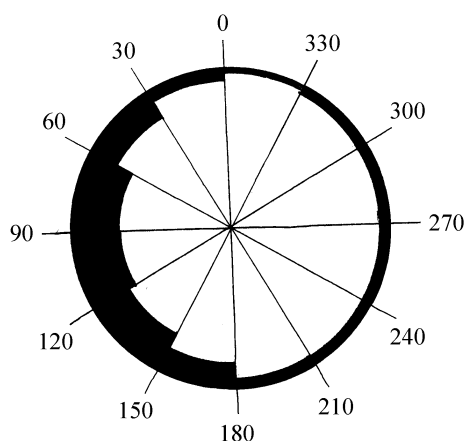


Рисунок 2.3 Діаграма розподілу дотичної складової результуючої сили, що діє на найбільш навантажену шатунну шийку 4-го циліндра двигуна (3-є коліно)

Згідно з побудованою діаграмою, найбільші значення дотичної сили відповідають куту повороту кривошипу в $60-120^\circ$. Зважаючи на те, що зусилля в найбільш навантаженій ділянці шийки розподілені також в області $\pm 60^\circ$, що відповідає площі $0,09 \text{ м}^2$, визначили максимальний тиск зсуву, що формується у поверхневому шарі. Для найбільш навантаженої шатунної шийки даного дизельного двигуна вони не перевищують 16 МПа .

У зв'язку з тим, що матеріал колінчастого валу в процесі експлуатації піддається дії нормальних і дотичних напружень, тобто знаходиться в складному напруженому стані, доцільним представляється при визначенні вимог до міцності

зчеплення покриття з основою додаткового введення коефіцієнту запасу міцності. Для більшості відповідальних деталей, особливо навантажених у експлуатації, його величина обирається рівною 5 [1-5]. Таким чином, для забезпечення якості відремонтованих деталей матеріал покриття, а також технологія його нанесення повинні забезпечувати, з урахуванням коефіцієнта, міцність зчеплення з основою, що визначається на зсув, не менше 80 МПа.

Для усунення таких дефектів як ризики та задири на робочій поверхні шийок колінчастого валу, зменшення впливу зон гартування, що мають підвищений рівень напружень, і, як наслідок, призводять до зниження рівня адгезійної міцності, перед формуванням електрометалізаційних покриттів можливе застосування механічної обробки, у процесі якої видаляється дефектний шар. Однак така обробка призводить до зменшення ефективного перерізу деталі, і, як наслідок, до зниження міцності втомі.

Результати розрахунків запасів міцності 3-го коліна валу як найбільш навантаженого представлені в табл. 2.3. При цьому враховували, що даний метод розрахунку валу як розрізної балки дає дещо занижені запаси міцності у зоні галтелей.

Таблиця 2.3 - Значення запасів міцності 3-го коліна валу двигуна з урахуванням зменшення ефективного перерізу

Категорія розміру	Розміри шатунних шийок, мм	Розміри корінних шийок, мм	Шатунні шийки			
			Номер циліндра			
			3		6	
			Отвір	Галтель	Отвір	Галтель
1	2	3	4	5	6	7
1Н	85.25	92.25	2,563	2,38	2,682	2,457
2Н	85.00	92.00	2,54	2,359	2,658	2,435
P1	84.50	91.50	2,494	2,316	2,61	2,391
P2	84.00	91.00	2,449	2,274	2,563	2,348
P3	83.50	90.50	2,405	2,233	2,516	2,305
P4	83.00	90.00	2,361	2,192	2,47	2,263
P ¹	78.00	85.00	1,948	1,809	2,038	1,867

