

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерії машин, споруд та технологій

(назва факультету)

Автомобілів

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Проект ділянки ремонтного цеху для технологічного процесу
відновлення колінчастого валу 96350171 з дослідженням технологічного
процесу лазерного гартування

Виконали студенти 6 курсу, групи МАм-62
спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

Пона М.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Пришляк С.Я.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Слободян Л.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Левкович М.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Зав. кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«20» листопада 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Поні Михайлу Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проект ділянки ремонтного цеху для технологічного процесу відновлення колінчастого валу 96350171 з дослідженням технологічного процесу лазерного гартування

Керівник роботи Слободян Любомир Михайлович., к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «20» листопада 2023 року № 4/7-1072

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2023

3. Вихідні дані до роботи Характеристика колінчастого валу 96350171

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ.

4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Пристосування для проточування – 1А1.

Схема установки шліфувального пристрою – 1А1.

Пристрій для шліфувального станка, для шліфування шатунних шийок

колінчастих валів – 1А1. Верстат вертикально-свердлильний 2Н125 – 1А1.

Схема балансуєчої машини з електромагнітними компенсаторами – 1А1.

Стенд балансувальний – 1А1.

Пристрій 9571 - 49 для комплексної перевірки колінчастого валу – 1А1.

Пристрій для контролю лінійних розмірів – 1А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 20.11.2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	25.11.2023	
2	Технологічний розділ	31.11.2023	
3	Конструкторський розділ	06.12.2023	
4	Науково-дослідний розділ	08.12.2023	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	15.12.2023	
6	Оформлення графічної частини	22.12.2023	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	25.12.2023	

Студент

_____ (підпис)

Пона М.В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Слободян Л.М.

_____ (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«20» листопада 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Пришляку Сергію Ярославовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проект ділянки ремонтного цеху для технологічного процесу відновлення колінчастого валу 96350171 з дослідженням технологічного процесу лазерного гартування

Керівник роботи Слободян Любомир Михайлович., к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «20» листопада 2023 року № 4/7-1072

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2023

3. Вихідні дані до роботи Характеристика колінчастого валу

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ.

4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Випробувальний стенд за схемою перехресні циліндрів – 1А1.

Технологічна карта відновлення – 2А1.

Аналіз напружень колінчастого валу – 2А1.

Обладнання для проведення досліджень – 1А1.

Мікроструктурні дослідження – 1А1.

Ділянки для відновлювання колінчастих валів – 1А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 20.11.2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	25.11.2023	
2	Технологічний розділ	31.11.2023	
3	Конструкторський розділ	06.12.2023	
4	Науково-дослідний розділ	08.12.2023	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	15.12.2023	
6	Оформлення графічної частини	22.12.2023	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	25.12.2023	

Студент

_____ (підпис)

Пришляк С.Я.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Слободян Л.М.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Проект ділянки ремонтного цеху для технологічного процесу відновлення колінчастого валу 96350171 з дослідженням технологічного процесу лазерного гартування».

Робота виконана на кафедрі автомобілів ТНТУ ім. І. Пулюя. Керівник кваліфікаційної роботи магістра к.т.н., доцент Слободян Л.М.

Пояснювальна записка складається з п'яти розділів і 121 сторінки формату А4 та 16 аркушів формату А1 графічної частини 1 сторінки додатків.

Ключові слова: відновлення, якість, контроль, оптимізація, обробка.

ЗМІСТ

Вступ	9
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	11
1.1 Загальні характеристики колінчастого валу.....	11
1.2 Характеристика зношування шийок.....	12
1.3 Схвалені способи відновлення колінчастого вала та їх обмеження.....	16
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	20
2.1 Теорії відновлення та укріплення шийок колінчастих валів.....	20
2.2 Операції з підготовки колінчастого валу до відновлення.....	23
2.3 Встановлення ступеня зношування опорних шийок.....	27
2.4 Оцінка зносу місць для монтажу розподільної шестірні.....	28
2.5 Реставрація колінчастого валу.....	28
2.6 Теплова обробка колінчастого валу.....	29
2.7 Теплова обробка опор колінчастого валу.....	30
2.8 Лазерне відновлення колінчастих валів.....	31
2.9 Перевірка колінчастого валу після ремонту.....	43
2.10 Визначення розмірів ділянки технічного обслуговування та ремонтів двигунів.....	45
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	47
3.1 Показник колінчастого валу.....	47
3.2 Аналіз напружень колінчастого валу.....	48
3.3 Створення моделі колінчастого валу за методом скінченних елементів....	49
3.4 Крутильні вібрації.....	55
3.5 Гасителі крутильних вібрацій.....	57
3.6 Концентрація напружень.....	59
3.7 Навантаження на поверхні шийки кривошипа.....	63
3.8 Розробка механічної моделі та моделі скінченних елементів.....	70
3.9 Результати аналізу методом скінченних елементів.....	75
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	77
4.1 Підхід до виконання дослідницьких експериментів.....	77
4.2 Техніки поверхневої обробки лазером.....	78

4.3 Характеристики фазових та структурних змін в вуглецевих сталях під час лазерного зміцнення тепловою обробкою.....	80
4.4 Особливості кристалізації сталі при лазерній обробці з розплавленням....	81
4.5 Фазові та структурні зміни у твердому стані.....	82
4.6 Обладнання та технологічні нюанси лазерної теплової обробки імпульсними лазерами.....	84
4.7 Методологія реалізації експериментальних дослідів.....	86
4.8 Мікроструктурний аналіз.....	94
4.9 Характеристики сталі після застосування лазерного загартовування.....	97
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	100
5.1 Аналіз умов праці в моторному відділенні автотранспортного підприємства.....	100
5.2 Планування цивільного захисту об'єкта.....	109
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	117
БІБЛІОГРАФІЯ.....	118
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Проектування дільниці ремонтного цеху для технологічного процесу відновлення колінчастого валу 96350171 з використанням лазерного гартування є важливим завданням, що вимагає глибокого розуміння як технічних аспектів відновлення деталей, так і інноваційних методів обробки матеріалів. Цей процес включає не лише фізичне відновлення колінчастого валу, але й впровадження передових технологій лазерного гартування для підвищення якості та довговічності валу.

Колінчастий вал 96350171 є ключовою компонентою в механізмі багатьох типів двигунів, відповідальною за перетворення рухомої енергії в обертальний момент. Відновлення цієї складної деталі вимагає точності та високого рівня майстерності, оскільки будь-які неточності можуть призвести до серйозних збоїв у роботі двигуна.

Лазерне гартування, як частина технологічного процесу, дозволяє значно підвищити твердість поверхні валу та його зносостійкість. Цей метод використовує високоінтенсивне лазерне випромінювання для локального нагрівання поверхні металу, що призводить до швидкого охолодження та зміцнення структури матеріалу. Важливою перевагою лазерного гартування є можливість точного контролю за процесом та мінімізація теплового впливу на сусідні ділянки деталі.

При розробці проекту дільниці ремонтного цеху необхідно враховувати ряд важливих аспектів. По-перше, це обладнання цеху, що має включати як стандартні інструменти для відновлення колінчастого валу, так і спеціалізоване лазерне обладнання для гартування. По-друге, потрібно забезпечити високий рівень безпеки роботи з лазерами, що вимагає відповідних заходів безпеки та тренувань для персоналу. Також слід звернути увагу на екологічні стандарти та ефективне використання ресурсів.

Інновації та постійний розвиток в галузі відновлення деталей та лазерної обробки є ключовими для успіху такого проекту. Врахування новітніх наукових досліджень та розробок у цій сфері дозволить не лише підвищити якість та

надійність відновлених деталей, але й забезпечити конкурентоспроможність ремонтного цеху на ринку.

Підсумовуючи, проектування ділянки ремонтного цеху для технологічного процесу відновлення колінчастого валу з використанням лазерного гартування є комплексним завданням, що вимагає не тільки технічних знань, але й стратегічного планування, інноваційного підходу та високого рівня професіоналізму.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Загальні характеристики колінчастого валу

Колінчастий вал знаходиться у нижньому сегменті двигуна та має з'єднання з поршнями, маховиком та демпфером. Його конструкція включає кривошипні плечі, шийки головних підшипників, шийки шатунних підшипників, противаги, а також фланець маховика та демпфера, як зазначено на рисунку 1.1. Шийки колінчастих валів оснащені центральним масляним каналом для забезпечення змащення під час експлуатації. Шийки бувають двох типів: шатунні та головні. Шатунні шийки, які з'єднуються з поршнями через шатуни, приводяться в рух тиском згоряння. Головна шийка визначає ось обертання колінчастого валу і закріплюється за допомогою кришок підшипників у блоку двигуна.

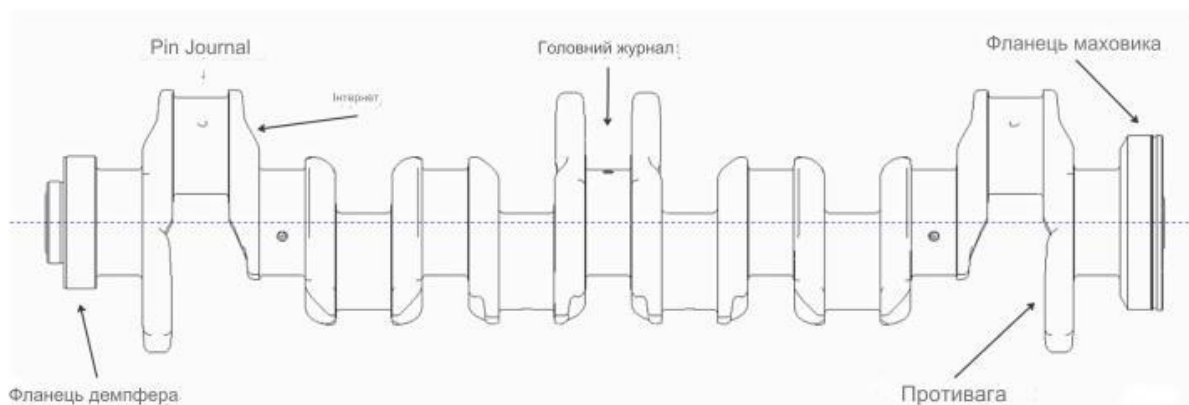


Рис. 1.1. Компоненти колінчастого валу та їх термінологія.

Як вже згадувалося, колінчастий вал призначений для перетворення лінійного руху поршнів на обертальний у самому валу та передачі енергії від камери згоряння до трансмісії через маховик. Маховик згладжує пульсації потужності двигуна та накопичує енергію для забезпечення обертання валів. Це накладає високі сили на колінчастий вал, тому він потребує високої втомної міцності та стійкості до зносу. Для цього необхідна висока твердість поверхні та низька шорсткість, особливо на ключових елементах колінчастого валу, таких як шийки.

Процес виготовлення колінчастого вала розпочинається з обробки його первісної форми методом фрезерування, включаючи фланці, шийки та противаги. На наступному етапі в шийках свердляться масляні отвори, а потім виріб проходить процедуру зачищення. Зачищення передбачає усунення дрібних дефектів, таких як заусенці, які часто виникають на оброблених металевих деталях. Після цього колінчастий вал піддається індукційному загартуванню та відпуску. Індукційне загартування виконується на шийках для досягнення високої твердості поверхні. Для виявлення можливих тріщин після цього процесу виконується магнітно-частинковий контроль цих поверхонь. Після інспекції на тріщини проводиться свердління та нарізка різьби усіх отворів, які служать для кріплення колінчастого вала з обох боків. Надалі здійснюється шліфування поверхонь, що вимагають гладкого фінішу, включаючи шийки вала та верхню частину противаг для досягнення необхідних розмірів. Після цього ці поверхні поліруються або надаються суперфінішні, і, на завершення, вся деталь піддається очищенню.

Цей процес виробництва є часомістким і включає різноманітні операції обробки та деталізації. Це робить компонент витратним не тільки за рахунок вартості матеріалів, але й через виробничі витрати. Тому ремонт і переробка існуючих колінчастих валів, замість виробництва нових, є економічно вигідним.

Специфікації для колінчастого вала, що стосуються шийок, охоплюють креслення колінчастого вала, процес індукційного загартування та критерії матеріалів S38/45. Кожен документ із вимогами включає в себе стандарти, які є критичними для процедур встановлення цих вимог.

1.2 Характеристика зношування шийок

Переважною причиною пошкодження шийок є поверхневі подряпини. Такі подряпини мають різну ширину і часто розташовані на шийці в напрямку її обертання, при цьому зазвичай охоплюючи 360° навколо шийки або як мінімум близько 120°. Виникнення подряпин відбувається, коли дрібні частинки проникають у тонкий шар олії в зазорі між шийкою колінчастого вала та

підшипником. Джерела цих частинок можуть бути різними: це може бути залишок від пісового лиття для блока двигуна і головки циліндра, відкладення жиру з брудної олії або маленькі металеві вирви навколо масляного штифта через неправильну обробку фаски.

Тип зношування, якому піддаються шийки в результаті проникнення частинок, класифікується як абразивне зношування. Абразивне зношування є процесом руйнування поверхні через вплив зовнішнього тіла або частинок матеріалу. Цей тип зношування можна розділити на дві категорії залежно від навантаження: абразивне зношування під високим і низьким стресом або абразія з двома чи трьома тілами, що демонструється на рисунку 1.2. Випадок, коли абразивні частинки стискаються між двома робочими деталями, визначається як абразивне зношування під високим стресом і класифікується як абразія з трьома тілами. Абразивне зношування під низьким стресом, класифіковане як абразія з двома тілами, виникає, коли гостра або твердіша частинка руйнує поверхню.

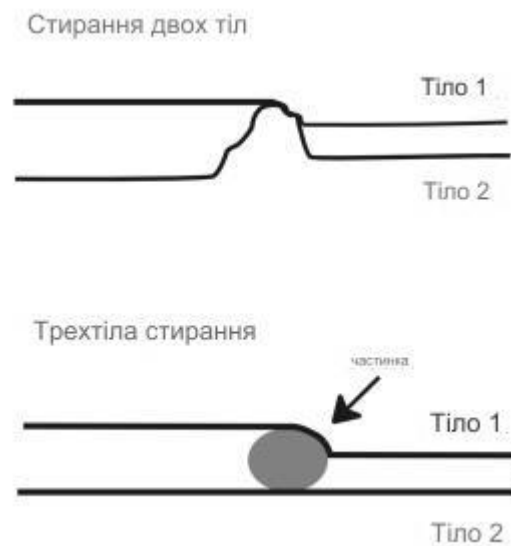
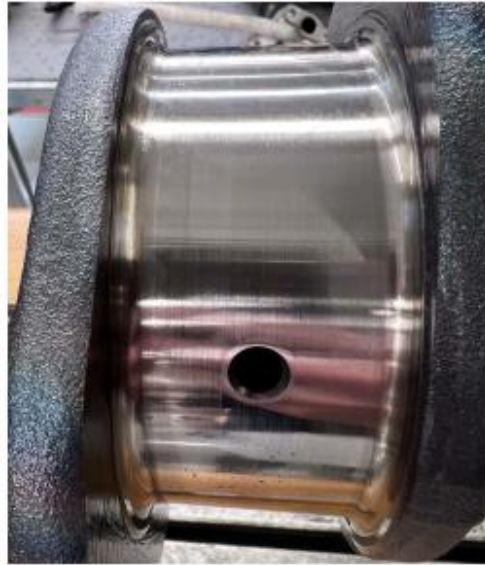


Рис. 1.2. Графічне зображення абразивного зношування за участю двох і трьох тіл

Вид абразивного зношування, що впливає на шийки колінчастого вала, класифікується як абразія з трьома тілами. Це відбувається через частинки, стиснуті між підшипниками та шийками, що знаходяться у масляній плівці. Фактори, що впливають на характер зношування, включають склад матеріалу,

швидкість ковзання, твердість, модуль пружності за Юнгом, нормальне навантаження та температуру контакту.



а



б



в

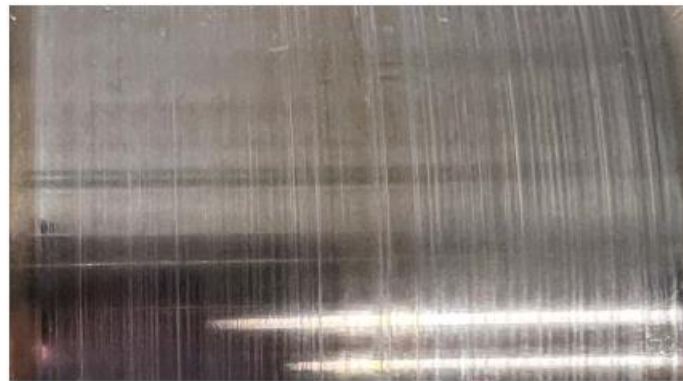
Рис. 1.3. Поверхні шийок колінчастого вала без подряпин та їх крива прямолінійності: (а) Референсна поверхня шийки. (б) Референсна поверхня шийки, зближений вигляд. (в) Крива прямолінійності для референсної шийки.

Поверхня шийки, що відповідає технічним вимогам, показана на рисунку

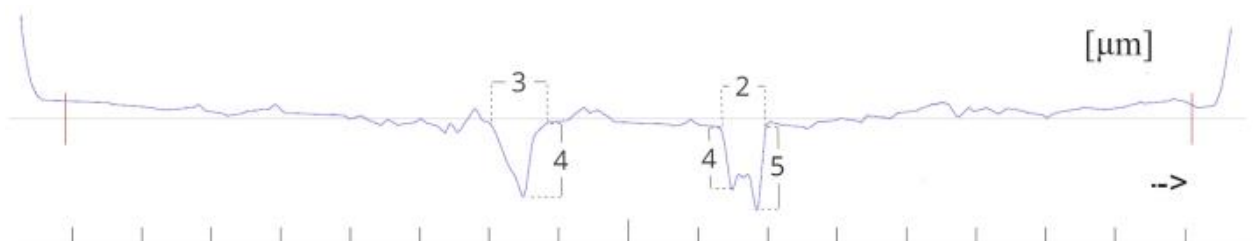
1.3, тоді як поверхня з відхиленнями та подряпинами представлена на рисунку 1.4. При порівнянні кривих прямолінійності видно, що референсна поверхня має гладшу текстуру без значного відхилення від норм прямолінійності. Більшість поверхневих подряпин є видимими, оскільки обертовий рух та масляна плівка створюють помітні сліди від шкідливих частинок. Крива прямолінійності на поверхні на рисунку 1.4.в демонструє коливання прямолінійності та розміри двох найглибших вигинів у мікронах. Червоні вертикальні маркери зліва і справа позначають допустиме відхилення прямолінійності.



а



б



в

Рис. 1.4. Відхиляюча поверхня шийки з подряпинами та її крива прямолінійності: (а) Відхиляюча поверхня шийки з подряпинами. (б)

Відхиляюча поверхня шийки з подряпинами, зближений вигляд. (в) Крива прямолінійності для відхиляючої шийки та розміри двох найглибших подряпин.

1.3 Схвалені способи відновлення колінчастого вала та їх обмеження

Станом на сьогодні є два методи ремонту колінчастого вала: термічне напилювання та гальванічне покриття. Ці техніки дозволяють коригувати розміри діаметра та обробку поверхні колінчастого вала, зокрема в місцях монтажу демпфера, вібраційного демпфера та переднього фланця, як зазначено на рисунку 1.5. Єдиною дозволеною обробкою для шийок є шліфування до максимального зменшення на 1,0 мм від стандартного розміру з проміжними кроками у 0,25 мм, 0,5 мм та 1,0 мм, за якими слід полірування. Це означає, що колінчастий вал підлягає утилізації, якщо глибина подряпин або вм'ятин перевищує 1,0 мм. Така обробка не підходить для шийок, які вже знаходяться на нижньому порозі допустимих діаметрів, через відсутність маржі для обробних відхилень. Оскільки термічне напилювання є тепловим процесом, його використання для шийок неможливе, адже воно зміцнює нанесений шар основи і локально змінює мікроструктуру та механічні характеристики. У випадку гальванічного покриття не може бути досягнуто необхідної твердості, а допустимі речовини обмежені двома варіантами нікелю.



Рис. 1.5. Затверджені методи відновлення поверхні колінчастого вала через напилювальне зварювання та гальванічне покриття

Специфічні вимоги до колінчастого вала, що мають безпосередній вплив

на зону відновлення холодним напилюванням, охоплюють критерії розтяжного напруження, глибину індукційного загартування та геометричні допуски, такі як твердість поверхні, її шорсткість, круглість та прямолінійність. Вимоги та специфікації потребують оцінки на основі властивостей матеріалу подачі, налаштувань обладнання або через тестування. Необхідно визначити вимоги до розтяжного напруження, характеристику поведінки напилюваного покриття під стресом, та як ці вимоги застосовуються до властивостей покритого матеріалу.

У колінчастих валах визначені зони, що мають підвищену критичність через навантаження, викликані згинанням та крученням. Під час експлуатації колінчастий вал піддається впливу згинальних та крутильних сил, внаслідок чого на шийках утворюються зони з підвищеними стискаючими та розтягуючими напруженнями. Застосування технології холодного напилювання у цих зонах вимагає додаткового аналізу та проведення тестувань. Особливо критичними вважаються зони, що зазнають втоми від згинання, такі як радіуси на верхніх частинах головних шийок та на нижніх частинах шатунних шийок. В останніх нижня частина шийок піддається розтягуючим напруженням від сил, що виникають під час згоряння. Зони, чутливі до згинання, позначено синім кольором на рисунку 1.6. Що стосується крутильних напружень, то вони впливають на всі радіуси, викликаючи підвищене навантаження.

У поєднанні з крутильними, стискаючими та розтягуючими напруженнями, критичні області шийок для всіх шийок відзначені синім кольором на рисунку 1.7. та представляють радіус між шийкою та вебами, радіуси масляних отворів, а також нижню частину шатунних шийок.

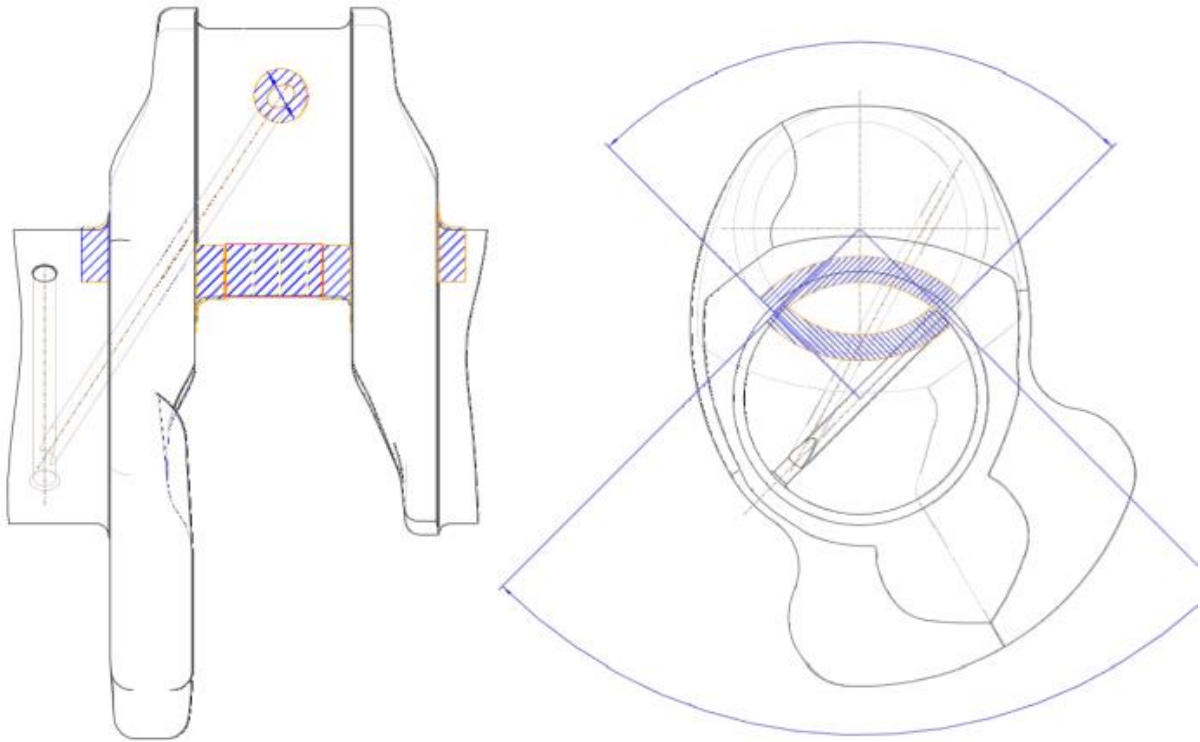


Рис. 1.6. Критичні зони, визначені силами згину: (а) Фронтальний вигляд (б) Бічний вигляд.

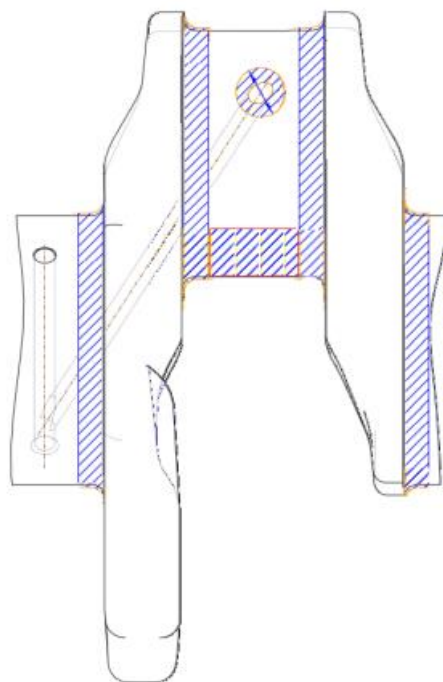


Рис. 1.7. Критичні зони від дії згину та крутного моменту.

Оскільки колінчастий вал повинен стійко витримувати циклічні навантаження та працювати в умовах, де потрібна висока твердість поверхні, виробництво використовує процес індукційного закалювання для забезпечення

необхідної твердості журналів колінчастого вала. Ця процедура також підвищує міцність вала, практично подвоюючи твердість поверхні і забезпечуючи її стійкість до зношування. Глибина закалювання для всіх журналів становить міліметри, як показано на малюнку 1.8. з відповідними позначками. Будь-які пошкодження, які проникають глибше цієї глибини, перепадуть у незакалену зону і створять нерівності, які відхиляться від вихідного мікроструктурного дизайну і призведуть до зниження міцності колінчастого вала. Тому будь-які пошкодження, що глибше міліметрів, не підлягають відновленню, і необхідно визначити, наскільки глибоким може бути відновлення без впливу на тривалість служби.

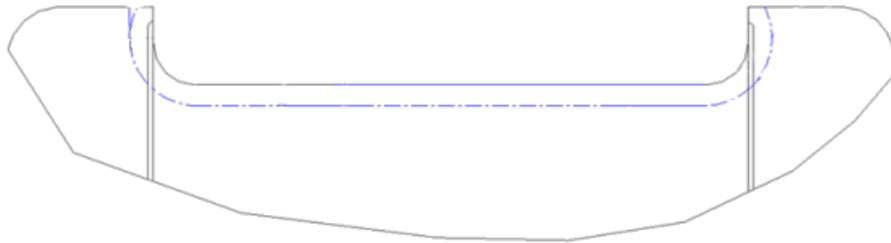


Рис. .1.8. Позначення вимог до глибини закалювання.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Теорії відновлення та укріплення шийок колінчастих валів

Відповідно до наукових вивчень, головною причиною зношування взаємодіючих частин є тривання. Під впливом сил тривання відбувається повторювана деформація областей контактуючих поверхонь, їхнє зміцнення та ослаблення, випромінювання тепла, зміни в структурі, розвиток процесів втоми, окиснення та інші процеси.

Явища, що мають місце в районі контактної зони, є доволі складними, і їх розуміння та ідентифікація причин зношування пояснюються через теорії зовнішнього фрикційного опору. Детальне роз'яснення феноменів, які мають місце при фрикційній взаємодії на поверхні пар, що перебувають у контакті, надає молекулярно-механічна або адгезійно-деформаційна теорія. У таблиці 2.1 викладено різновиди зношування.

Таблиця 2.1. Розподіл категорій зносу.

Метод дії під час зносу	Категорія зносу
Фізичний	Абразивний, адгезивний, гідро- та газоабразивний, кавітаційний, втомний, фретинг-процес
Корозійно-фізичний	Окиснення, фретинг-корозія

Тривальна сила F і фактор тривання f , який відображає співвідношення тривальної сили до вертикального навантаження N : $f = F / N$, встановлюються як агрегат двох елементів:

$$F = F_{\partial} + F_{ad}; f = f_{\partial} + f_{ad}, \quad (2.1)$$

Компонент деформаційного опору збільшується у відповідності до величини відносного проникнення нерівностей h / R . h / R , а також відповідно R_p і f_p зростають із підвищенням шорсткості поверхні та навантаження, але зменшуються при зростанні твердості та модуля пружності матеріалу. Виділяють три форми механічної взаємодії: 1) пружне сполучення; 2) пластичне вигинання; 3) мікрорізання.

Знос є мінімальним при еластичному зіткненні. У випадку пластичної вигинання знос значно зростає. Це пов'язано з тим, що області поверхні під впливом пластичного зміщення активно укріплюються і, вичерпавши можливості для пластичних змін, ламаються крихко. Адгезійне вплив також сприяє цьому процесу. Мікророзрізання вважається неприпустимим механізмом зносу, оскільки воно провокує інтенсивне розшарування поверхневого шару. Мікророзрізання може відбуватися не тільки через вдавнені нерівності, а й через зовнішні тверді частинки. Такий тип руйнування поверхні відомий як абразивний знос.

Компонент адгезії у триванні відповідає безвимірному критерію

$$T_0 / HB.$$

Існують два типи адгезійного впливу:

Утримання та ламання поверхневих шарів;

Зчеплення металічних поверхонь, що призводить до заклинювання, а саме - до глибоких відривів.

З'єднання металічних поверхонь відбувається між поверхнями, очищеними від плівок (новоутвореними), наприклад, у вакуумних умовах або при ламанні плівок через пластичне вигинання в точках зіткнення. Між чистими зонами формуються адгезійні зв'язки, чия міцність перевищує міцність одного з матеріалів тертя. Відшарування відбувається у менш міцному матеріалі на глибині від точки зчеплення. На одній поверхні утворюються виїмки, на другій – висмикнуті частини, які знову зчіплюються та борознять поверхні, сприяючи їх інтенсивному зношуванню, а іноді внаслідок значного тепловипромінювання та зварювання. Розриви поверхонь при зчепленні (заклинюванні) відомі як адгезійний знос. Це є одним із найбільш критичних та

швидкоплинних видів зношування, основною причиною поломок у механізмах тертя.

Відповідно до молекулярно-механічної концепції опору, існують два головні напрямки покращення стійкості до зносу матеріалів:

підвищення жорсткості контактуючих поверхонь під час тертя;

зменшення міцності адгезійного з'єднання.

Зміцнення жорсткості поверхні перешкоджає пластичному вигинанню та усуває мікророзрізання контактних поверхонь. Це сприяє еластичному вигинанню ділянок зіткнення.

Зниження міцності адгезійного з'єднання є ключовим для запобігання зчеплення металевих поверхонь. Найефективніше ця задача реалізується шляхом розділення поверхонь тертя за допомогою рідкого або твердого мастила.

Перебої в рідкому змащенні виникають через неблагополучні умови експлуатації механізмів. Це включає періоди обкатки, а також старту чи зупинки обладнання. При цьому відбувається крайове фрикційне вплив, коли поверхні відокремлені лише слабкою олійною плівкою. Контактні напруги та підігрів можуть порушити цю плівку та сприяти зчепленню. У таких ситуаціях стає ключовим забезпечення взаємної сумісності поверхонь тертя. Під сумісністю розуміється здатність матеріалів запобігати зчепленню при роботі без змащування або коли цілісність олійного шару порушена.

Через адгезію, металеві частки спершу відриваються від поверхні, а потім піддаються окисленню киснем оточення, перетворюючись на абразивний матеріал.

Головні способи захисту від такого типу зносу включають зміцнення жорсткості контактних поверхонь (через цементування, нітрування), використання змащувальних речовин, лаків, плівкових покриттів із полімерів, які перешкоджають безпосередньому металічному контакту та проникненню кисню до поверхонь тертя.

Після аналізу макроструктури зношених компонентів, які пройшли експлуатацію, стендові та лабораторні тести, визначено стратегії для збільшення їх стійкості до зносу та вантажопідйомності.

У зонах реального контакту між тертьовими парами, специфічна міцність на зсув молекулярних зв'язків може бути виражена наступною залежністю:

$$t = t_o + b \cdot p_r \quad (2.2)$$

Залежно від механічних та опорних характеристик, матеріали, стійкі до зносу, класифікують на три основні категорії:

матеріали з великою жорсткістю поверхні;

антифрикційні матеріали з низьким коефіцієнтом фрикційного ковзання;

фрикційні матеріали з високим коефіцієнтом фрикційного ковзання.

Адекватно відібрані матеріали та методики поверхневого укріплення, такі як застосування плазмових покриттів на реконструйованих з'єднаннях, здатні значно вдосконалити триботехнічні характеристики компонента.

2.2 Операції з підготовки колінчатого валу до відновлення

Оцінка стану колінчатого валу перед ремонтними роботами. В процесі використання, колінчатий вал зазнає впливу тертя, коливань, циклічних навантажень та екологічних факторів, що спричиняє його деформацію, вигинання осі, зношування поверхні, а також утворення подряпин чи тріщин.

Первинними пошкодженнями колінчатого валу вважаються знос корінних та шатунних опор, різьби, а також вигин самого валу.

Решткові напруги, які залишаються в матеріалі після виготовлення валу, та надмірні навантаження сприяють його викривленню. Тертя між контактними поверхнями та корінними та шатунними опорами призводить до їх зносу, зміни геометричних форм, що виявляється у вигляді овальності та конусності. Корінні опори на колінчатому валу мають такий знос, як овальність. Шатунні опори, які зазнають більшого навантаження на колінчатому валу, зношуються інтенсивніше, ніж корінні.

Витягнутий з мотора колінчатий вал проходить через процедуру дефектоскопії та аналізу його геометричної точності. Для перевірки вигину осі,

колінчатий вал поміщають на опорні блоки, обертають його та використовують індикатор для вимірювання вигину. Максимально допустимий вигин складає 0,1 мм. У випадку, коли виявлений вигин перевищує 0,1 мм, здійснюють процедуру випрямлення колінчатого валу (див. рисунок 2.1).

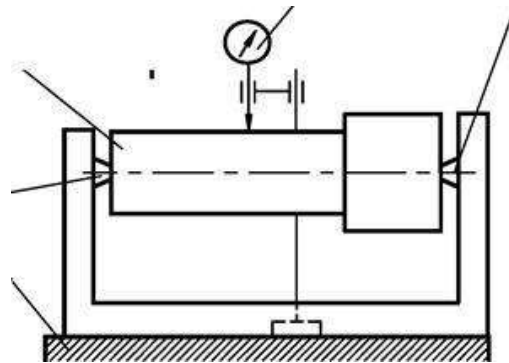


Рис. 2.1. Схема перевірки валів на вигин за допомогою індикатора ІЧ - 02 та штатива ШМ - 11В.

Колінчатий вал також перевіряють на кручення. Геометрія валу аналізується за допомогою індикатора. Для визначення кругових відхилень валу використовують індикатор, що кріпиться на стійку. Для цих цілей вал розміщують на опорних призмах за допомогою кінцевих опор. Проводиться перевірка кругових відхилень хвостовиків та ущільнювальних поверхонь. Розміри зносу корінних і шатунних опор, а також середніх і крайніх корінних опор визначаються шляхом вимірювання їхніх діаметрів. Нарешті, вимірюється еліптичність шатунних опор.

Для кожного структурного компоненту колінчатого валу встановлюють технічні характеристики, габарити згідно зі стандартною технічною документацією, критерії придатності без ремонту, вимоги до точності та якості поверхонь, а також методи виявлення недоліків. Обирають зони вимірювань на корінних опорах колінчатого валу згідно з схемою (див. рисунок 2.2) і проводять вимірювання у зонах I-I, II-II та на двох взаємно перпендикулярних площинах А-А та Б-Б. Розміри шатунних опор вимірюють у зонах I-I, II-II та на двох взаємно перпендикулярних площинах А-А (паралельно площині кривошипа) та Б-Б.

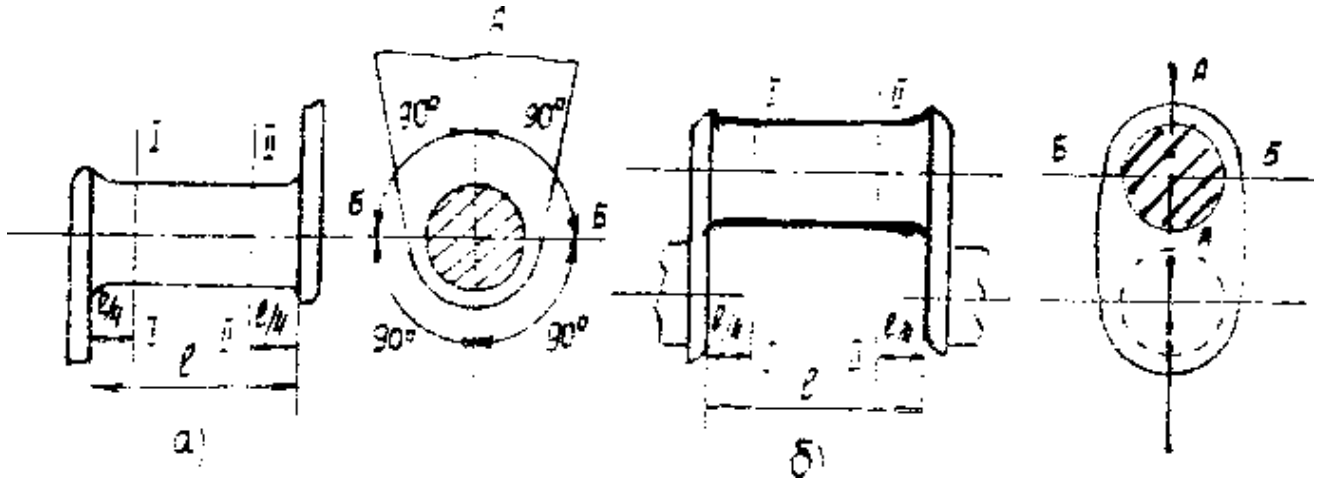


Рис. 2.2 Діаграма для визначення діаметрів опор (а - корінних; б - шатунних).

Поверхні валу, які зазнали зносу, підлягають шліфуванню після процедури його вирівнювання.

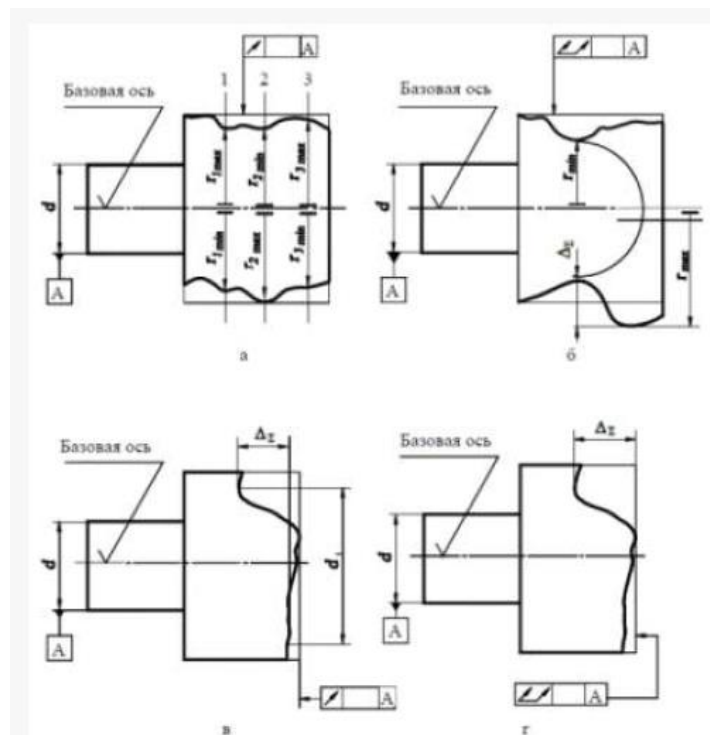


Рис. 2.3 зображено загальні невідповідності у формі та розміщенні: а - радіальні відхилення; б - загальні радіальні відхилення; в - осьові відхилення; г - загальні осьові відхилення.

В процесі використання двигуна існує ризик перегріву опор через збої в роботі підшипників, що може спричинити утворення тріщин у колінчатому

валу. Тріщини, що простягаються до зовнішньої поверхні валу, можна виявити неозброєним оком, тоді як глибокі тріщини, які проникають усередину валу, визначаються за допомогою люмінесцентних, магнітних та ультразвукових методів контролю (див. рис. 2.4, 2.5). Колінчатий вал також перевіряють на наявність ознак корозії, використовуючи візуальний огляд або лупу.

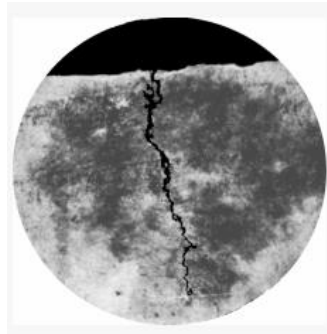


Рис. 2.4. Зображення тріщини, яка проникає у внутрішню частину деталі.



Рис. 3.5 Магнітний апарат для виявлення дефектів. Універсальний дефектоскоп моделі "Томографик" УД4-Т.

Цифрові технології, імплементовані у "УД-4Т Томографик", дали можливість інтегрувати в одному пристрої цілий спектр дефектоскопів з різними функціями, які відповідають специфічним потребам кожного користувача. Вибір та активація потрібного застосунку відбувається через інтерфейс, подібний до Windows, через користувацьке "меню", де кожен режим представлений як окремий прилад для неруйнівного контролю (НК), наприклад, дефектоскоп, товщиномір, тензометр та інші.