Продовження табл. 2.3

Категорія розміру	Коріні шийки				Щоки			
	Номер шийки				Позначення щоки			
	3		4		Ліва		Права	
	Отвір	Галтель	Отвір	Галтель	Точка 1	Точка 2	Точка 1	Точка 2
1	8	9	10	11	12	13	14	15
1Н	5,768	4,698	5,19	4,227	2,546	1,917	2,363	1,921
2Н	5,721	4,659	5,147	4,192	2,534	1,902	2,351	1,907
P1	5,626	4,582	5,062	4,123	2,51	1,873	2,327	1,878
P2	5,533	4,506	4,978	4,054	2,485	1,844	2,303	1,849
P3	5,441	4,431	4,895	3,987	2,46	1,815	2,278	1,820
P4	5,349	4,357	4,813	3,92	2,435	1,786	2,254	1,791
P ¹	4,49	3,657	4,039	3,29	2,174	1,505	2,00	1,512

Примітка. Припуск на механічну обробку – до 3 мм за діаметром валу після останнього ремонтного розміру. Величина припуску обрана з урахуванням відсутності загартованого шару та неприпустимість зниження коефіцієнтів запасу міцності більш ніж на 20% по відношенню до нової деталі.

Як оцінний критерій для визначення максимального припуску на механічну обробку було прийнято умову, що не допускає зниження коефіцієнтів запасів міцності більш ніж на 20% порівняно з новою деталлю, що відповідає рівню зниження межі витривалості в період експлуатації [11].

В результаті проведеного розрахунку з оцінки запасів міцності колінчастого валу зі зменшеними ефективними перерізами шийок встановлено, що максимально допустимий припуск на механічну обробку, що незначно позначається на зниженні міцності деталі становить до 3 мм на діаметр після останнього ремонтного розміру, що дозволяє ефективно проводити відновлення пошкоджених поверхонь шийок. Так як прожарюваність, що застосовується для виготовлення колінчастих валів найбільш навантажених тракторних дизелів сталі 40Х (до зони, що містить окремі зерна мартенситу), становить до 3 мм, а в процесі подальшої механічної обробки заготовки значний шар загартованого матеріалу знімається, то фактична

глибина зони загартування вала двигуна становить до 2,5 мм на бік нової деталі [1]. У разі вже за шліфуванні в 4-ий ремонтний розмір у структурі робочого матеріалу шийки переважають структури з окремими зернами мартенситу, викликають різке скорочення ресурсу деталі внаслідок підвищеного зносу [2]. Тому доцільним є для таких валів, загальна кількість яких становить до 15%, проводити замість традиційного перешліфування в останній ремонтний розмір відновлення робочих поверхонь шийок нанесенням покриття методом електродугової металізації, що має зносостійкість на рівні нового валу.

2.4 Визначення ефективності вибраного матеріалу покриття

Термічний коефіцієнт лінійного розширення базового покриття на основі ферохромалюмінію в інтервалі робочих температур навантажених деталей автотракторних двигунів становить $10,9 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{K}$. Додаткове введення незначної кількості легуючих компонентів, у сумі до 1,8% по масі, його зміна не може перевищити 10%, навіть у разі значної зміни періоду решітки основи, що знаходиться в межах розрахункової похибки за формулою (2.1). Встановлено, що відмінність коефіцієнтів лінійного розширення матеріалу покриття та основи не перевищує 30%, що відповідає рівню напружень 23,4 МПа. Визначений методом конічного штифта рівень міцності зчеплення ферохромалюмінієвого покриття становить 34 МПа, що в 1,45 рази вище за рівень температурних напружень, що формуються, в робочому інтервалі температур.

В результаті проведених випробувань визначення міцності на зсув встановлено, що руйнування покриття з молібденовим підшаром відбувається по кордоні з основним матеріалом. Визначена методом випробувань на зсув середня міцність зчеплення нанесеного електрометалізаційного покриття на основі ферохромалюмінію додатково легovanого Mo, Ti, V становить 110 МПа.

Таким чином, встановлено, що рівень міцності зчеплення знаходиться вище за потрібне (80 МПа), визначеного для відновлених з покриттям найбільш навантажених деталей автотракторних двигунів. Збільшення міцності порівняно з необ-

хідним становило 37,5% для поєднання покриття – сталь 40Х (гартування ТВЧ та середній відпуск).