Виконують вимірювання кругових відхилень хвостовика та задньої ущільнювальної поверхні. Цей процес проводиться на обертових центрах. У

випадку, коли відхилення перевищує 0,01-0,02 мм, необхідно здійснити корекцію центрових зрізів валу. Виправлення зрізів проводять за допомогою стамески, шліфування та точіння. Серед зазначених методів, найкращі результати показує точіння валу на токарному верстаті з використанням додаткової опори (люнети) (див. рис. 2.6).

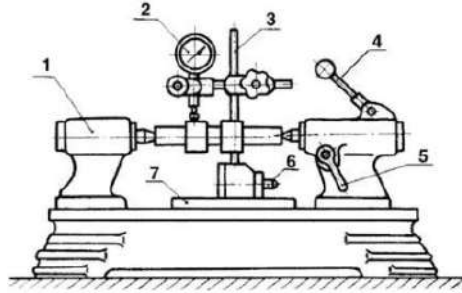


Рис. 2.6. Пристрій для тестування деталей на кругові відхилення на обертових центрах: 1 - точка обертання; 2 - годинниковий індикатор; 3 - опора; 4 - ручка; 5 - хомут; 6 - перемикач управління магнітом; 7 - робоча поверхня.

Після завершення згаданих процедур, вал проходить процес очистки та очищення внутрішніх каналів.

2.3 Встановлення ступеня зношування опорних шийок

Через мінливі умови використання колінчатого валу, його шийки піддаються неоднорідному зносу. Ступінь зношування шийок оцінюють шляхом розміщення колінчатого валу на обертових центрах та вимірювання діаметрів шийок мікрометром у місцях найінтенсивнішого зносу, а також у напрямку, що перпендикулярний до нього. Відмінність у цих показниках демонструє еліптичність шийки.

Для визначення конічності чи бочкоподібної форми шийки проводять вимірювання у трьох різних зонах. Дві зони розташовують на відстані 5-6 мм від країв і третю в центрі шийки. Конусність чи бочкоподібність визначають за величиною різниці розмірів вздовж довжини шийки. (Див. рис. 2.7)



Рис. 2.7 Методик. оцінки конічності опор після використання.

Рівень зношування корінних та шатунних опор колінчатого валу перевіряють використовуючи мікрометр МК 75-1.

2.4 Оцінка зносу місць для монтажу розподільної шестірні

Виконується візуальна оцінка ступеня зношування масляної різьби. Також проводиться аналіз зношування і стану канавки під шпонку; зносу монтажного отвору для зовнішнього кільця кулькового підшипника на кінці валу; стану різьблення.

Здійсніть зовнішній перегляд колінчатого валу для виявлення будь-яких дефектів на вигляд.

Для кожної конструкційної частини визначте технічні характеристики, розміри відповідно до стандартної технічної документації, критерії придатності без ремонту, вимоги до точності та якості поверхонь, а також методи виявлення дефектів (інформацію внести в звітний документ).

2.5 Реставрація колінчатого валу

Зношені шатунні та корінні опори ремонтують шляхом наплавлення з подальшою обробкою до відновлення стандартних розмірів.

Процес наплавлення виконується за допомогою електродів Нп30ХГСА (з діаметром проволочки 1,6 мм).

Параметри наплавлення включають: електричний струм 300...320 А, напруга 26...28 В, швидкість обертання валу 0,65...0,8 обертів за хвилину, та швидкість подачі проволочки 49...58 метрів на годину.

2.6 Теплова обробка колінчатого валу

Після процесу наплавлення колінчаті вали проходять процедуру термічної обробки, зокрема нормалізації. Процес нормалізації здійснюють відповідно до наступного режиму.

Колінчатий вал виготовлений зі сталі марки 45, яка є доевтектоїдним типом сталі. Під час процесу нормалізації, вал підігривають до температури, яка перевищує точку A_{c3} на 30-50 градусів Цельсія, підтримують його у печі для повного переходу початкової ферито-перлітної структури в аустенітну, а потім охолоджують вал у повітряному середовищі. Час нагрівання визначають відповідно до джерел, який становить 1 хвилину на кожен міліметр діаметра деталі. Процедуру нагрівання проводять у камерній печі.

Головна мета нормалізації - це дроблення кристалічного зерна та оптимізація структури для подальшого загартовування та інших процесів.

Остигання у повітряному середовищі відбувається з ритмом 7°C на годину, що сприяє переходу аустеніту в дрібнозернисту структуру, складену з феритних і перлітних (сорбітоподібних перлітних) кристалів. Ця структура має вищу твердість, ніж та, що утворюється у сталі після відпалювання. Після нормалізації твердість валу, включаючи його опори, знаходиться у діапазоні HB180-230.

Після процедури нормалізації колінчаті вали зазвичай проходять механічну обробку на токарних станках. Для багатьох колінчатих валів після процесу наплавлення проводиться обточування п'ятої корінної шийки або третьої до розмірів, які зазначені у технічних вимогах.

По завершенні первинної механічної обробки на верстатах для різання металу, поверхні корінних та шатунних опор проходять теплову обробку, яка включає загартовування та відпуск.

Зазвичай загартовування виконується на устаткуванні з високочастотними пристроями, використовуючи спеціалізовані машини для загартування колінчатих валів. Опори підігривають за допомогою струму високої частоти до температури 900..920°C і потім різко охолоджують, використовуючи воду, при цьому вал залишається нерухомим.

Щоб запобігти появі тріщин у шийках після їх загартування за допомогою струму високої частоти, здійснюють відпуск за температури 170...190°C. Твердість шийок після процедури відпуску становить HRC 52...62, а товщина загартованого шару варіюється від 3 до 5 мм.

Ураховуючи високу енергоспоживаність процесу загартування за допомогою струму високої частоти, було обрано метод лазерного загартування для зміцнення шийок колінчатого валу.

2.7 Теплова обробка опор колінчатого валу

Методика лазерного загартування. У процесі обробки за допомогою лазера, лазерне світло використовується як джерело тепла для матеріалу. Під впливом лазерного променя відбувається перетворення світлової енергії в теплову. Висока концентрація енергії забезпечує швидке нагрівання і короткий час впливу на оброблювану поверхню. Під час лазерної обробки відзначається мінімальне теплове впливання на деталь і мінімізація деформації.

Унікальною характеристикою лазерного випромінювання, що відрізняє його від інших джерел високої концентрації, таких як електронний чи плазмовий промені, є здатність до передачі на великі відстані та направлення в труднодоступні зони, а також відсутність механічного впливу на оброблювану поверхню. Це дозволяє розширити спектр технологічних операцій у різних сферах машинобудування.

Лазерна техніка сприяє зростанню ефективності та якості роботи, підвищуючи точність обробки, та впроваджує майже повністю безвідходний виробничий процес, який відповідає стандартам екологічного захисту. Сучасне розмаїття лазерного обладнання різних модифікацій дозволяє втілювати в життя технологічні процеси з повним рівнем автоматизації.

Залежно від тривалості випромінювання, лазери поділяються на імпульсні та лазери з безперервним випромінюванням. Лазери з безперервною дією випускають лазерне світло з довжиною хвилі 10,6 мкм.

Тоді як імпульсні лазери генерують випромінювання з довжиною хвилі 1,06 мкм. (див. рис.2.8).

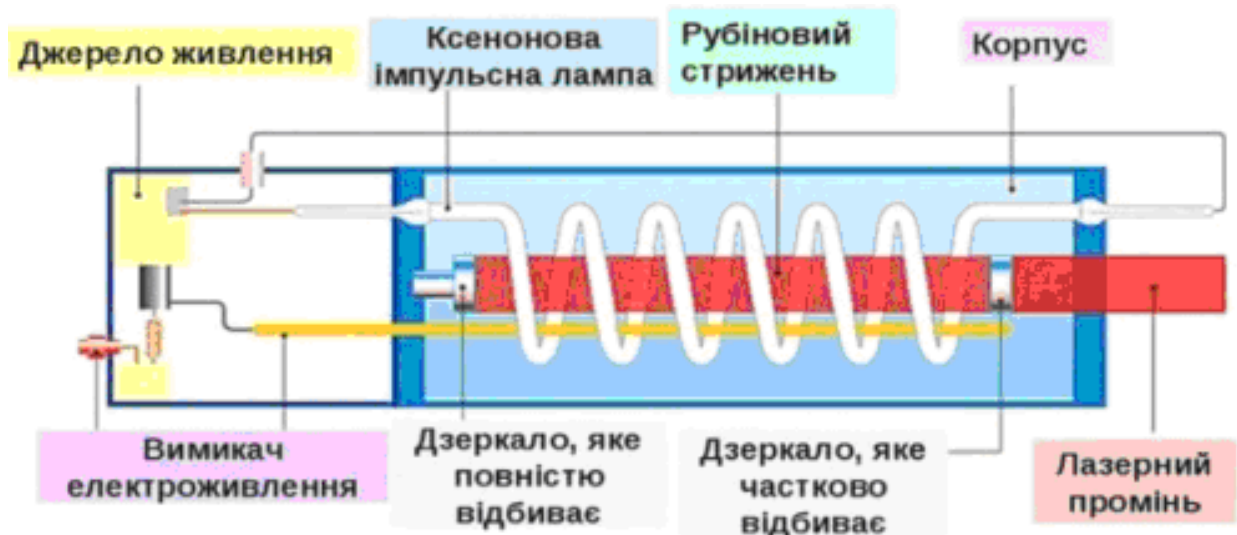


Рис. 2.8. Діаграма конструкції рубінового лазера.

2.8 Лазерне відновлення колінчастих валів

Було підготовлено плоскі зразки, вирізані з цілісного колінчастого валу, а також фрагменти колінчастих валів для обробки. На рисунку 2.9. показані обидві геометрії. На зразках, які мали бути покриті, сірим кольором позначені області, які були механічно видалені. Радіуси плоского зразка з $R = 60$ мм були оброблені після процесу покриття. Іншим типом зразка була циліндрична сталь для кораблебудування з діаметром 80 мм. Типові ширини шатунних шийок становили близько 80 мм. Ширина жолобу, який мав бути покритий, була 50 мм. Глибина від верхнього краю вебу колінчатого валу до поверхні шийки в нижній мертвій точці становила близько 200 мм.

Для точного відтворення первісного контуру вибрано кобальтовий сплав Deloro Stellite 21 за його властивості міцності та гнучкості при високих температурах, відмінну опірність кавітаційній корозії та механічному зношуванню. Також він ефективно обробляється у формі порошку, завдяки

кулястій формі зерен та їх розміру. Сумісність Stellite 21 зі сталями була підтверджена.

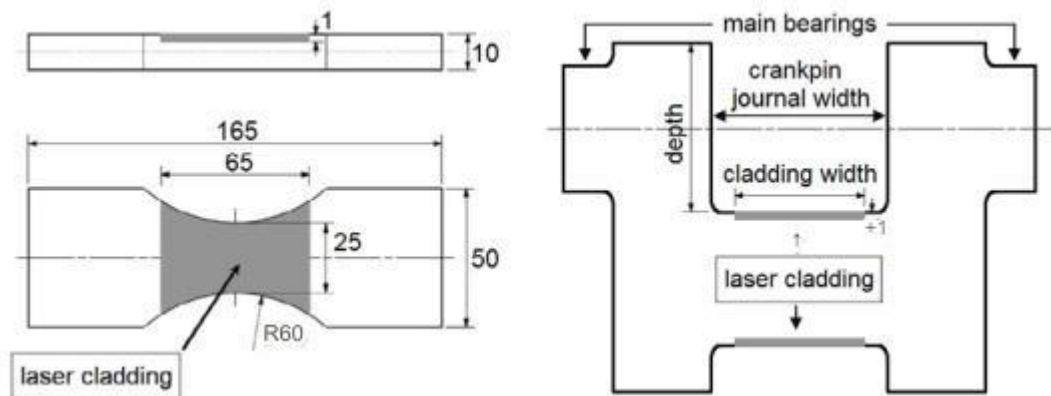


Рис. 2.9. Перспективи зверху та збоку на плоский зразок (зліва) поряд з розрізом сегменту колінчастого валу

Як джерело тепла обрано потужний діодний лазер Rofin-Sinar DL 035Q з максимальною потужністю 3.5 кВт на довжинах хвиль 808 та 940 нм. Ці довжини хвиль ефективніше поглинаються сталлю порівняно з іншими твердотільними лазерами. Обрано формування лазерного променя з фокусною довжиною 300 мм. У профілі променя, зображеному на рисунку 2.10, можна побачити легке відхилення лазерного променя.

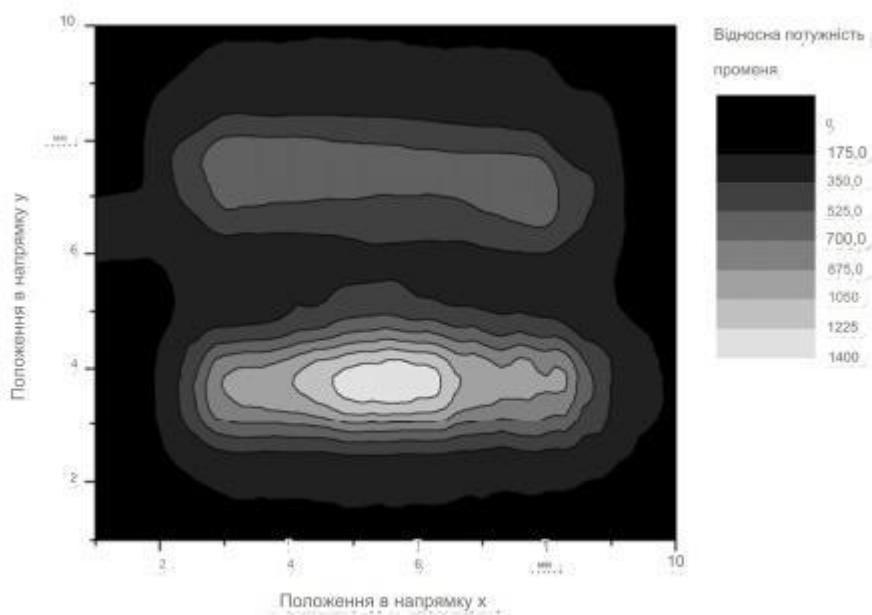


Рис. 2.10. Конфігурація променя високопотужного діодного лазера у фокусованому стані, зосередженого оптикою з фокусною відстанню 300 мм.

Лазерне покриття керувалось швидкодіючим регулювальним механізмом, який фіксував температуру та обсяг розплавленої ділянки за допомогою камери, обладнаної чіпом та адекватним інфрачервоним фільтром. Для забезпечення заданого обсягу розплавленої зони, потужність лазера коригувалася відповідно до її реальних розмірів. Було розроблено різні системи, що функціонують за цим принципом. У цьому дослідженні використовувалася камера з системою контролю, розроблена у IWS-Дрездені, доступна на комерційній основі.

Застосований лазер мав компактні габарити, тому його можна було легко встановити безпосередньо на верстаті з числовим програмним управлінням або на роботі. Проміння безпосередньо спрямовувалося у зону обробки. Під час розробки процесу в лабораторії дотримувалися умов, встановлених геометрією колінчастих валів. Враховуючи обмеження у ширині та глибині області обробки, порошковий матеріал подавався за допомогою ексцентрикової порошкової форсунки. Форсунка та камера для контролю процесу були інтегровані безпосередньо в корпус лазера. Для точного налаштування до системи наплавлення був приєднаний додатковий позиційний лазер. Плоскі зразки кріпились до водоохолоджуваного сталевого блоку.

Для наплавлення сегментів колінчастого валу система наплавлення була встановлена на роботі. Для обробки поверхонь шатунних шийок головна вісь валу була зафіксована на одній стороні ротаційною осі та підтримувалася опорою з іншого боку. Постійна швидкість подачі та орієнтація головки наплавлення до шатунної шийки досягалася за допомогою узгодженого руху валу та робота. У зоні центрального масляного отвору процес не припинявся і потім підлягав шліфуванню до заданої виробником геометрії. На рисунку 2.11. показано головку наплавлення, встановлену на системі маніпуляції робота.

Проведено вивчення впливу змінних параметрів, серед яких:

обсяг розплавленої області;

задана температура;

відступ траси;

темп подачі;

дистанція від об'єкта до камери;

- кут між деталлю та камерою;
- відстань від деталі до порошкової форсунки;
- кут між деталлю та порошковою форсункою;
- відстань від краю оптики до деталі;
- швидкість подачі порошкового газу;
- швидкість подачі порошку;
- швидкість подачі захисного газу.



Рис. 2.11. Установка лазерної головки наплавлення на роботизовану систему маніпуляції, характеристики процесу наплавлення

На початку ізолювані смуги наплавлялись на плоскі зразки з перекриттям, щоб заповнити раніше оброблені канавки. Для повного покриття поверхні початкові та кінцеві точки встановлювались поза поверхнею зразка, таким чином процес лазерного наплавлення розпочинався до досягнення початкового краю зразка та продовжувався після нього. Далі відбулося тестування наплавлення на круглих зразках за визначеними параметрами процесу. Після підтвердження достатньої якості наплавлення за допомогою металографічного аналізу, були оброблені шатунні шийки колінчастих валів.

Якість наплавлених плоских та круглих зразків аналізувалася через вивчення металографічних розрізів з використанням оптичного мікроскопа. Визначення твердості проводилось з використанням приладу для вимірювання твердості за методом Vickers від компанії LECO, модель MHT 210.

Як демонструється на рисунку 2.12, цільова висота напавленого шару в мінімум 1 мм була успішно досягнута. Після шліфування виявилась різниця висоти в 0,2 мм між напавленою ділянкою та прилеглою поверхнею зразка. Зменшена висота напавлення на краях не враховується, адже ці частини були додатково оброблені для формування необхідної конфігурації зразка. Індивідуальні сліди від напавлення легко розрізняються. Старт першого сліду розташовано в верхньому лівому куті. Всі сліди були напавлені в однаковому напрямку. Останній слід був виконаний на крайньому правому боці, тому остання нагріта зона на зразку була розташована у нижньому правому куті.

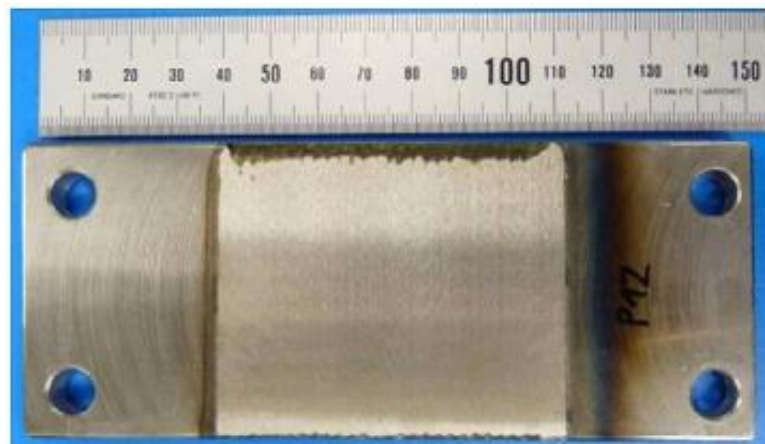


Рис. 2.12. Плоский зразок із канавками та наступним лазерним напавленням після плоского шліфування (зверху: лінійка в міліметрах).

Процес працював дуже стабільно, коли позиціонування між порошковою форсункою, точкою лазерного променя та робочою деталлю знаходилося у вузькому діапазоні. Таблиця 2.1 демонструє набір параметрів, які були визначені під час досліджень.

У контексті даних, фіксованих для окремої траєкторії, що ілюструється на лівій частині рисунку 2.13. спостерігається, що початкова точка у 1 секунду та

кінцева точка на 6.5 секундах, розташовані поза межами зразка, спричиняють істотне збільшення потужності в порівнянні з іншими частинами траєкторії.

Таблиця 2.1. Результативні параметри процесу для контрольованого лазерного наплавлення плоского зразка

Параметр процесу	Значення
Розмір розтопленого пулу (відносні одиниці)	3500
Встановлена температура	1450°C
Ширина сліда	5 мм
Відхилення сліда	2.5 мм
Швидкість подачі	0.6 м/хв
Відстань від деталі до камери	430 мм
Кут між деталлю та камерою	48°
Відстань від деталі до сопла для порошку	6.5 мм
Кут між деталлю та соплом для порошку	52°
Відстань від краю оптики до деталі	278 мм
Розхід газу для подачі порошку (Ar)	8 л/хв
Розхід порошку (Stellite 21)	19.8 г/хв
Розхід газу для захисту (Ar)	17.5 л/хв

Стабільність розміру розплавленої зони підтримувалася на рівні 3500 відносних одиниць. Для оцінки абсолютного розміру розплавленої зони було використано розміри променевої зони, визначені під час тестів на проникнення при зварюванні, які становили приблизно 6х6 мм². Потужність, необхідна для утворення потрібного розміру розплавленої зони, помірно знижувалася уздовж траєкторії.

На правій стороні рисунка представлено графік розподілу температури. Задана температура 1450°C позначена білим кольором. Верхня частина зображення демонструє напрямок подачі матеріалу. Нижня частина характеризується охолодженням до приблизно 1250°C через впорскування порошку, що охолоджує цю область.