Висновки

1. Аналіз відмов колінчастих валів показав, що крім найбільш характерного для пар тертя - ковзання дефекту - зношування робочих поверхонь корінних і шатунних шийок, спостерігається також наявність задирів і рисок. Причому питома вага деталей, що вийшли з експлуатації із зносу, становить залежно від номера ремонтної групи не пошкоджених шийок від 26% до 60%. Застосування традиційної технології для усунення зазначеного дефекту перешліфуванням у ремонтний розмір призводить до значного зниження ресурсу таких деталей, і тому малоефективне при подальшій експлуатації. Загальний рівень дефектів основних робочих поверхонь колінчастого валу, усунення яких доцільно проводити методом електродугової металізації становить до 40%.

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори мають значний вплив на умови праці, які за своєю природою класифікуються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

Група фізичних факторів на підприємстві включає незахищені рухомі елементи виробничого обладнання; переміщення виробів, заготовок; підвищена концентрація пилу та забруднення повітря робочої зони, підвищена та знижена температура, вологість, підвищений шум, вібрація, яскравість світла при роботі над електрометалізаційною установкою.

До групи хімічних факторів можна віднести наступні: токсичний вплив випаровувань лакофарбових покриттів (при використанні), який проникає всередину людини через органи дихання.

Група психофізіологічних факторів поділяються на фізичні та нейропсихічні перевантаження за характером дії.

Фізичні перевантаження включають: статичні та динамічні.

До нейропсихіатричного: психічний стан, монотонність праці, емоційне перевантаження.

4.2 Аналіз стану охорони праці.

На сьогоднішній день на підприємстві щомісячно проводяться заходи щодо попередження виникнення на робочих місцях потенційно небезпечних ситуацій. Перед початком робіт кожен новий працівник проходить інструктаж з техніки безпеки з занесенням відмітки про його виконання до журналу з техніки безпеки.

Вимоги до охорони праці та заходів безпеки забезпечуються розташуванням обладнання відповідно до норм технологічного проектування та наявності відповідних пристроїв безпеки та огороження, використання профілактичного забарвлення механізмів переміщення, сигнальних пристроїв, дотримання вимог до ши-

рина проходів та переміщення мобільного транспорту між відділеннями, робочими місцями та обладнанням.

Вимоги до достатнього освітлення робочих місць виробничих та допоміжних відділень підприємства забезпечуються системою природного, комбінованого та загального освітлення відповідно до норм технологічного проектування ремонтних підприємств ВНТП-СГіП-46-13, ВНТП-СГіП-46-16; будівельними нормами БНтаП II-4 “Природне та штучне освітлення”.

Робоче обладнання (машини для очищення деталей, пневматичні інструменти, обробка металів різанням тощо) створює шум різних частот та інтенсивності, що викликає роздратування та швидку втому, порушують здоров'я людини. Щоб підтримувати нормальні показники людей у промислових приміщеннях на підприємстві, проводяться заходи для підтримки шуму в допустимих межах відповідно до БНтаП II -12 “Захист шуму ” та СТ СЕВ 4867.

ВИСНОВКИ:

1. В даний час все більша кількість сільськогосподарської техніки, що експлуатується, вимагає ремонту вузлів і відновлення деталей. В умовах кризи на сільськогосподарських підприємствах немає коштів на покупку нових машин. Тому особливої актуальності набувають нові технології відновлення найдорожчих та відповідальних деталей.

2. Однією з найбільш навантажених деталей сучасного двигуна є колінчастий вал. Складна конфігурація, знакозмінні навантаження, наявність великої кількості концентраторів напружень вимагають особливого підходу до подовження його ресурсу.

3. При виробництві таких деталей найбільшого поширення набули різні види сталей. Однак у процесі експлуатації відбувається зміна властивостей поверхневого шару виробів і, як наслідок, спостерігаються складнощі для формування покриттів. Однією з ключових проблем при подовженні терміну експлуатації такого виробу є необхідність наносити покриття на матеріал, який через термічний вплив має градієнтну структуру. А традиційні методи наплавлення створюють значну зону термічного впливу. Тому підібрати технологію нанесення покриття яке б не зменшило довговічність виробу є не простим завданням. Одним з найбільш ефективних методів – є нанесення покриттів методом електродугової металізації.