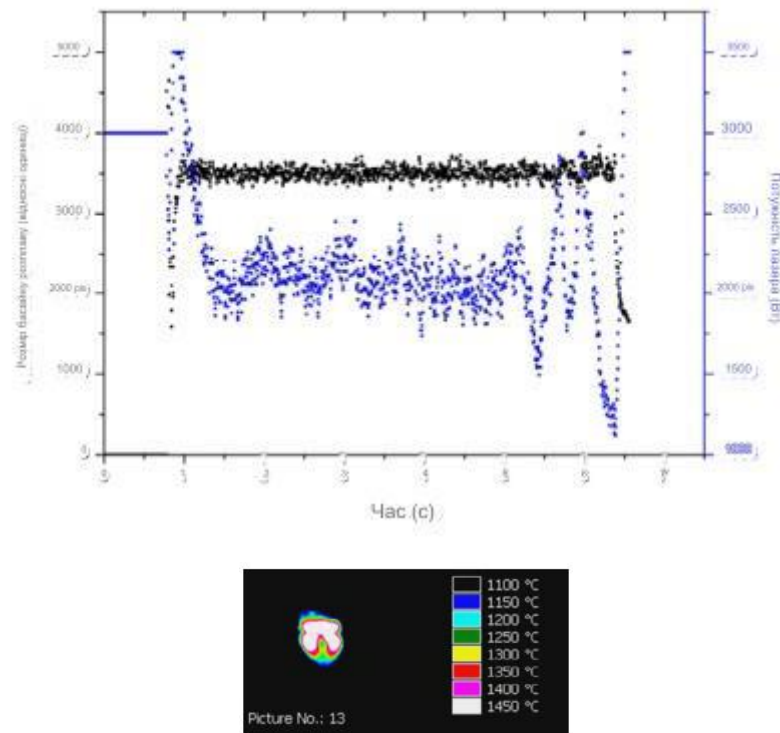


Рис. 2.13. Дані процесу зварювання одиночного шву на рівному зразку, який має незмінну зону розплаву і варіюється за потужністю лазера (зображено на лівій стороні), а також відповідний типовий розподіл температур (на правій стороні).

Металографічне обстеження, представлене зліва на рисунку 2.14, виявило ефективне зчеплення між наплавленим та базовим матеріалами. Більше того, було зафіксовано мінімальне розчинення. Розрізнення між зоною, яка піддалася тепловій обробці (ТПЗ), та первісним основним матеріалом було ясно виділено на етченому перерізі. За результатами випробувань на твердість за методом Віккерса, було виявлено зниження твердості з приблизно 500 HV0.1 до 300 HV0.1 при переході з ТПЗ до незмінного базового матеріалу.

Щоб візуалізувати розподіл твердості між тепловпливовою зоною (ТПЗ) та незмінним базовим матеріалом, було проведено вимірювання за допомогою матриці відбитків. Ці вимірювання здійснювались у центральній частині зразка. На рисунку 2.15. ліворуч представлені самі відбитки, тоді як праворуч - результати їх розподілу. З цих даних видно, що твердість у ТПЗ перебуває на рівні близько 430 HV0.1 і досягає 580 HV0.1 у певних ділянках. У деяких точках можливо зафіксувати значення, що перевищують 760 HV0.1. В той час

як незмінений базовий матеріал виявляє коливання твердості в діапазоні від 250 до 370 HV0.1.

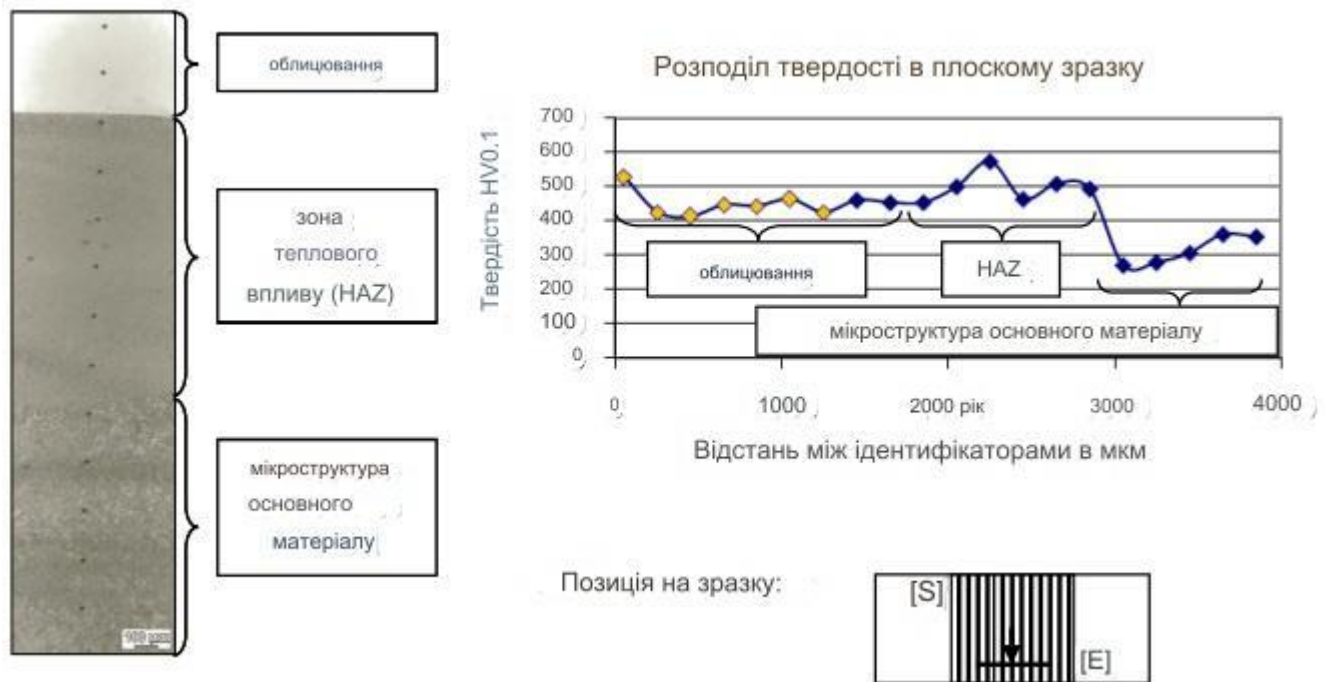


Рис. 2.14. Представлено мікроструктуру (зображено зліва), картографію твердості (у верхній частині, відбитки твердості позначено жовтим, які відсутні на лівому перерізі) та розташування цих двох аспектів на наплавленому плоскому зразку (нижня частина, S: стартова точка, E: фінішна точка).

В контексті калібрування та випробування обладнання, було проведено наплавлення на круглому зразку. У фазі першого оберту, для досягнення потрібного розміру розплавленого басейну у 3500 відносних одиниць, потужність лазера була регульована до максимуму у 3.5 кВт, що видно на рисунку 2.16. По завершенню першого оберту, близько 35 секунд, коли спостерігалось зменшення розміру розплавленого басейну, потужність лазера була знижена до приблизно 2 кВт. Оскільки зразок не був закріплений у центральній позиції, як відображено на графіку потужності, стабільність розміру розплавленого басейну та якості наплавлення все одно зберігалася. Характеристики рівня потужності та розподілу температури були досягнуті в аналогічний спосіб, як і для плоского зразка.

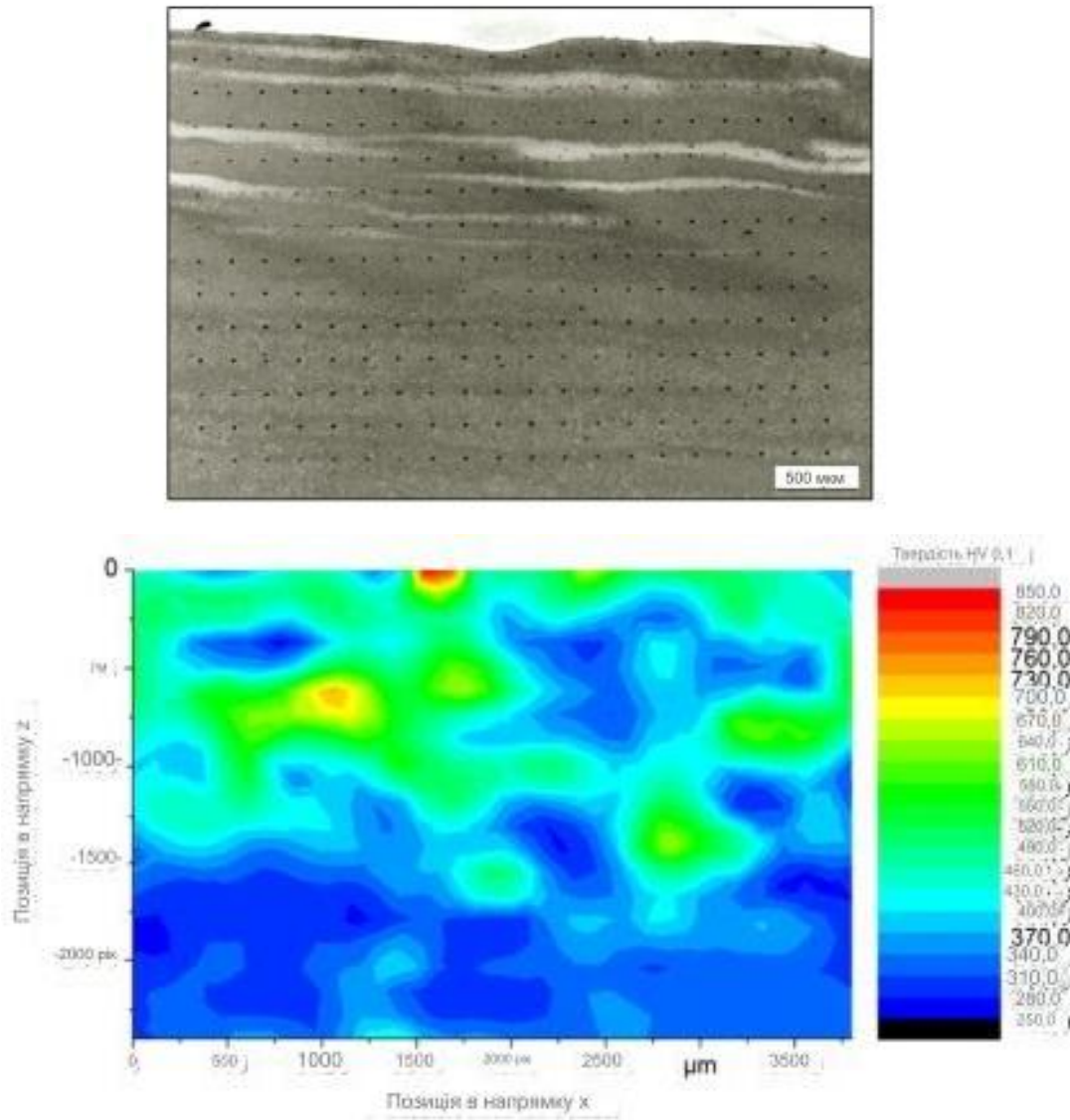


Рис. 2.15. Зображено картографію твердості в зоні теплового впливу (ТПЗ) та на незміненому базовому матеріалі (ліворуч), а також відповідний перетин (праворуч).

Результативна якість наплавлення демонструється на рисунку 2.17. Зчеплення між базовим матеріалом та покривним шаром є відмінним. Вид наплавлення на круглому зразку точно відповідає тому, що було досягнуто на плоских зразках. Окрім того, було забезпечено однаковий рівень висоти наплавлення.

Після ефективного відновлення процедури на круглих зразках, систему було адаптовано для наплавлення на шийках колінчастих валів. Показник цього процесу наплавлення на шийці колінчастого вала демонструється на рисунку 2.18.

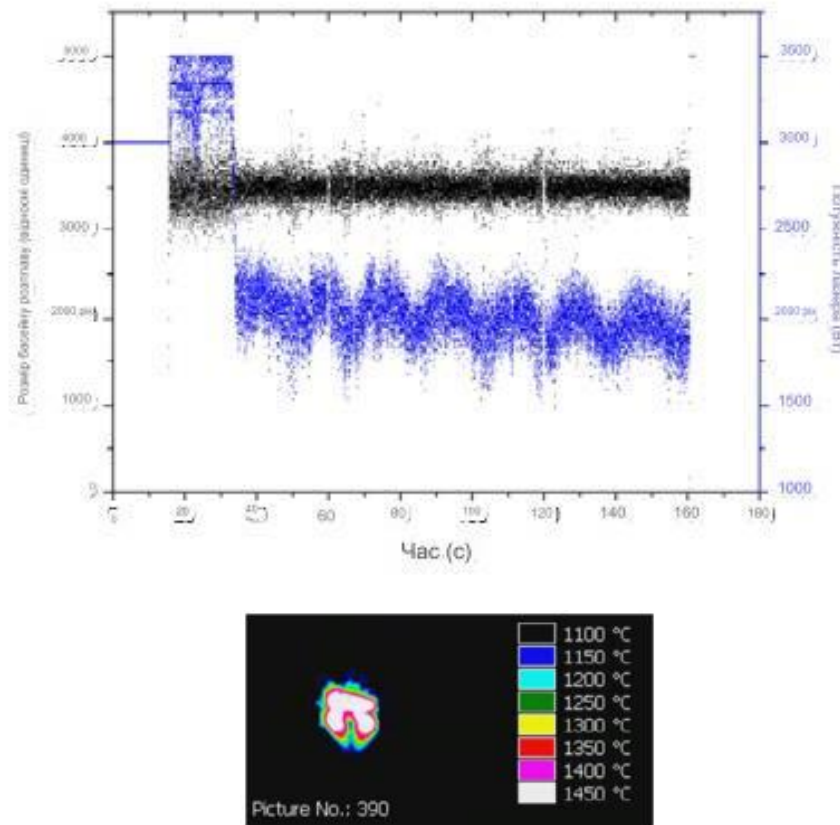


Рис. 2.16. Представлено фіксацію даних процесу з не змінною зоною розплаву та змінюваною потужністю лазера (зліва) та типовим розподілом температури (справа) для круглого зразка.



Рис. 2.17. Зображено перетин лазерно наплавленого круглого зразка

Аналогічно до круглих зразків, потужність лазера під час першого повного оберту була встановлена на максимальному рівні 3.5 кВт, що видно на рисунку 2.19. Згодом, після завершення першого оберту, середня потужність стабілізувалася на рівні близько 2.75 кВт. Щоб забезпечити однаковий розмір розплавленого басейну, потужність довелося налаштувати на 750 Вт вище, ніж для плоских і круглих зразків. На відміну від ефекту акумуляції тепла в менших геометріях, такий ефект не було зафіксовано на повноцінних колінчастих валах чи їх сегментах. Розподіл температури, отриманий у результаті, був ідентичний до тих, які спостерігалися на плоских і круглих зразках.

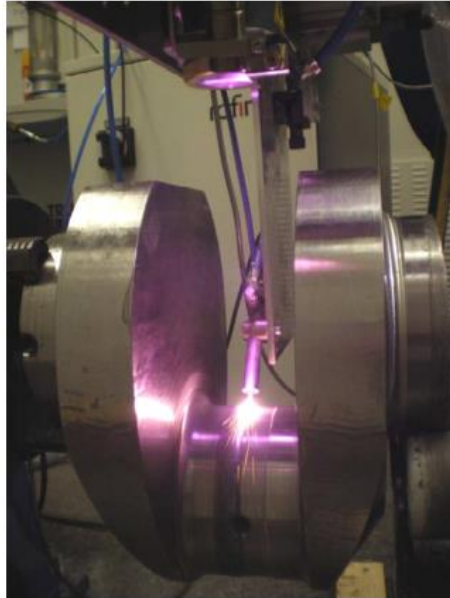


Рис. 2.18. Представлено процес лазерного наплавлення сегмента колінчастого вала.

Повторно відзначаються періодичні коливання від середньої потужності, що можуть бути зумовлені трьома ключовими аспектами. Перш за все, центральний отвір, який можна побачити на рисунках 2.18 та 2.20, оброблявся без припинення процесу. Далі, синхронізований рух робота та обертальної осі ґрунтувався на заздалегідь встановлених точках. Невеликі розбіжності в цих точках призводили до відхилень від оптимального положення процесу, що чутливо впливало на розмір розплавленого басейну. Це змусило збільшити потужність лазера для підтримки консистентного розміру розплавленого басейну. Третім фактором стало неточне кріплення, подібне до того, яке було виявлено на круглих зразках.

На рисунку 2.20. відображено наплавлену шийку колінчастого вала під двома кутами зору. Ширина наплавлення становила близько 50 мм. На зображенні зліва видно, що масляний канал залишився незакритим після наплавлення. На правому зображенні представлено наплавлену область у нижній центральній частині. Обидві фотографії ілюструють області, де колір покриття змінюється від світло-зеленого до синього, що є наслідком незначних відхилень у газозахисному середовищі через різницю в позиціонуванні.

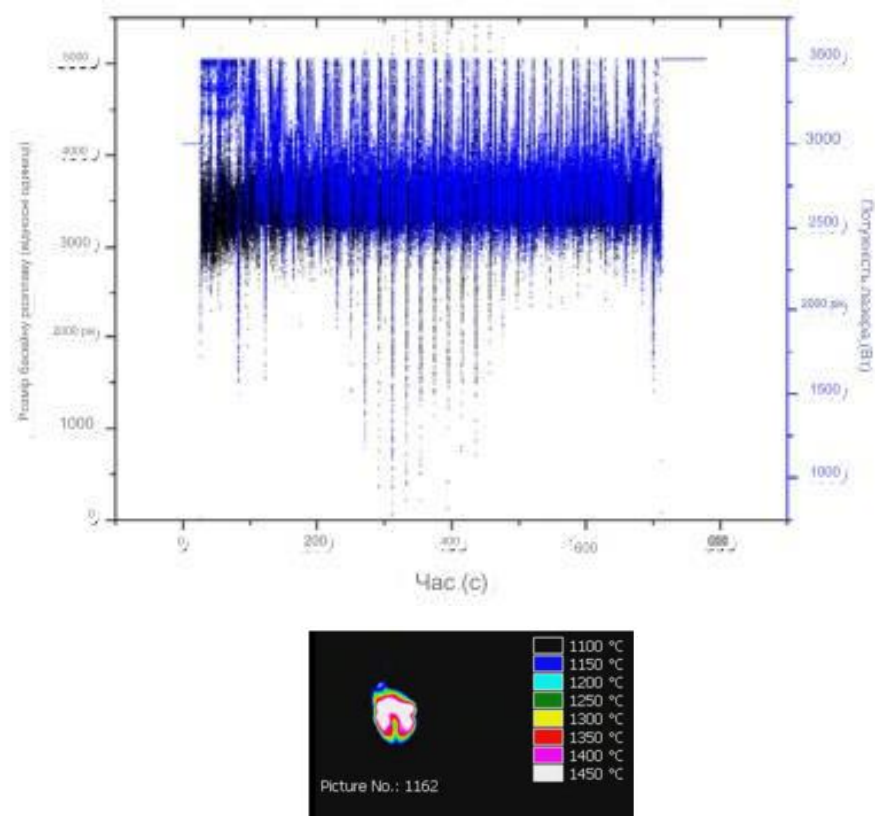


Рис. 2.19. Представлено фіксацію даних процесу із зонами сталого розплаву та змінюваною потужністю лазера (зліва), а також картографію температур (справа) для шийки колінчастого вала.

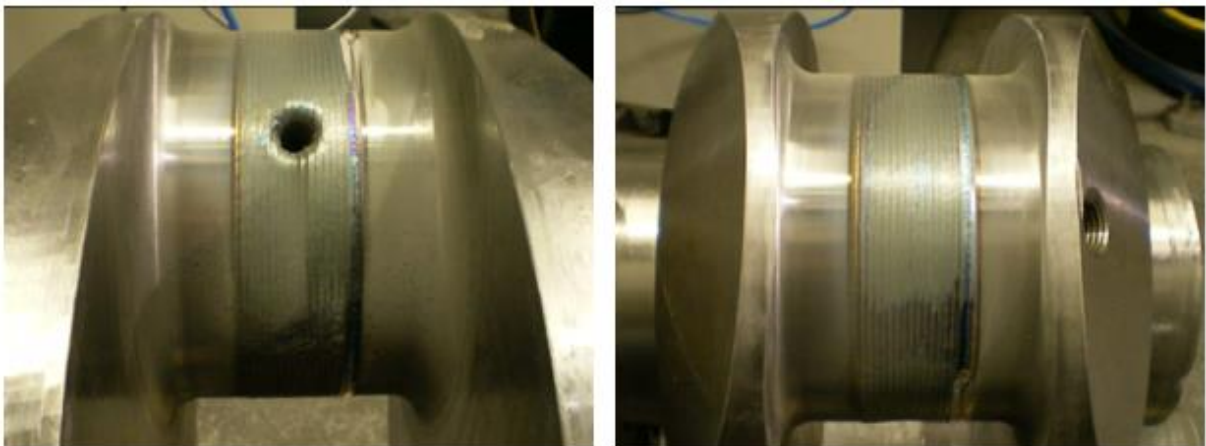


Рис. 2.20. Представлено лазерне наплавлення сегмента колінчастого вала навколо масляного отвору (зліва) та на нижній стороні у положенні нижньої мертвої точки (справа).