4. В роботі проаналізовано основні причини відмови колінчастих валів в експлуатації. Найбільш поширеним є знос шийок. Традиційно такий дефект усувається шліфуванням в ремонтний розмір. Однак часто також зустрічаються такі дефекти як задири та риски. Такі дефекти в більшості випадків зустрічаються на одній шийці, що при традиційній технології примусить проточити і всі інші шийки в збільшений ремонтний розмір. Таким чином довговічність колінчастого валу суттєво знизиться.

5. На підставі аналізу умов роботи та пошкодження колінчастого валу сформульовані основні вимоги, що пред'являються до якості покриття.

Першою вимогою є мінімальна відмінність коефіцієнтів лінійного розширення матеріалу покриття та основи, що виключає формування значних напруг у період роботи деталей, що перевищують межі адгезійної та когезійної міцності покриття. Для визначення ступеня ефективності покриття за даним критерієм можна скористатися результатами виконаної теоретичної оцінки, згідно з якою розбіжність у коефіцієнтах лінійного розширення в $1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{K}$ в межах робочих температур експлуатації навантажених деталей може призвести до підвищення рівня до 18 МПа.

Друга вимога полягає у забезпеченні стійкості до зносу робочих поверхонь деталей, відновлених формуванням рекомендованого покриття, на рівні нових деталей.

Третя вимога передбачає необхідність забезпечення міцності зчеплення з основою не менше ніж 80 МПа. Даний показник визначений для найбільш навантаженої деталі тракторного двигуна, з урахуванням 5-кратного коефіцієнта запасу міцності, що приймається для більшості відповідальних деталей. Встановлено, що основна напруга, здатна призвести до руйнування покриття, формується під дією тангенціальних складових результуючої сили, спрямованих по дотичній до робочої поверхні шийки колінчастого валу. Тому оцінку ефективності застосування покриття за цим критерієм доцільно вести методами випробувань на зсув.

6. Виконано підбір матеріалу та технології його нанесення. Це дозволило забезпечити міцність зчеплення на зсув в 110 МПа, а коефіцієнт лінійного розширення такого покриття не відрізняється від похідного робочого шару готової деталі.

СПИСОК ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія машинобудування. Основи отримання вакуумно-дугових покриттів [Текст] : підручник / А. О. Андреєв, В. М. Павленко, Ю. О. Сисоєв ; Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т". - Харків : ХАІ, 2018. - 287 с.
2. Коливання механічних систем в автомобіле- та тракторобудуванні [Текст] : навч. посіб. для студентів спец. "Галузеве машинобудування" / Кожушко Андрій Павлович ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". - Харків : Панов А. М. [вид.], 2018. - 315 с.
3. Розвиток процесів забезпечення інвестування підприємств сільськогосподарського машинобудування [Текст] : монографія / О. В. Мороз, Н. П. Карачина, А. В. Вітюк ; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, 2018. - 183 с.
4. Теорія двигунів [Текст] : навч. посіб. для студентів та викладачів фах. передвищ. та проф. освіти спец. 133 "Галузеве машинобудування" спеціалізації "Виробництво, сервісне обслуговування, експлуатація двигунів внутрішнього згоряння" / С. О. Якушенко, О. М. Сорокін, А. М. Будяцький ; Одес. нац. політехн. ун-т, Херсон. політехн. коледж (базовий ВНЗ I-II р. а. Херсон. обл.). - Одеса : Бахва, 2017. - 211 с.
5. Інформаційно-діагностична система імпульсного вихрострумового неруйнівного контролю виробів машинобудування [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Лисенко Юлія Юріївна ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". - Київ, 2017. - 28 с.
6. Оцінювання ефективності проектних рішень [Текст] : навч. посіб. для студентів спец.: 122 "Комп'ютерні науки та інформаційні технології", 131 Прикладна механіка", 133 "Галузеве машинобудування", 136 "Металургія", 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка", 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" / І. Ю. Єрфорт, Ю. В. Дегтярьова, О. Ю. Єрфорт ; Донбас. держ. машинобуд. акад. (ДДМА). - Краматорськ : ДДМА, 2017. - 211 с.
7. Теорія технічних систем [Текст] : навч. посіб. для студентів спец. 133 - "Галузеве машинобудування" / Нац. ун-т. біоресурсів і природокористування