На плоских та циліндричних зразках, перші проходи зварювання проводились з більшою потужністю порівняно з наступними. Це було пов'язано з необхідністю внесення певної кількості тепла в деталь для її стабілізації.

Тепло, що генерується лазерним променем, не могло бути ефективно відведене з плоскої геометрії зразка, навіть з урахуванням кріплення та водного охолодження. Порівнюючи оточення останнього наплавленого шару на плоскому зразку (рис. 4) та шийку колінчастого вала (рис. 2.20), можна помітити, що ефекти відпалу спостерігаються лише на плоских зразках менших розмірів. Водночас, тепловідведення в колінчастому валі було значно ефективнішим завдяки великому тепловому розсіюванню від оточуючих матеріалів. Це підтверджується при порівнянні рисунків 2.13 та 2.19., де видно, що для досягнення однакового розміру розплавленої зони потрібна була значно вища потужність лазера.

Надійність процесу наплавлення значно залежала від точного вирівнювання порошкового сопла, лазерної точки та оброблюваної деталі. Для гарантування стабільності процесу з високоякісним наплавленням, порошок потрібно було подавати в напрямку швидкості подачі та під низьким кутом. Ця характеристика впливає з профілю променя високопотужного діодного лазера. Процес залишався стабільним завдяки контролю за розміром та геометрією розплавленої зони.

2.9 Перевірка колінчастого валу після ремонту

Після проведення теплової обробки виконують оцінку колінчастого валу з точки зору його відповідності встановленим розмірам і текстурі поверхні.

Перевірка валу на наявність тріщин за допомогою магнітного дефектоскопа.

Оцінка гладкості поверхні шийок вала. Заключна гладкість шийок вала має відповідати гладкості $Ra = 0,63—0,32$ мкм.

Визначення твердості шийок колінчастого валу. Заміри геометрії колінчастого валу та розмірів шийок (допустимі відхилення не перевищують 0,016- 0,022 мм і відхилення від ідеальної циліндричності не більше 0,005 мм, вібрації кореневих шийок та допоміжних поверхонь повинні бути в межах 0,01 мм до 0,08 мм).

Обробка колінчастого валу розпочинається з обточування шатунних виступів, які вважаються найбільш вразливими ділянками валу. Залишкові напруження у цих виступах після обточування можуть змінити свій рівень, що призводить до викривлення колінчастого валу. Це викривлення може спричинити нерівномірне обертання шатунних виступів і порушення рівноваги в основних валах.

Для валів з низькою жорсткістю, оснащених малодіаметральними шатунними виступами без додаткових противаг, які схильні до спотворень, рекомендується спершу здійснювати обточування основних виступів, а потім шатунних.

Важливо також звертати увагу на радіус скруглення цих виступів. Скорочені скруглення часто ведуть до зниження міцності та ламкості валу. Перед обточуванням шатунних виступів необхідно виконати декілька кроків: балансувати вал за допомогою визначених ваг, а також перевірити його положення за допомогою стативу з індикатором. Далі слід обточувати основні виступи, починаючи з тих, що найбільше зношені, щоб визначити розмір для ремонту. Під час обточування варто пам'ятати, що зменшення основних виступів вимагає збільшення відстані між фланцями, що в свою чергу потребує додаткового обточування відповідних поверхонь валу. Після завершення обточування перевіряється геометрія валу, і лише тоді процес вважається завершеним. Після обробки колінчастих валів овальність не повинна перевищувати 0,3 мм.

Для підвищення якості обробленої поверхні та уникнення гострих країв мікроскопічних нерівностей, які можуть призвести до пошкодження вкладишів у початковій фазі використання двигуна, рекомендується вдосконалення валових виступів шляхом поліровки після їх шліфування. Поліровка здійснюється в декілька стадій: спершу поверхня обробляється папером з дрібними абразивними частинками, а потім використовується абразивний склад.

2.10 Визначення розмірів ділянки технічного обслуговування та ремонту двигунів

Для визначення розмірів робочих просторів можуть бути застосовані наступні методики:

аналітична (орієнтовна) - заснована на обчисленні середньої площі, яка припадає на одне транспортне засіб, одиницю техніки або одного працівника;

графічна (точніша) - з використанням макету плану, де на заданому масштабі відображаються робочі зони (продукційні лінії) та вибране устаткування, з урахуванням класифікації транспортних засобів та дотриманням встановлених норм відстаней між транспортом, устаткуванням та елементами конструкції будівлі;

графо-аналітичний (комбінований) - за допомогою візуалізації планування та аналітичних розрахунків.

В остаточному підсумку, розміри робочих просторів та секцій уточнюються за допомогою графічного підходу під час процесу розробки плану. Обчислена площа виробничого простору може варіюватися в ході планування: до 20% - для об'єктів з розміром до 100 м²; до 10% - для об'єктів площею більше 100 м².

Розміри зон технічного обслуговування, ремонту та діагностики при індивідуальному підході до обслуговування. Приблизні розміри цих зон для діагностики та ремонту транспортних засобів визначаються відповідно до наступної формули:

$$F_3 = (F_a * X_n + \sum F_{об}) * K_{цп},$$

$$F_3 = (9,5 * 3 + 9,78) * 4 = 153,12 (м^2)$$

Коли враховуються стаціонарне, мобільне та вішалкове обладнання, у загальну площу мають бути включені розміри робочих столів, верстатів та полиць, на яких встановлюються ці пристрої та інструменти, а не площі самого

обладнання. У випадку, коли розміри обладнання в плані менші за розміри транспортного засобу, який розміщується над ним, це обладнання не враховується в загальній площі. До таких прикладів належать ліфти з розмірами платформи, які є меншими за габарити транспортного засобу, обладнання у діагностичних ямах тощо.

Після розрахунку площі простору за аналітичною методикою, вона деталізується за допомогою графічного підходу під час розробки плану відповідної ділянки. При цьому враховуються габарити транспортних засобів, які планується розміщувати на робочих місцях.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Показник колінчастого валу

Колінчастий вал обладнаний набором штифтів, що розташовані на валах коксових печей. Ці штифти спираються на відповідні опори всередині картера через систему підшипників. Для забезпечення ефективної роботи цих підшипників необхідний стабільний та адекватний потік масла, що гарантує мінімально потрібну товщину масляного шару для підтримання штифта та попередження безпосереднього контакту між тертими поверхнями. Підшипники отримують масло безпосередньо з системи змащення, в той час як шатунні підшипники забезпечуються маслом через спеціалізовані канали, пробурені у колінчастому валу, які з'єднують його з шатунними підшипниками (див. рис. 4.1).

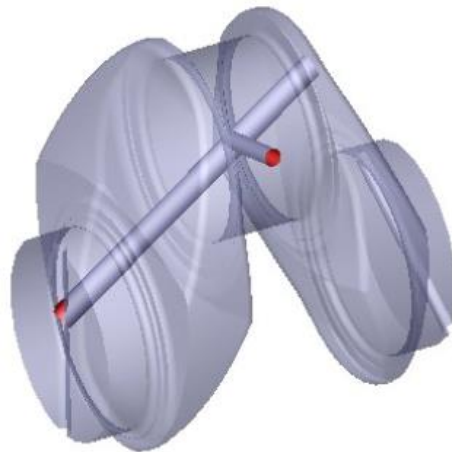


Рис. 3.1. Канали змащення колінчастого валу.

Штифти колінчастого валу, які з'єднуються з шатунами через вставлені втулки, пов'язані з противагами за допомогою колінчастих рук (плечей або щік). Для уникнення значних вібрацій під час роботи двигуна, колінчастий вал мусить бути ретельно збалансований з використанням противаг, розташованих на колінчастих руках з протилежного боку від штифтів колінчастого валу. Розміщення цих штифтів визначається кількістю циліндрів та конструкцією двигуна. У місцях з'єднання штифтів валу та щік потрібно знизити концентрацію напруги, використовуючи спеціальні закруглені радіуси. Функція

фітингів - запобігти подряпинам та перегріву від механічної обробки (токарна, шліфувальна робота) плечей та штифтів, а також покращити розподіл напруги та зменшити вплив нічаїв, що могли б спричинити передчасний втомний розрив компонентів. На одному кінці валу встановлюється маховик, тоді як на іншому - в'язкий демпфер та шків для управління допоміжними механізмами. Елементи, пов'язані з колінчастим валом, показані на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Основні елементи колінчастого валу двигуна.

3.2 Аналіз напружень колінчастого валу

Аналіз структурного стану та напружень колінчастого валу залежить від оцінки динамічних вібрацій. Традиційний метод дослідження напружень колінчастого валу передбачає перехід від реальної системи до еквівалентної системи з узагальненими параметрами. Модель дискретизації спрощує процес розрахунків, але має обмеження у точності отриманих даних. Вона не враховує взаємодію між крутінням, згинанням та осьовими навантаженнями, розглядаючи їх вплив окремо та дозволяючи визначити їхню сумарну дію. Однак ця модель не включає наявність масла в підшипниках коріння та шатуна.

Елементи, такі як картер, шатун, поршень, маховик та допоміжні механізми, не були відтворені в моделі, але їх вплив враховано подібно до методу зосереджених мас. Маса шатуна розділена на обертову та альтернативно-переміщувальну частини, які разом із поршнем та тиском газів впливають на силу, що діє на вал. Для врахування інших компонентів до

колінчастого валу додано еквівалентні інерції мас, безпосередньо з'єднаних з валом (генератор, розподіл, водяний насос).

Сучасні методи розрахунку також вимагають використання експериментальних діаграм для коригування номінальних напружень в зонах концентрації напружень або при наявності різких градієнтів напруження. Для точної оцінки стану напруження у з'єднаннях та визначення коефіцієнта концентрації напруження потрібна тривимірна модель скінченних елементів валу. Перед проектуванням колінчастого валу важливо моделювати вірні обмеження на кінцях компонентів у числовій моделі FEM.

Приблизне застосування обмежень та навантажень допустиме, оскільки критична зона - з'єднувальний канал - розташована достатньо далеко від зон застосування обмежень та навантажень. Ці переконання є важливими для створення числової моделі колінчастого валу. Припускається, що колінчастий вал зазнає фіксованого обмеження або незначних переміщень, в той час як вектори навантажень обертаються відносно валу, щоб скоротити час обчислень. Цей аналіз не замінює динамічний аналіз компонента, але наразі є адекватним наближенням та допомагає усунути невизначеності, спричинені складною геометрією колінчастого валу.

3.3 Створення моделі колінчастого валу за методом скінченних елементів

Необхідність у більш детальному та точному структурному аналізі спонукає до створення чисельних моделей за методом скінченних елементів. Метод скінченних елементів (МСЕ) вважається одним із найбільш ефективних комп'ютерних інструментів у галузі структурної механіки, який дозволяє здійснювати дискретизацію безперервних систем. До доступних 3D елементів скінченних елементів належать тверді "цегляні" елементи та тетраедри.

Елементи вектора переміщень і силового вектора для твердих цегляних елементів мають 24 компоненти, тоді як для тетраедричних елементів - 12, що докладно зображено на рисунку рис. 3.3.

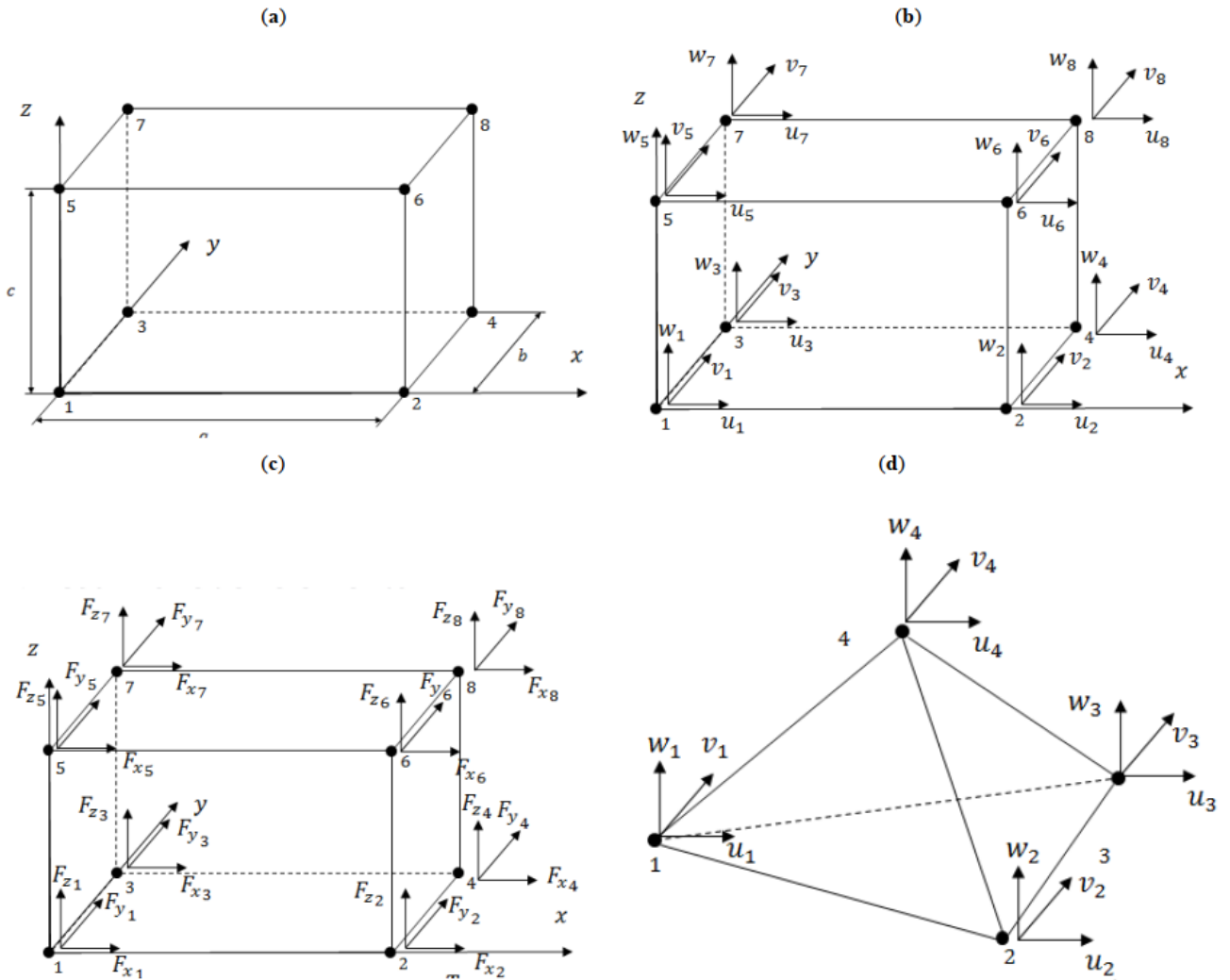


Рис. 3.3. 3D скінченно-елементні методи: (а) твердий восьмиузловий лінійний брик. (б) вузлові відхилення для твердого восьмиузлового лінійного брику. (с) вузлові сили для твердого восьмиузлового лінійного брику. (д) тетраедричні лінійні 3D елементи з чотирма вузлами.

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} \{f_1\} \\ \{f_2\} \\ \{f_3\} \\ \{f_4\} \\ \{f_5\} \\ \{f_6\} \\ \{f_7\} \\ \{f_8\} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{Bmatrix} \quad \{F\} = \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \\ \{F_3\} \\ \{F_4\} \\ \{F_5\} \\ \{F_6\} \\ \{F_7\} \\ \{F_8\} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

У рівнянні 3.2 представлені лінійні функції формування для елементів лінійних "цегляних" типів. Рівняння 3.3 описує вектор лінійних зміщень

кожного вузла. Для формулювання рівнянь 3.2. використовуються 24 незалежних коефіцієнта, починаючи з α_1 і закінчуючи α_{24} . Функції форми створюють взаємозв'язок між зміщеннями вузлів і переміщеннями будь-якої точки у межах скінченного елемента.

$$\begin{cases} u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z + \alpha_5 xy + \alpha_6 xz + \alpha_7 yz + \alpha_8 xyz \\ v = \alpha_9 + \alpha_{10} x + \alpha_{11} y + \alpha_{12} z + \alpha_{13} xy + \alpha_{14} xz + \alpha_{15} yz + \alpha_{16} xyz \\ w = \alpha_{17} + \alpha_{18} x + \alpha_{19} y + \alpha_{20} z + \alpha_{21} xy + \alpha_{22} xz + \alpha_{23} yz + \alpha_{24} xyz \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\{\delta_i\} = \{u_i(x, y, z), v_i(x, y, z), w_i(x, y, z)\}^T \quad (3.3)$$

Можна перетворити рівняння 3.2. у рівняння 3.4, яке корелює переміщення з адаптованими функціями форми N_1 , N_2 та N_3 :

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= [N_1(x, y, z)]\{f\} \\ \{f\} &= \{\{f_1\}, \{f_2\}, \{f_3\}, \{f_4\}, \{f_5\}, \{f_6\}, \{f_7\}, \{f_8\}\}^T \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_1(x, y, z) \\ N_2(x, y, z) \\ N_3(x, y, z) \end{Bmatrix} \{f\}$$

Використовуючи дані переміщень з рівняння 3.2, можна визначити деформації (згідно з рівняннями 3.5 та 3.6).

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{du}{dx} & \gamma_{xy} &= \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \\ \varepsilon_y &= \frac{dv}{dy} & \gamma_{xz} &= \frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx} \\ \varepsilon_z &= \frac{dw}{dz} & \gamma_{yz} &= \frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \left\{ \frac{d[N_1]}{dx} \right\}^T \{f\} \\
\varepsilon_y &= \left\{ \frac{d[N_2]}{dy} \right\}^T \{f\} \\
\varepsilon_z &= \left\{ \frac{d[N_3]}{dz} \right\}^T \{f\} \\
\gamma_{xy} &= \left\{ \frac{d[N_1]}{dy} + \frac{d[N_2]}{dx} \right\}^T \{f\} \\
\gamma_{xz} &= \left\{ \frac{d[N_1]}{dz} + \frac{d[N_3]}{dx} \right\}^T \{f\} \\
\gamma_{yz} &= \left\{ \frac{d[N_2]}{dz} + \frac{d[N_3]}{dy} \right\}^T \{f\}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & D_2 & 0 & 0 & 0 \\ D_2 & D_1 & D_2 & 0 & 0 & 0 \\ D_2 & D_2 & D_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix}$$

Відношення між деформаціями та напруженнями демонструється в рівнянні 3.7).

$$D_1 = E \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad D_2 = E \frac{\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \tag{3.7}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

Функції лінійної форми для тетраедричних лінійних елементів представлені у рівнянні 3.8). Для формулювання рівняння 3.8 використовується 12 окремих коефіцієнтів, які починаються з α_1 і закінчуються α_{12} .

$$\begin{cases} u = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \\ v = \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 z \\ w = \alpha_9 + \alpha_{10} x + \alpha_{11} y + \alpha_{12} z \end{cases} \tag{3.8}$$

Для дискретизації колінчастого валу було застосовано лінійні тетраедричні елементи із чотирма вузлами, здатні відтворювати поле переміщень у межах кожного скінченного елемента, використовуючи лінійні функції формування. Використання таких елементів уможливило застосування автоматизованого методу створення сітки, що сприяло скороченню обчислювального часу. Окрім того, впровадження автоматичного методу сіткування із використанням тетраедричних елементів допомагає запобігти явним розривам у переміщеннях, деформаціях та напруженнях між суміжними об'ємами.

Сітка була удосконалена лише на виїмках колінчастого валу через наявність різких градієнтів напружень. Після створення поверхневої сітки у зонах, що зазнають впливу, була згенерована тверда сітка колінчастого валу автоматичним способом, з середньою довжиною ребра, рівною 10 одиниць. Програмне забезпечення, яке було використане для реалізації числової моделі, – це розв'язувач MSC Nastran. На рис. 3.4 показано удосконалення сітки у канавках між штифтом та щогою.

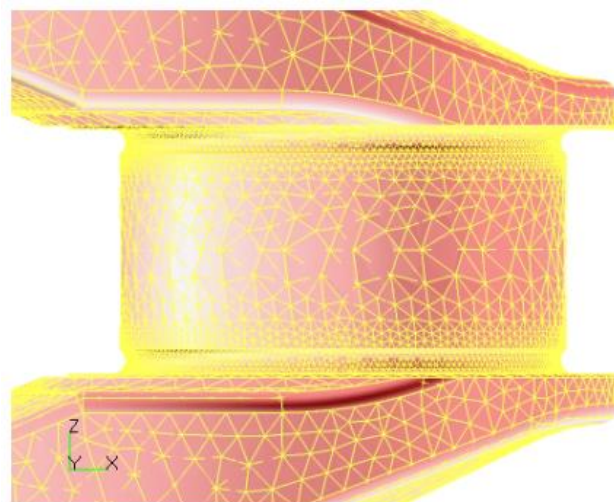


Рис. 3.4. Деталі моделі скінченних елементів колінчастого валу та її удосконалення.