України, Каф. конструювання машин і обладнання ; [уклад.: В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич]. - Київ : Компринт, 2017. - 291 с.

8. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни "Оптимізація режимів роботи двигунів внутрішнього згоряння" для студентів спеціальності 142 "Енергетичне машинобудування" (спеціалізація "Двигуни внутрішнього згоряння") денної та заочної форм навчання [Текст] / Наливайко В. С., Авдюнін Р. Ю., Мисько В. О. ; Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. - Миколаїв : Торубара В. В. [вид.], 2017. – 27

9. Основи комп'ютерного проектування ДВЗ [Текст] : навч. посіб. для поглибл. вивч. курсу та отримання практич. навичок при створенні мат. моделей процесів ДВЗ та конструкцій окремих вузлів і деталей для студентів спец. 142 "Енергетичне машинобудування" (спеціалізація "Двигуни внутрішнього згоряння") / Наливайко В. С. [та ін.] ; Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. - Миколаїв : Торубара В. В. [вид.], 2017. – 135

10. Технологічні основи машинобудування [Текст] : навч. посіб. для студентів ВНЗ спец.: 131 "Прикладна механіка"; 133 "Галузеве машинобудування"; 142 "Енергетичне машинобудування"; 015 "Професійна освіта (транспорт)" / Дмитриченко М. Ф. [та ін.] ; Нац. трансп. ун-т. - Київ : НТУ, 2017. - 208 с.

11. Інженерна та комп'ютерна графіка [Текст] : навч. посіб. : для студентів ден. та заоч. (дистанц.) форм навчання для спец.: 015 "Професійна освіта", 182 "Технологія легкої промисловості", 131 "Прикладна механіка", 133 "Галузеве машинобудування"Ю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка", 152 "Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка"Ю 171 "Електроніка" / Ю. А. Ковальов, Д. А. Макатьора ; Київ. нац. ун-т технологій та дизайну. - Київ : КНУТД, 2016. - 282 с.

12. Основи теорії та динаміки автомобільних двигунів [Текст] : підруч. для студентів ВНЗ, які навчаються за спец. "Галузеве машинобудування" / В. Ф. Шапко, С. В. Шапко ; Кременчуц. нац. ун-т ім. Михайла Остроградського. - Харків : Точка, 2016. - 231 с.

13. Матеріали різного призначення, їх обробка та властивості [Текст] : навч. посіб. для студентів ВНЗ напрямів підгот. 6.010104 "Професійна освіта", 6.050503 "Машинобудування", 6.070106 "Автомобільний транспорт", 6.050501 "Прикладна механіка" / С. С. Дяченко [та ін.] ; Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. - Харків : ХНАДУ, 2016. - 347 с.

14. Вибір раціональних співвідношень розмірів деталей та розрахункове дослідження процесів двигуна за допомогою методів комп'ютерного проектування [Текст] : метод. вказівки до виконання курс. роботи з дисципліни "Основи комп'ютерного проектування ДВЗ" для студентів спец. 133 "Галузеве машинобудування" (спеціалізація "Двигуни внутрішнього згорання") ден. та заоч. форм навчання / Ткаченко С. Г., Хоменко В. С., Авдюнін Р. Ю. ; Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова. - Миколаїв : Торубара В. В. [вид.], 2016. – 31

15. Створення та впровадження нового класу евтектичних композиційних матеріалів в інноваційні технології підприємств машинобудування [Текст] : монографія / В. Є. Панарін [та ін.]. - Запоріжжя : Мотор Січ, 2016. - 263 с.