Також зазначено, що при віддаленні від цих зон середній розмір скінченного елемента стає тим, що встановлено алгоритмом для автоматичного генерування сітки. Для удосконалення сітки в якості основного параметра було використано напруження за Мізесом. Максимальний розмір тетраедричних

елементів було зменшено вдвічі на кожному етапі удосконалення сітки, і конвергенція була досягнута дуже швидко. На рис. 3.5. показано діаграму конвергенції до горизонтальної асимптоти моделі у найбільш напруженій зоні між штифтом та щоками (рис. 3.6).

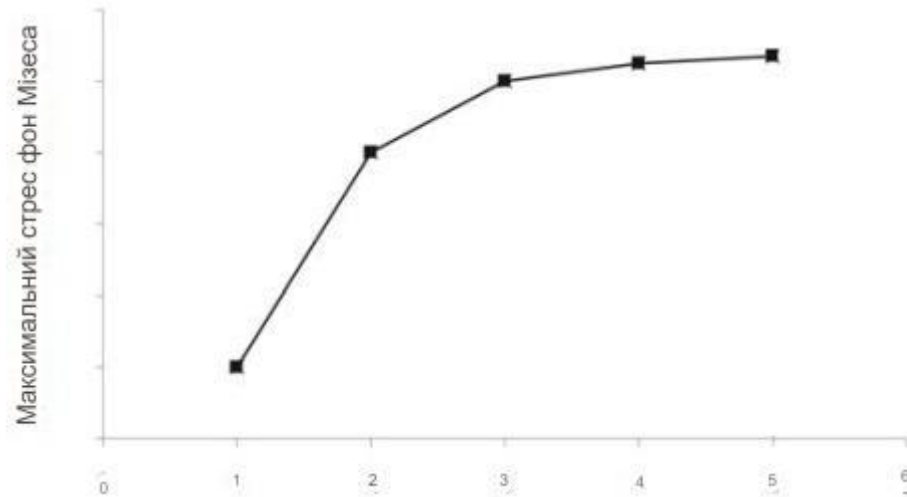


Рис. 3.5. Оцінка точності моделі: поступове уточнення моделі.

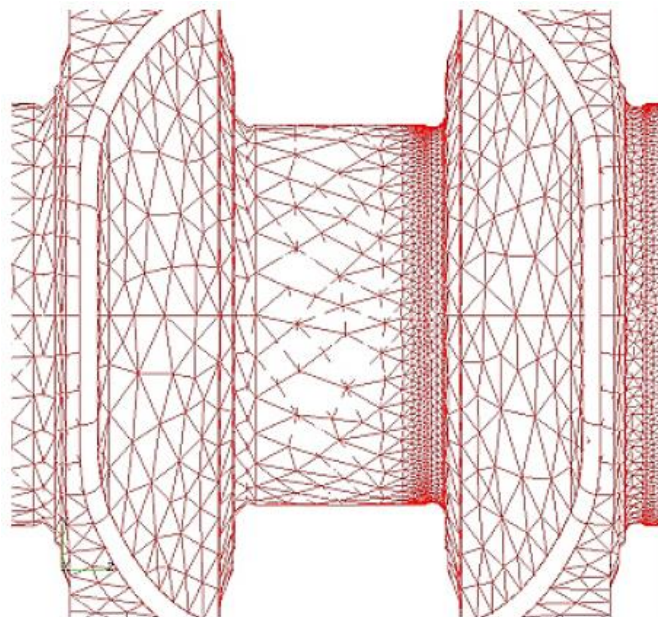


Рис. 3.6. Асиметричне неправильне (ліва сторона) зачеплення деталей колінчастого валу.

Ретельне удосконалення сітки в областях із значним градієнтом напружень та точна оцінка результатів аналізу є критично важливими для адекватного визначення стану напруження. На рисунку 3.6. відображено помилкову оцінку стану напруження в зоні з'єднання на лівій стороні валу, де

аналіз проводився без відповідного локального удосконалення сітки, у противагу правій стороні, де було застосовано більш ретельне удосконалення.

На рисунку 3.7. ілюструються наслідки неправильної асиметричної сітки на розподіл напружень за Мізесом у конструктивному елементі.

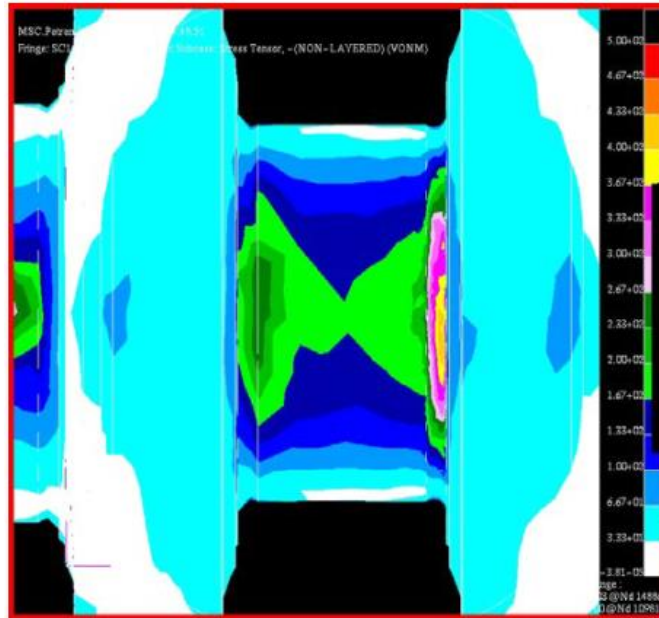


Рис. 3.7. Контур еквівалентного напруження МПа.

Модель скінченних елементів колінчастого валу забезпечує можливість картографування стану напруження компонента для застосування критерію опору проти багатоосьового втомного навантаження, наприклад, за методиками Гофа та Полларда чи за методикою Сайнса (дивіться розділ 6 для оцінки втоми).

3.4 Крутильні вібрації

Крутний момент, який прикладається до валу двигуна, змінюється періодично і не є сталим у часі. Його можна розложити на ряд Фур'є протягом інтервалу, що дорівнює періоду. Таким чином, він представляється як сума синусоїдальних змінних крутних моментів зі збільшенням частот. Колінчастий вал є системою, що може вібрувати під дією крутіння, і наявність частот, що збігаються або є близькими до гармонік двигуна, може бути небезпечною. У такій ситуації резонансу амплітуда вібрацій може необмежено зростати у

відсутності демпфінгу. Це екстремальний випадок, і навряд чи призведе до нескінченних переміщень, оскільки демпфінг зменшує амплітуду навіть у резонансних умовах. Аналіз крутильних вібрацій можна підсумувати наступними етапами:

Перетворення колінчастого валу в еквівалентну модель, яка складається з прямого, еластичного та безмасового валу з розміщеними на ньому еквівалентними інерційними масами, які фактично застосовуються до валу (рис. 3.8). Проводиться порівняння отриманих за допомогою емпіричних формул з літератури значень із результатами, отриманими за допомогою моделей скінченних елементів. Момент інерції колінчастого валу можна легко визначити за допомогою 3D-моделювання твердого тіла, що є доповненням до інерційних мас та мас обертового маховика. Враховується також інерція допоміжних пристроїв, зокрема розподілу, колеса тональності та шківів двигуна, що дозволяє розрахувати еквівалентну інерцію, прикладену до осі обертання.

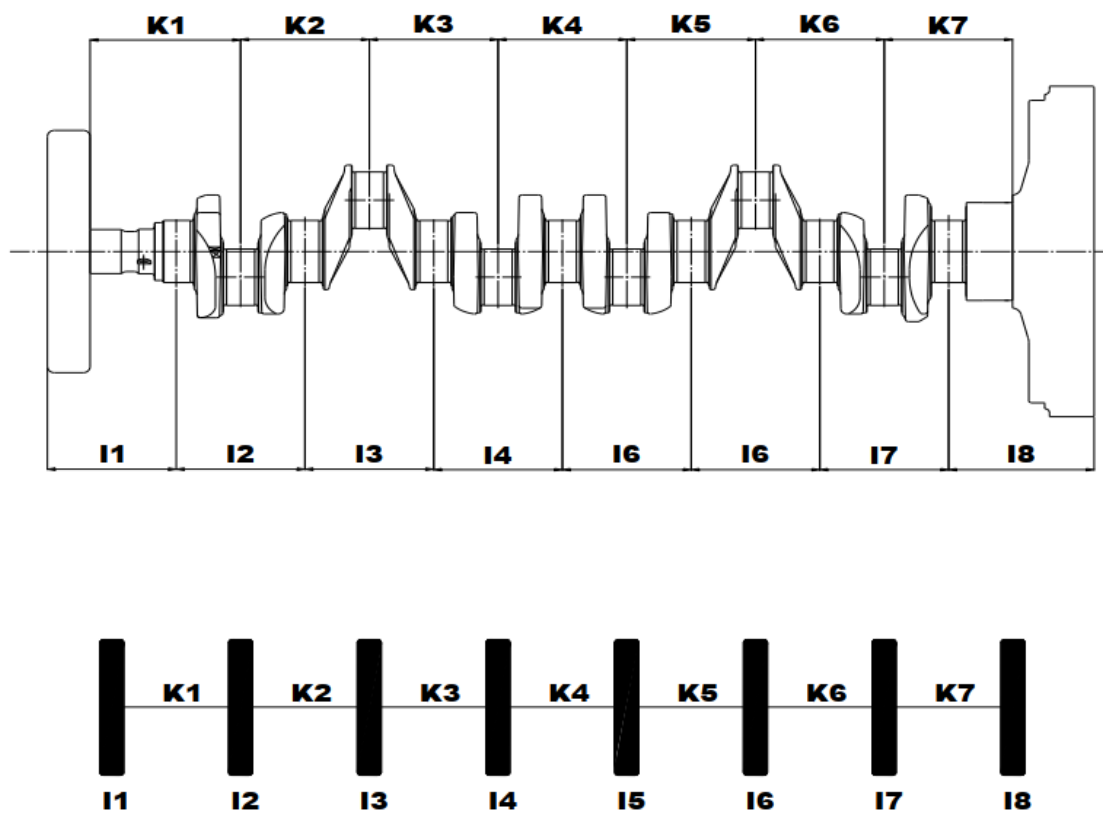


Рис. 3.8. Дискретизація колінчастого валу.

Застосування рівняння Лагранжа до еквівалентної системи зосереджених мас. Результатом є система з восьми рівнянь на вісім невідомих, процес пошуку рішень полягає у визначенні власних значень та власних векторів. Це дозволяє визначити частоти вібрацій системи та їх характерні режими вібрації. Далі виконується гармонічний аналіз крутного моменту двигуна, зумовлений тиском газу та інерційними силами. У кожному циліндрі чотиритактного двигуна існує модель, яка повторюється кожні два обороти. Будучи періодичною функцією з періодом 4π , вона може бути розкладена в ряд Фур'є: окремо визначаються гармонічні компоненти, зумовлені тиском газу та силами інерції, які згодом будуть комбіновані.

Аналізуючи дві початкові частоти, ми досліджуємо умови резонансу, коли частота одного з гармонічних компонентів двигуна співпадає з однією з частот системи.

Крутильні напруження, які були виявлені в ході аналізу, мають бути обраховані в залежності від обертової швидкості колінчастого валу. Ця процедура повторюється, якщо до колінчастого валу додатково прикріплений гаситель крутильних вібрацій. Цей гаситель здатен абсорбувати та розсіяти енергію вібрацій, передану від гармонійного джерела збудження, тим самим знижуючи крутильні вібраційні напруження, якщо він правильно підібраний за розмірами. Присутність в'язкого гасителя дозволяє знизити пікові значення крутильних напружень.

На діаграмі рис. 3.9 представлено характер крутильних напружень, спричинених крутильними вібраціями в колінчастому валу, які є результатом проведеного аналізу.

3.5 Гасителі крутильних вібрацій

У випадку, коли колінчастий вал опиняється в резонансі з одним із гармонічних компонентів двигуна, крутильні вібраційні напруження можуть набувати таких значень, що вони здатні спричинити розрив за короткий час. Це можна уникнути, встановивши гаситель крутильних вібрацій, який здатний абсорбувати та розсіяти енергію вібрацій, передану до валу від гармонійного

джерела збудження. Наразі використовуваний гаситель на валу двигуна знаходиться у в'язкій рідині. Його монтували на кінці колінчастого валу, де амплітуди коливань більші, з протилежного боку від маховика двигуна. В'язкий гаситель складається з інерційної маси у корпусі, прикріпленому до колінчастого валу. Проміжки між масою та внутрішнім кільцевим зовнішнім корпусом заповнені в'язкою рідиною, в'язкість якої зменшується з підвищенням температури. Взаємодія між внутрішньою масою та корпусом відбувається через в'язкі сили, що передаються проміжною рідиною, оскільки між ними немає прямих з'єднань.

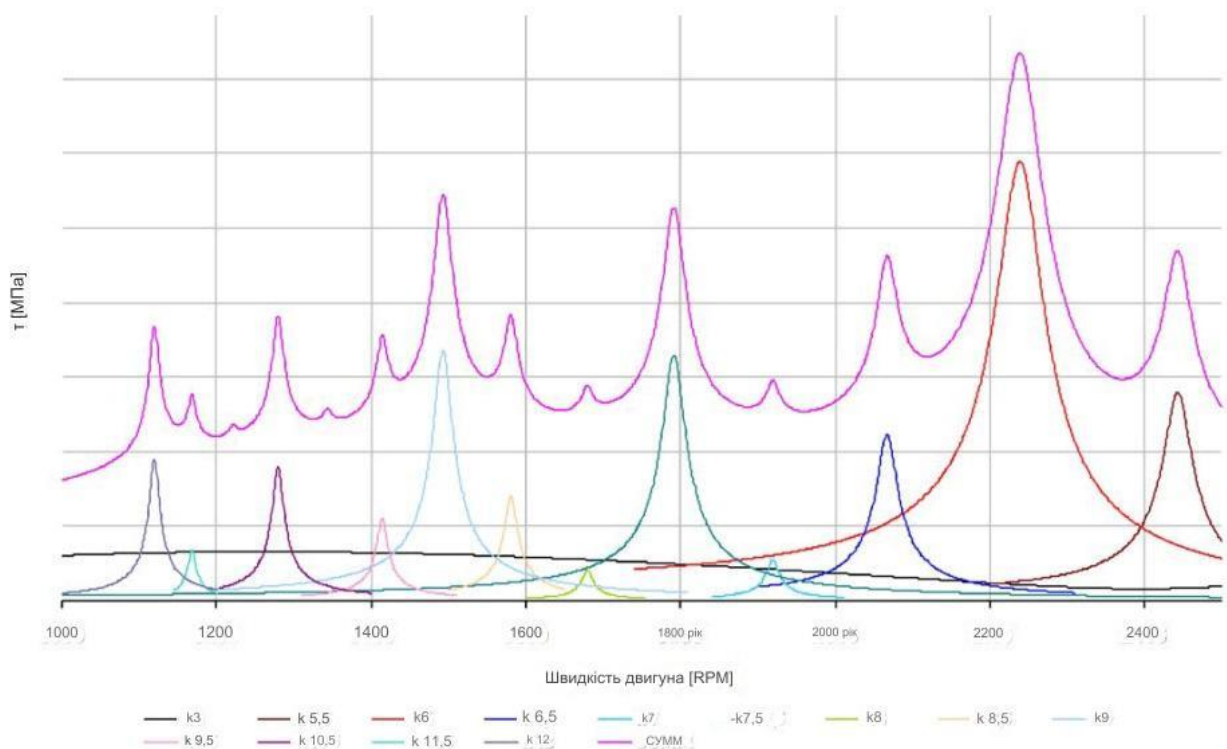


Рис. 3.9. Діаграма крутного напруження.

Встановлення гасителя цього типу передбачає монтаж маси (маховика) на вал двигуна. Цей механізм знижує амплітуди вібрацій завдяки розсіюванню енергії силами в'язкого опору. Схема системи з гасителем представлена на 3.10.

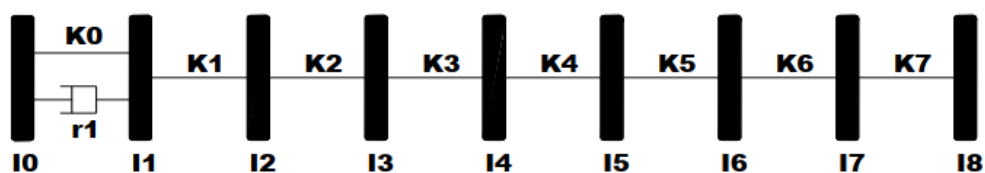


Рис. 3.10. Дискретизація системи з амортизатором.

3.6 Концентрація напружень

Реальні рівні напружень зазвичай перевищують номінальні через ефект виїмки, що відображає вплив геометрії колінчастого валу, що може спричинити концентрацію напружень. Колінчастий вал піддається і згинальним діям, і крутильним навантаженням: в таких випадках слід використовувати коефіцієнт концентрації напружень для згинальних напружень k_f та окремий коефіцієнт для крутильних напружень k_t . Зони кріплення шатунів колінчастого валу є найбільш навантаженими ділянками колінчастого валу.

Коефіцієнт концентрації згинальних напружень k_f визначається як відношення максимального згинального напруження до номінального згинального напруження, що вказано у рівнянні 3.9:

$$k_f = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}} \quad (3.9)$$

Обов'язкова умова для цього полягає у використанні матеріалу, який характеризується як однорідний та ізотропний із лінійно-еластичною властивістю. Виходячи з цього припущення, k_f визначається виключно геометрією елемента. Розрахунок номінального напруження в області штифта колінчастого валу, де напруження досягає свого піку, можливий за допомогою рівняння 3.10:

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{M_f}{W_f} = \frac{32 \cdot M_f}{\pi \cdot D_b^3} \approx 0.04 \text{ МПа} \quad (3.10)$$

$M_f = 1000 \text{ Нмм}$ = момент згину, що застосовується.

$D_b = 63.5 \text{ мм}$ = діаметр штифта колінчастого валу.

W_f = модуль опору при згині.

Використання аналізу скінченних елементів дозволяє оцінити найбільше напруження, що виникає внаслідок згинального навантаження. Встановлення

обмежень і навантажень на модель скінченних елементів зображено на рис. 3.11.

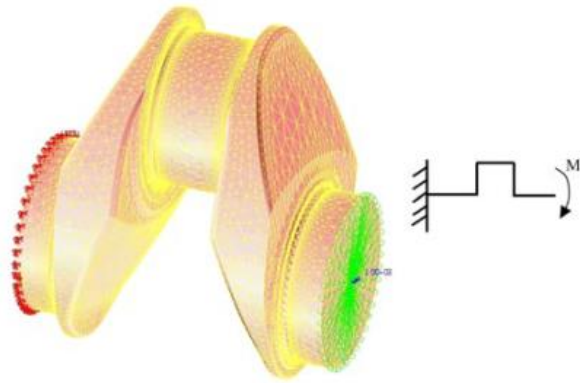


Рис. 3.11. Модель методу скінченних елементів (FEM) колінчастого валу, яка використовується для розрахунку коефіцієнта k_f .

Обмеження в моделі скінченних елементів блокують будь-яке переміщення уздовж осей X, Y, Z для вузлів, розташованих на поверхні штифта підшипника, що є перпендикулярною до осі обертання валу. На протилежній поверхні застосовано одиничний момент згину за допомогою механізму MPC (багатоточкове обмеження). Цей механізм здатний передавати сили або дії згину від центрального вузла, розміщеного на поверхні, де застосовується навантаження, до всіх незалежних вузлів цієї поверхні, ніби момент згину дійсно прикладений до противаги штифта. Рис. 3.12. демонструє конструкцію елемента MPC.

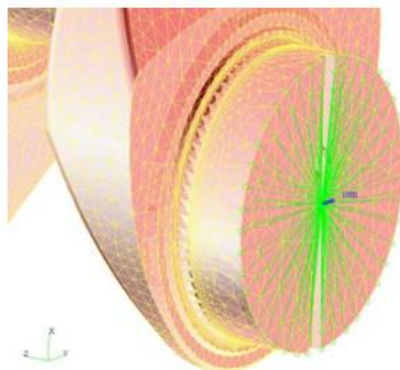


Рис. 3.12. Особливість обмеження.

Згідно з аналізом, найвищий рівень напруження спостерігається в областях з'єднань між штифтом колінчастого валу та їхніми щоками. На рисунку 3.13. ілюструється розподіл напруження уздовж осі Z.

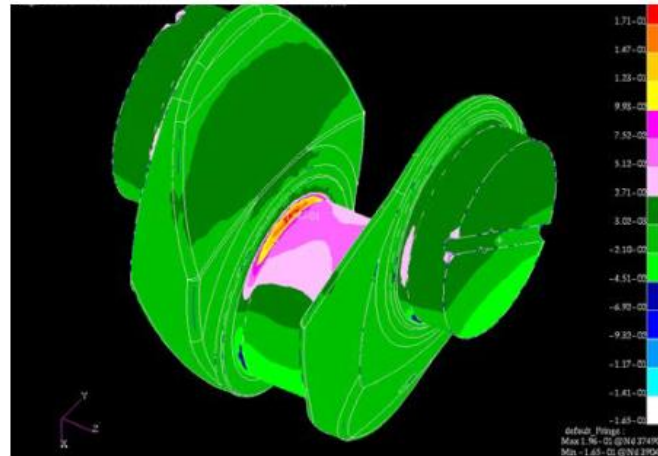


Рис. 3.13. Стан напруження, викликаний одиничним моментом згину, σ_Z МПа.

Значення максимального напруження становить:

$$\sigma_{max,Z} = 0.20 \text{ МПа}$$

На даному етапі можна виконати розрахунок коефіцієнта концентрації згинальних напружень:

$$K_f = \frac{\sigma_{max,Z}}{\sigma_{nom}} = \frac{0.20}{0.04} = 5$$

Для визначення прискорень у нижній частині шатуна необхідно провести детальний аналіз кінематики кривошипно-шатунного механізму. Розрахунок впливу газів на поршні здійснюється шляхом використання даних про тиск газів у камері згоряння, який залежить від кута обертання кривошипа та встановлено на основі експериментальних досліджень. Результатом є визначення сили, що передається шатуном, яка складається з інерційної та тискової складових. Ця сила може бути поділена на радіальну та тангенціальну компоненти, як показано на рисунку 3.14.

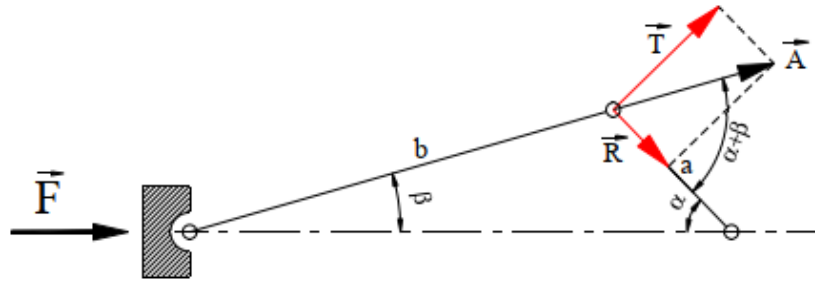


Рис. 3.14. Елементи сил, які передаються в області шийки кривошипа.

Важливо провести аналіз вигинного моменту та крутного моменту в найважливішій частині кривошипа, а також в місцях з'єднання між шийкою та щокою, на протязі цілого циклу роботи колінчастого валу (720°). Це необхідно для оцінювання здатності колінчастого валу витримувати втомні навантаження (див. вис. 3.15, 3.16).

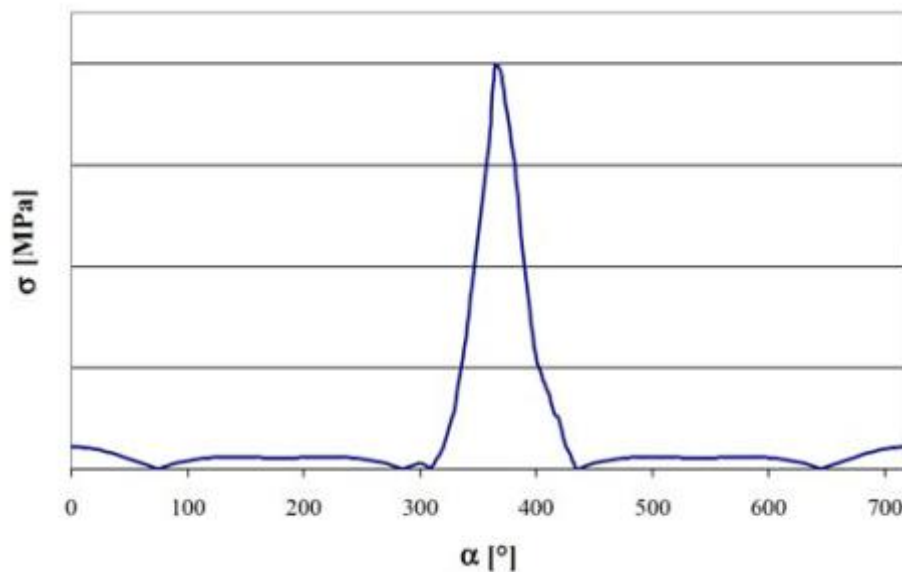


Рис. 3.15. Розподіл вигинних напружень σ у місцях з'єднання шийки та щоки.

Вивчення розподілу напружень надає можливість ідентифікувати середні та змінні складові вигинних і зсувних напружень, які є критичними для використання діаграми Гайя. Ця діаграма надає змогу візуально встановити граничні вигинні та зсувні напруження. Отримані дані разом із максимальними величинами напружень складають основу для застосування багатоосового критерію оцінки втомної міцності.

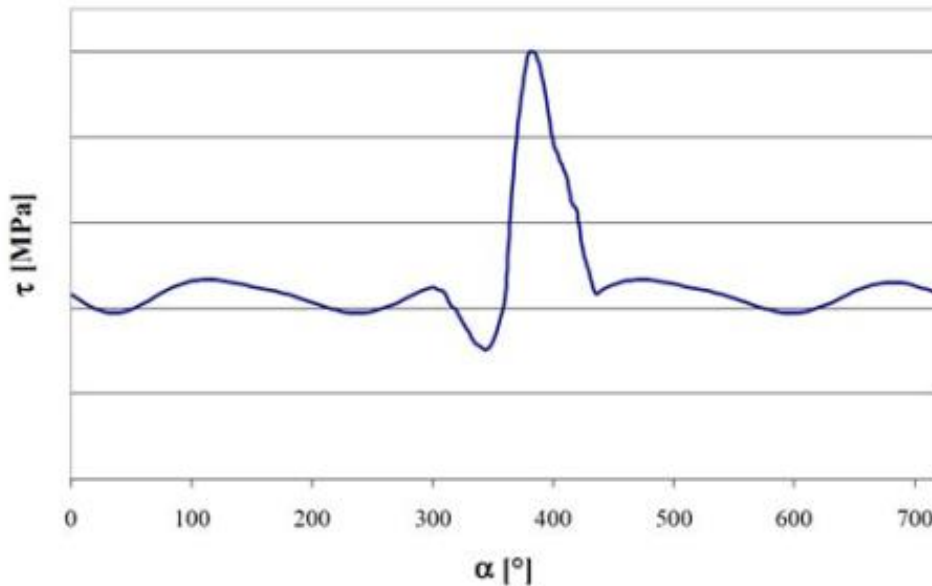


Рис. 3.16. Розподіл крутильних напружень τ у місцях сполучення шийки та щоки.

Використаний для цього критерій розроблений Гофом та Поллардом і застосовується у випадках втомних навантажень, пов'язаних з вигином та крутінням.

$$\sigma_{GP} = \sqrt{\sigma_{\max}^2 + H^2 \tau_{\max}^2} \leq \sigma_{\text{атм}} = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\eta} \quad H = \frac{\sigma_{\text{lim}}}{\tau_{\text{lim}}} \quad (3.11)$$

Було створено математичні моделі. Для достовірної перевірки міцності колінчастого валу необхідно було провести експериментальну оцінку ряду параметрів, зокрема коефіцієнта демпфірування. Описана процедура може бути адаптована до інших типів колінчастих валів.

3.7 Навантаження на поверхні шийки кривошипа

Визначення навантаження на поверхні шийки кривошипа можливе двома основними підходами: за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для динамічного аналізу або шляхом аналітичного застосування принципу імпульсу та закону збереження кутового моменту. Наш аналіз

включав аналітичне визначення цих навантажень, хоча для підтвердження отриманих результатів також використовувався модуль.

Тискові характеристики газів були розроблені командою SZEngine і доступні для робочого діапазону двигуна від 4000 до 12000 об/хв, з інтервалом у 500 об/хв.

Під час аналітичних обрахунків кутова швидкість колінчастого валу припускалась незмінною, що значно спрощує процес обчислення, при цьому рівень помилок залишається низьким, менше 1%. У рамках розрахунків спочатку визначалися кінематичні, а потім динамічні властивості шатуна. На наступному етапі сила, яка діє на шийку кривошипа, виводилася на основі закону Ньютона про дію та протидію.

На рис. 3.17. вектор \vec{r}_2 представляє шатун, а \vec{r}_1 моделює кривошип. На основі рис. 3.17 можна записати наступне векторне рівняння:

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_2 + \vec{r}_3 = \vec{0}. \quad (3.12)$$

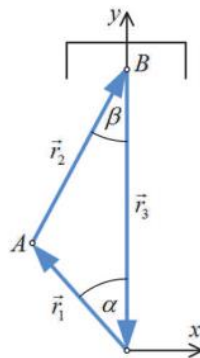


Рис. 3.17. Векторна модель кривошипно-шатунного механізму.

Виконуючи одноразову диференціацію згаданого векторного рівняння за часом, ми отримаємо значення кутової швидкості шатуна. Застосування подвійної диференціації до цього ж рівняння дозволяє обчислити кутове прискорення шатуна.

$$\omega_2 = \frac{-\omega_1 r_1 \cos \alpha}{r_2 \cos \beta}, \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\omega_1^2 r_1 \sin \alpha + \omega_2^2 r_2 \sin \beta}{r_2 \cos \beta}. \quad (3.14)$$

Оскільки прискорення точки А відоме, можливо визначити прискорення будь-якої точки Р шатуна, використовуючи значення кутової швидкості та кутового прискорення:

$$\vec{a}_P = \vec{a}_A + \vec{\varepsilon}_2 \times \vec{r}_{AP} - \omega_2^2 \vec{r}_{AP}, \quad (3.15)$$

Аналізуючи кожен елемент (3.15), встановлюється прискорення точки Р.

$$\begin{aligned} \vec{a}_P = & (r_1 \omega_1^2 \sin \alpha - \varepsilon_2 r_{AP} \cos \beta + \omega_2^2 r_{AP} \sin \beta) \vec{e}_x + \\ & + (-r_1 \omega_1^2 \cos \alpha - \varepsilon_2 r_{AP} \sin \beta - \omega_2^2 r_{AP} \cos \beta) \vec{e}_y \end{aligned} \quad (3.16)$$

Маючи інформацію про масові параметри шатуна m_h , J_h , вагу поршня m_d , а також про прискорення точки Р, зазначене раніше, можливо обчислити сили, які впливають на шатун (див. рис. 3.18). На цьому рисунку символ S вказує на центр ваги шатуна.

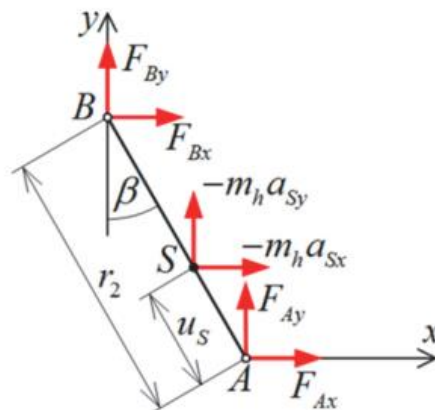


Рис. 3.18. Дія сил на шатун.

Використання принципу імпульсу для аналізу руху поршня у вертикальному напрямку (у):

$$m_d a_d = F_g + (-F_{By}) \Rightarrow F_{By} = F_g - m_d a_d . \quad (3.17)$$

Застосування принципу імпульсу для шатуна в напрямку у:

$$F_{By} + F_{Ay} = m_h a_{Sy} \Rightarrow F_{Ay} = m_h a_{Sy} - F_{By} . \quad (3.18)$$

Реалізація принципу кутового моменту для визначення обертання шатуна довкола точки В:

$$\underline{J}_S \bar{\varepsilon}_2 + \bar{\omega}_2 \times \left(\underline{J}_S \bar{\omega}_2 \right) + \bar{r}_{BS} \times m_h \bar{a}_S + m_h \left(\bar{\omega}_2 \times \bar{r}_{BS} \right) \times \bar{v}_B = \bar{M}_B , \quad (3.19)$$

де $\bar{v}_B = v_B \bar{e}_y$ - це швидкість точки В, значення якої може бути визначене наступним чином:

$$v_B = -\omega_1 r_1 \sin \alpha - \omega_2 r_2 \sin \beta . \quad (3.20)$$

Необхідно підкреслити, що значна кількість літературних джерел, наприклад, пропонують тільки скорочену версію принципу кутового моменту для твердих тіл, в якій відсутній четвертий елемент у лівій частині рівняння (3.19). Проте, при застосуванні принципу кутового моменту до рухомої точки В, як у цьому випадку, необхідно додати четвертий елемент, який включає швидкість точки В. Якщо цей елемент не врахувати, то х-компонента сили, що діє у точці А, описується рівнянням (3.21), тоді як з урахуванням цього елементу – рівнянням (3.22):

$$F_{Ax} = \frac{J_h \varepsilon + m_h a_{Sy} (r_2 - u_S) \sin \beta + m_h a_{Sx} (r_2 - u_S) \cos \beta - F_{Ay} r_2 \cos \beta}{r_2 \sin \beta} , \quad (3.21)$$

$$F_{Ax} = \frac{J_h \varepsilon + m_h a_{Sy} (r_2 - u_S) \sin \beta + m_h a_{Sx} (r_2 - u_S) \cos \beta - F_{Ay} r_2 \cos \beta + m_h \omega_2 r_{BS} \cos \beta v_B}{r_2 \sin \beta} \quad (3.22)$$

Використання принципу імпульсу для аналізу руху шатуна у горизонтальному напрямку (x):

$$F_{Ax} + F_{Bx} = m_h a_{Sx} \Rightarrow F_{Bx} = m_h a_{Sx} - F_{Ax} \quad (3.23)$$

Сила, прикладена до шийки кривошипа колінчастого валу С, є відповідною протилежною силою до тієї, яка впливає на точку А шатуна:

$$F_{Cx} = -F_{Ax}, \quad F_{Cy} = -F_{Ay}. \quad (3.24)$$

При швидкості двигуна 8000 об/хв було виконано та порівняно розрахунки тангенціальних та радіальних компонент сили, що діє на шийку кривошипа, з результатами, отриманими за допомогою програми Creo Mechanism (Рис. 3.19, 3.20). У процесі порівняння було виявлено відповідність, але – як видно на малюнках – між двома аналітичними рішеннями можна помітити невелике відхилення, яке представлено на діаграмі тангенціальних сил. Цікаво спостерігати, що якщо компонент сили F_A в напрямку x був розрахований, застосовуючи неповну форму принципу збереження кутового моменту (3.21), то точна відповідність з результатом, наданим Creo, була б досягнута.

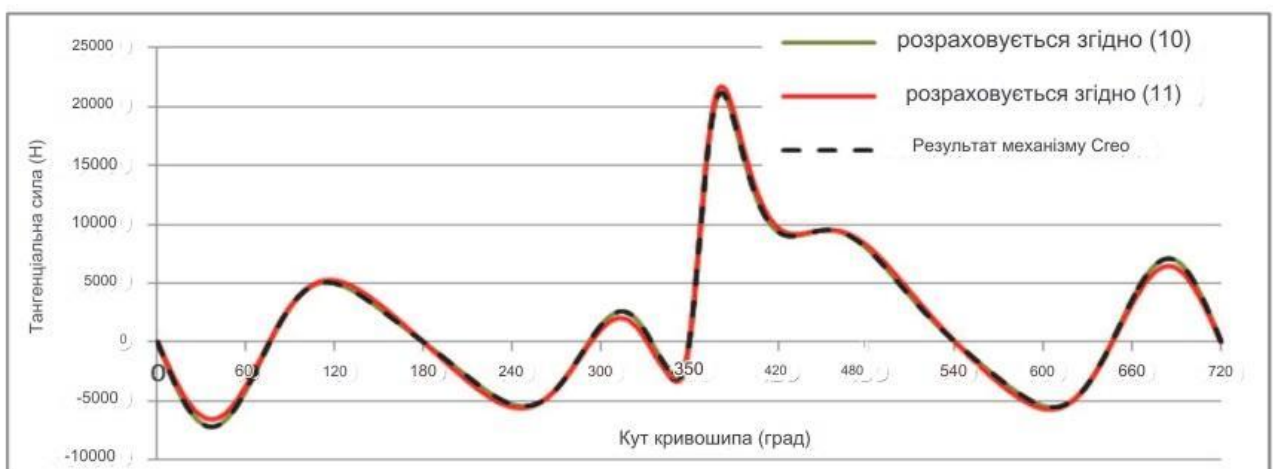


Рис. 3.19. Тангенціальна сила, що діє на шийку кривошипа у функції кута повороту кривошипа при швидкості колінчастого валу 8000 об/хв з різними методами розрахунку.

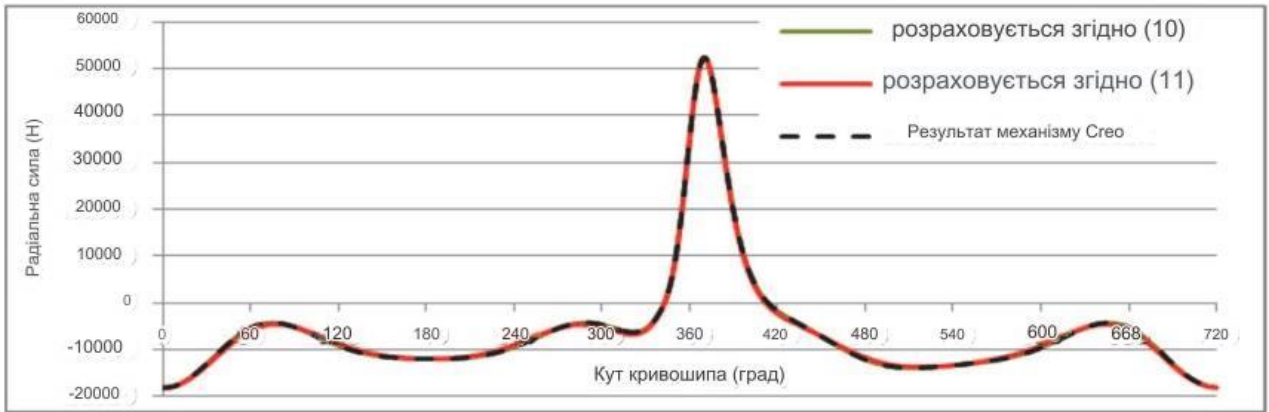


Рис. 3.20. Радіальна сила, що діє на шийку кривошипа у функції кута повороту кривошипа при швидкості колінчастого валу 8000 об/хв з різними методами розрахунку.

У реальності сила не діє на певну точку, а на циліндричну контактну поверхню.

Припускається, що шийка кривошипа має синусоїдальний розподіл тиску. Таким чином, сила, що діє на шийку кривошипа – яка була визначена вище – була перетворена у синусоїдальний розподіл тиску, що діє на кут $\gamma = 120^\circ$ (Рис. 3.21.).

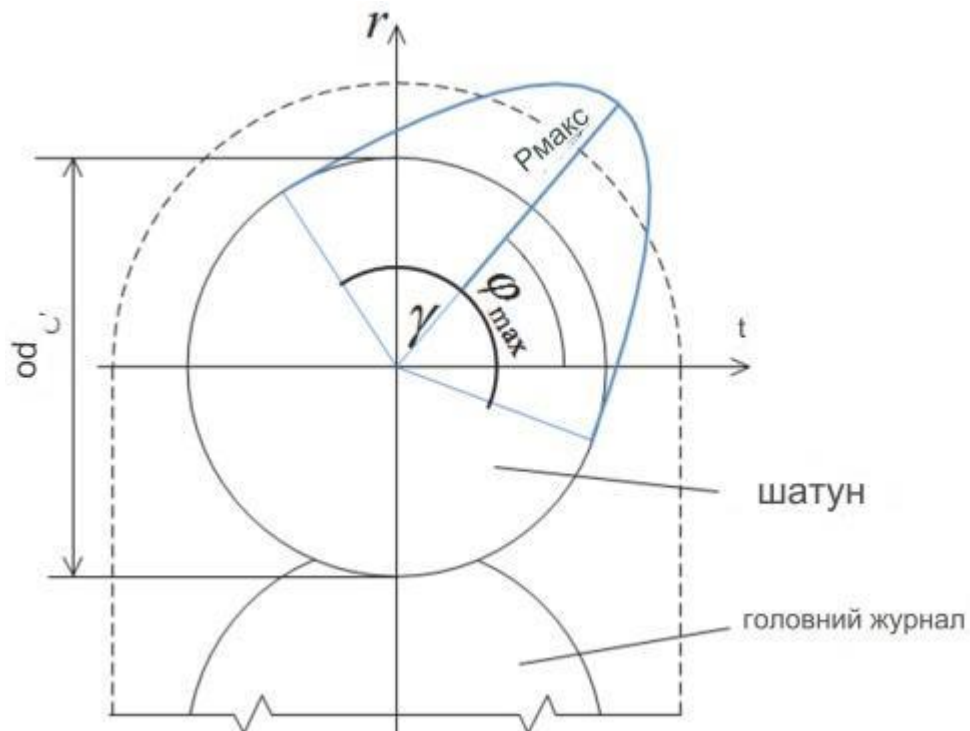


Рис. 3.21. Розподіл тиску на шийці кривошипа з синусоїдальною характеристикою.

Розподіл тиску вздовж периметра шийки кривошипа можна описати за допомогою наступного рівняння:

$$p(\varphi) = p_{\max} \sin \left[\frac{180}{\gamma} \varphi - \left(\frac{180}{\gamma} \varphi_{\max} - 90 \right) \right], \quad (3.25)$$

де величина $\varphi=0^\circ$ відноситься до осі t .