16. Теоретичні основи створення системи автоматизованого управління ризиком для об'єктів машинобудування підвищеної небезпеки [Текст] : монографія / Марченко Д. М., Жидков А. Б. ; Східноукр. нац. ун-т ім. Володимира Даля. - Сєверодонецьк : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2016. - 174 с.

17. Проектування заготовок і технології їх виготовлення [Текст] : навч. посіб. для студентів, які навчаються за напрямом підгот. "Професійна освіта. Машинобудування", "Інженерна механіка", "Машинобудування", "Прикладна механіка" / В. Є. Богуславський, В. М. Гарнець, В. О. Шаленко ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. - Київ : КНУБА, 2016. - 139 с.

18. Діагностика технологічних систем і виробів машинобудування (з використанням нейромережевого підходу) [Текст] : монографія / [Ковалевський С. В. та ін.] ; за заг. ред. д. т. н., проф. Ковалевського С. В. ; Донбас. держ. машинобуд. акад. - Краматорськ : ДДМА, 2016. - 188 с.

19. Операційна діяльність сучасних підприємств машинобудування [Текст] : монографія / В. М. Гриньова, М. Ю. Явдак. - Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. - 219 с.
20. Основи технології машинобудування [Текст] : [навч. посіб.] / О. В. Дерібо ; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, 2013 . Ч. 2. - 2015. - 111 с.
21. Формування окремих складових системи менеджменту підприємств машинобудування [Текст] : монографія / Укр. інж.-пед. акад. ; [за заг. ред. канд. техн. наук, доц. Гусарова О. О.]. - Харків : УПА, 2015. - 141 с.
22. Композиційні плазмові покриття на основі порошків валкових чавунів [Текст] : автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.06 / Шевченко Олександр Володимирович ; Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". - К., 2004. - 20 с.
23. Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання [Текст] : підруч. для студентів напрямів 6.050502 - інженерна механіка та 6.050503 - машинобудування / Л. К. Похилько, І. В. Добров ; Нац. металург. акад. України. - Дніпропетровськ : ІМА-прес : НМетАУ, 2015. - 249 с.
24. Технологія сільськогосподарського машинобудування [Текст] : підруч. для вищ. техн. закл. України / Б. М. Гевко [та ін.]. - Вид. 2-ге, перероб. і допов. - Тернопіль : Паляниця В. А., 2015. - 418 с.
25. Автоматизація виробничих процесів [Текст] : навч. посіб. для студентів напряму підгот. 6.050503 "Машинобудування" ден. та заоч. форм навчання / Луц. нац. техн. ун-т ; [уклад.: Ю. Л. Гунько, Ю. В. Федорусь]. - Луцьк : РВВ Луц. НТУ, 2015. - 168 с. :
26. Основи технології машинобудування [Текст] : [навч. посіб.] / Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, [2015]. Ч. 2 : Практикум / О. В. Дерібо, Ж. П. Дусанюк, С. І. Сухоруков. - 2015. - 115 с.
27. Забезпечення управління ефективністю діяльності підприємств машинобудування [Текст] : монографія / Череп Алла Василівна, Батракова Тетяна Іванівна ; Держ. ВНЗ "Запоріж. нац. ун-т". - Запоріжжя : ЗНУ, 2015. - 203 с.

28. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення [Текст] : навч. посіб. для студентів ВНЗ напрямів підгот. 050502- "Інженерна механіка" та 050503 - "Машинобудування" / Ю. М. Кузнєцов [та ін.]. - Київ ; Кременчук ; Севастополь : Точка, 2014. - 499 с.

29. Технологічні аспекти керування якістю виробів машинобудування [Текст] : монографія / Є. А. Фролов [та ін.] ; [під. ред. Є. А. Фролова] ; Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. - Харків : Щедра садиба плюс, 2014. - 238 с.