У виразі (3.25) максимальне значення тиску p_{\max} може бути визначене через інтеграцію площі тиску:

$$F_C = p_{\max} \int_0^{\frac{d_c \pi \gamma}{360}} \int_0^{w_c} \sin \left(\frac{360}{d_c \gamma} s \right) dz ds \Rightarrow p_{\max} = \frac{180 F_C}{w_c d_c \gamma}, \quad (3.26)$$

де w_c вказує на ширину, а d_c - на діаметр шийки кривошипа.

У зв'язку з тим, що величина навантаження на шийку кривошипа змінюється в залежності від обертів двигуна, використання раніше розрахованих рівнянь дозволяє аналізувати цю залежність у рамках робочого діапазону двигуна (4000 – 12000 об/хв). На низьких обертах двигуна переважаючою є сила тиску газів, тоді як на високих обертах переважають сили інерції, які зростають пропорційно до квадрата швидкості двигуна. Рисунок 3.22. демонструє зміни навантажень на шийку кривошипа на різних кінцях робочого діапазону.

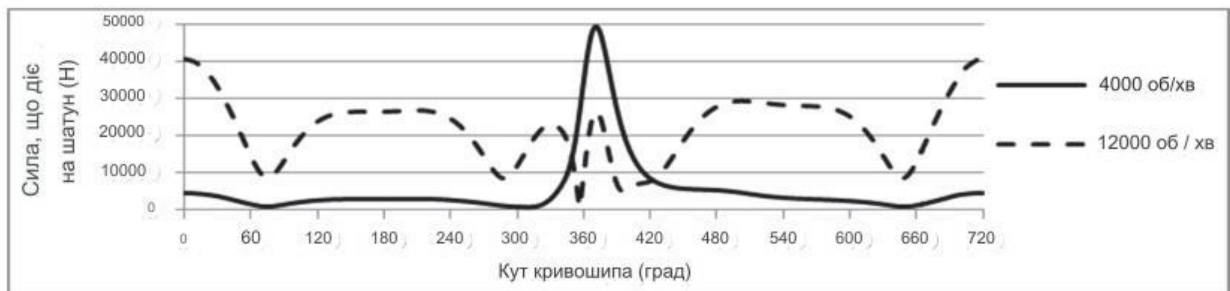


Рис. 3.22. Навантаження на шийку кривошипа в залежності від кута обертання кривошипа у різних точках робочого діапазону.

3.8 Розробка механічної моделі та моделі скінченних елементів

Модель скінченних елементів була розроблена за допомогою програми ANSYS Workbench. Для колінчастого валу використовувалися тетраедричні елементи з квадратичними вузлами. Стандартний розмір елементів був 3 мм, проте в критичних областях, таких як радіус головного журналу або області з'єднань з натягом, застосовувалися елементи розміром 1 та 2 мм. Всього в моделі було 188 152 елементів, що включали 306 788 вузлів. Як зазначалося у попередньому розділі, максимальне навантаження на колінчастий вал спостерігається при швидкості двигуна 6500 об/хв, тому аналіз методом скінченних елементів було виконано при цій швидкості.

Рисунок 3.23. демонструє сітчасту модель колінчастого валу, а рисунок 3.24 відображає зони прикладення граничних умов та навантажень.

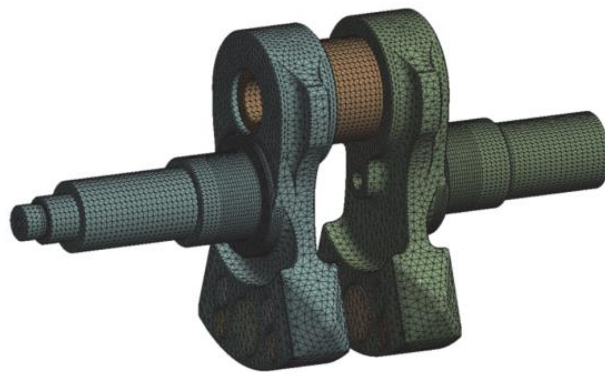


Рис. 3.23. Модель колінчастого валу у вигляді скінченних елементів.

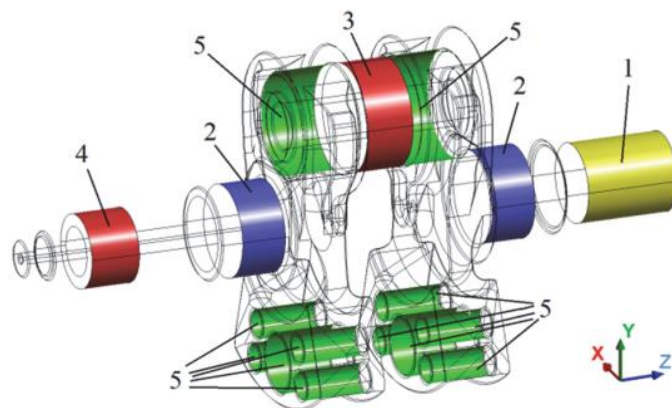


Рис. 3.24. Области граничних умов і зони застосування навантажень:

Процес аналізу скінченних елементів починався з окремого вивчення розподілу напружень для кожного виду навантаження, що уможливило точне визначення ваги кожного з них.

Далі було проведено аналіз загального розподілу напружень від сукупного навантаження, на підставі якого можна розглядати оптимізацію ваги.

На рисунку 3.25. представлено розподіл напружень за методом вон Мізеса та радіальний розподіл напружень (негативний контактний тиск), що виникають на поверхні втулки при інтерференції розмірами 0,1 та 0,08 мм, що відповідає обом крайнім точкам діапазону допусків. Цей рисунок демонструє, що в обох випадках спостерігаються високі напруження за вон Мізесом, а також великі максимальні значення контактного тиску для забезпечення з'єднання, що вказує на можливість використання меншої інтерференції. Внаслідок 0,01 мм інтерференції твёрдосплавної штанги, яка використовується як противага, в області противаги спостерігалось максимальне напруження за вон Мізесом близько 300 МПа.

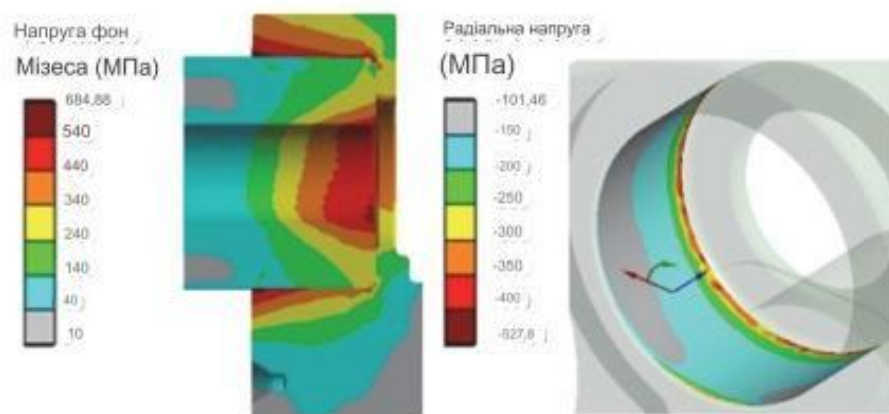
Під час аналізу теплового навантаження кінематичні граничні умови, зазначені вище, не були застосовані через те, що через теплові ефекти частини, які забезпечують ці умови, також розширювались, що не було враховано у моделі. У результаті теплового навантаження виникали не дуже великі напруження. Еквівалентні напруження близько 300 МПа від інтерференції противаг знижувалися наполовину через різницю коефіцієнтів теплового розширення вольфраму та сталі (рис. 3.26).

На рис. 3.27 представлено графічну інформацію щодо найвищих напружень за критерієм Вона-Мізеса, які виникають внаслідок змінних навантажень у залежності від кута обертання колінчастого вала.

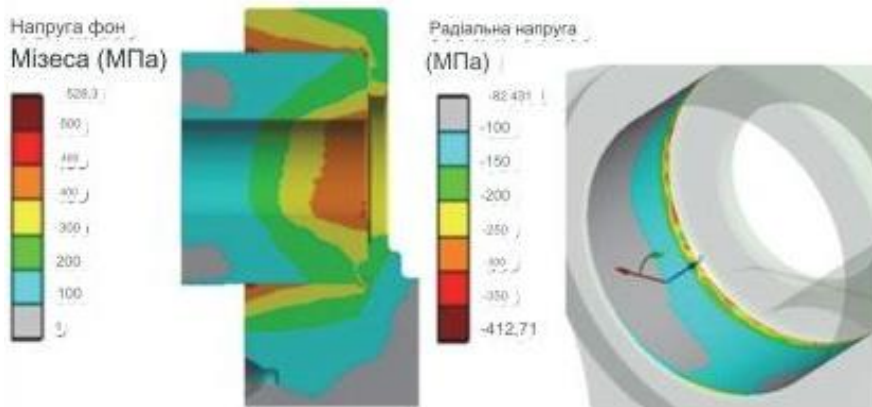
Рисунок 3.28. показує розподіл напруженості для кожного навантаження при різних кутах обертання колінчастого вала, де спостерігаються максимальні напруженості за критерієм фактору Вона-Мізеса. На основі отриманих результатів можна зробити такі висновки:

Максимальна еквівалентна напруженість за критерієм фактору Вона-Мізеса на шатунку колінчастого вала досягається під кутом 371 градус, що вказує на те, що приблизно при запуску це значення становить приблизно 300

МПа. Максимальні напруженості за критерієм фактору Вона-Мізеса спостерігаються між філетом веб-профілю та головними вальцями (рис. 3.28.а).



Втрочання 0,1 мм.



Втрочання 0,08 мм.

Рис. 3.25. Аналіз розподілу напруженості згідно з критерієм Вона-Мізеса та визначення радіального розподілу напруженості на зовнішній поверхні отвору кривошипа.

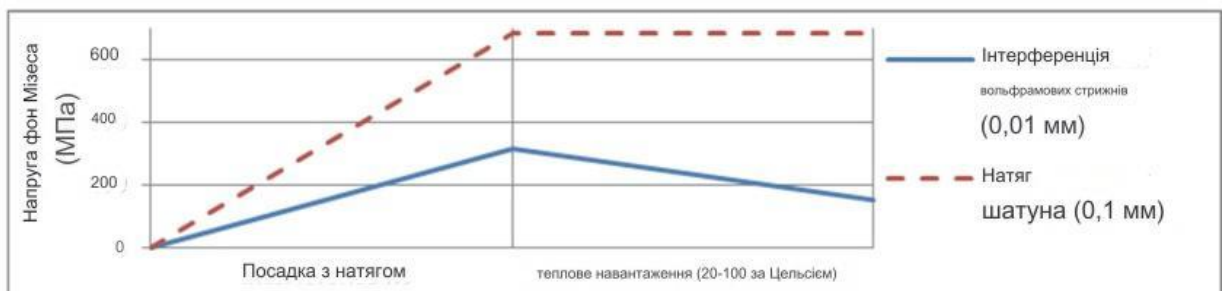


Рис. 3.26. Максимальні напруженості, обчислені на основі критерію, спричинені взаємодією при встановленні з вміщенням і тепловим навантаженням.

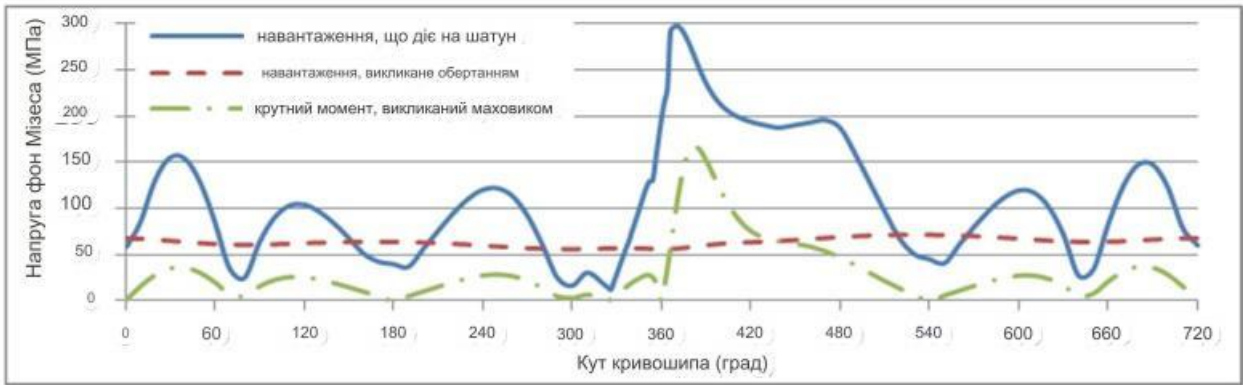


Рис. 3.27. Графічне зображення зміни максимальних напружень, що виникають внаслідок окремих навантажень, у залежності від кута обертання колінчастого вала.

Максимальні напруженості за критерієм фактору Вона-Мізеса, спричинені силами інерції, залежать від кутової швидкості. Напруженості, що виникають в цьому випадку, набагато менше порівняно з напруженостями, спричиненими двома попередніми навантаженнями (максимально 70 МПа). Найбільші напруженості відзначаються між головним валком та відбалансовуючим валком (рис. 3.28.b).

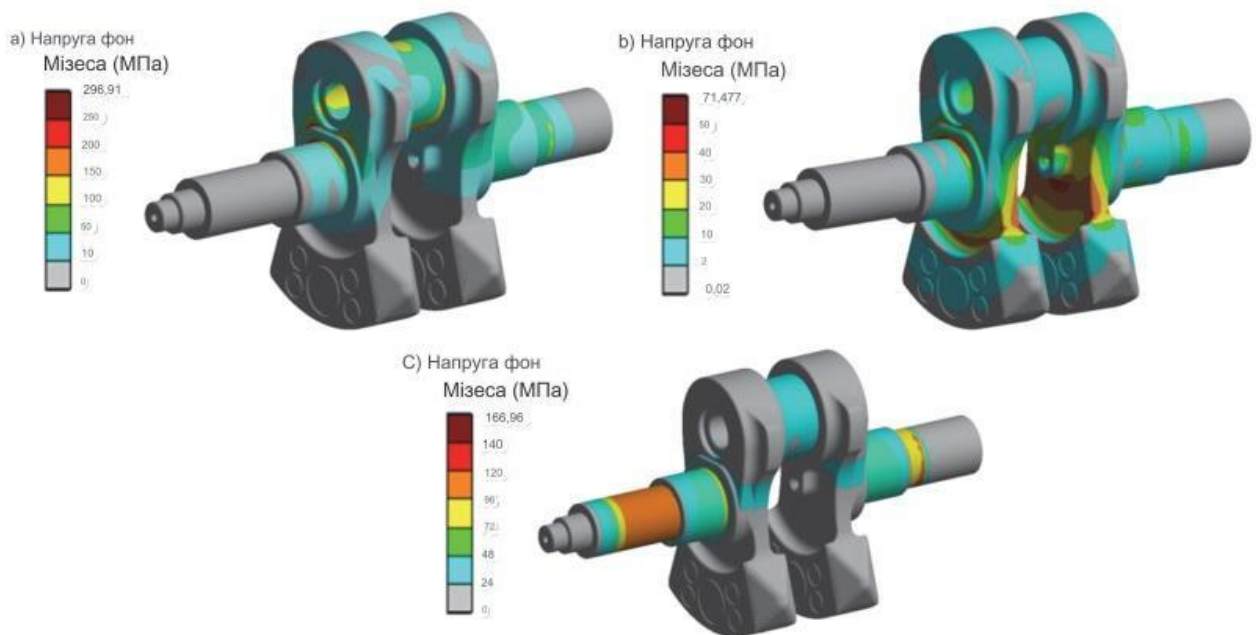
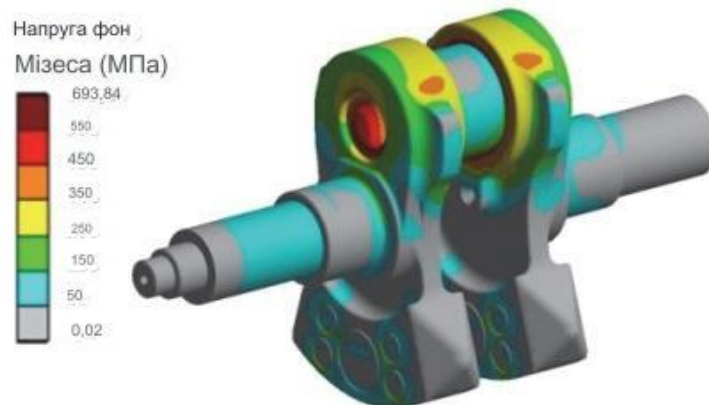


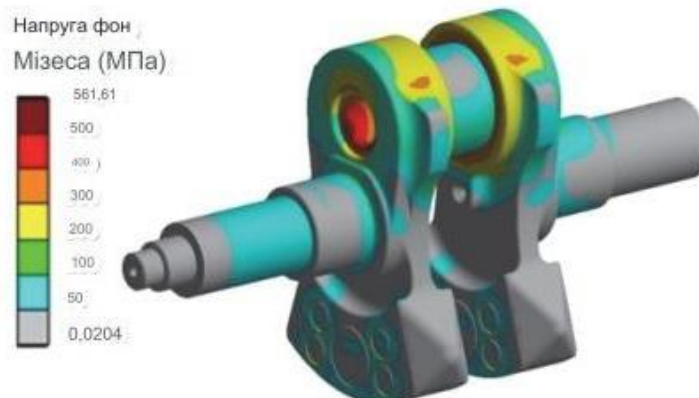
Рис. 3.28. Максимальні напруженості за критерієм фактору Вона-Мізеса, спричинені: а) навантаженням на шатунок. б) обертанням колінчастого вала. с) крутним моментом, створеним маховиком.

Максимальні напруженості за критерієм фактору Вона-Мізеса, обумовлені обертовим моментом, викликаним маховиком, змінюються відповідно до зміни обертового моменту. Найвищі напруженості спостерігаються на поверхні напіввалів (рис. 3.28.с).

На рис. 3.29. показано розподіл напруженості, який виник в результаті критичного загального навантаження.



(a) Зазор 0,1 мм.



(b) Зазор 0,08 мм.

Рис. 3.29. Розподіл еквівалентних напружень за критерієм Вона-Мізеса, викликаних критичним загальним навантаженням.

Під час критичного загального навантаження можна сформулювати наступні висновки:

Найвищі напруженості за критерієм фактору Вона-Мізеса виникли через втручання між вебом та шатунком. Ця форма втручаного навантаження суттєво вплинула на розподіл напруженості.

Максимальні значення напруженості не залежать від положення кута, тому зміна напруженості, спричинена загальним навантаженням, залишається приблизно постійною в залежності від кута обертання колінчастого вала.

Факт того, що напруженості, спричинені втручанням, переважають, можна розглядати як конструктивний дефект. Тому перед зменшенням ваги, цей конструктивний дефект слід виправити.

3.9 Результати аналізу методом скінченних елементів

За результатами аналізу методом скінченних елементів можна зазначити, що розподіл напруженості в колінчастому валу не є однорідним. Існують області з дуже низькими напруженнями, де розумно видалити матеріал, і області з надто великими напруженнями, які потребують зменшення шляхом відповідних конструктивних змін. Основні модифікації можна узагальнити так:

Збільшення діаметру внутрішніх отворів валиків і штифтів: Зазвичай найвищі напруження спостерігаються на зовнішній поверхні валиків і штифтів, тоді як всередині них напруження мінімальні. Тому цілком обґрунтовано видаляти матеріал із цих областей. У внутрішніх отворах були проведені наступні модифікації:

Діаметр масляного отвору збільшено з 3 мм до 10 мм.

Діаметр отвору з боку зчеплення збільшено з 8 мм до 16 мм, а глибина збільшена з 20 мм до 64,5 мм.

Внутрішній отвір шатунка збільшено з 15 мм до 20 мм.

Внесені зміни в геометрію веб-профілю:

Видалення вушок веб-профілю, оскільки тут найвищі напруження є дуже маленькими і видалення матеріалу сприяло зменшенню ваги.

Видалення плечової частини веб-профілю, що призвело до зменшення ваги та покращення розподілу напруженості внаслідок втручання між веб-профілем та шатунком.

Зменшення ширини та товщини веб-профілю для зменшення ваги.

Збільшення радіуса заокруглення/філету між головним валком та веб-профілем з 1,5 мм до 2 мм, що дозволило зменшити найвищі напруження в

області філету, що виникають під час навантаження шатунка, і зробити розподіл напруженості більш однорідним.

Модифікація частини відбалансовуючого валка: За результатами попередніх змін, центр ваги колінчастого вала змінився. Для відновлення балансу валка було зменшено масу відбалансовуючого валка двома способами:

Зменшено ширину та товщину частини відбалансовуючого валка.

Замість чотирьох малих і одного великого вулфрамівого стержня в якості відбалансовуючих встановлено п'ять малих вулфрамівих стержнів.

Порівняння оригінального та зміненого колінчастого вала можна побачити на рис. 3.30. Після проведених модифікацій встановлено, що для зміненої геометрії мінімальне необхідне втручання становить 0,04 мм. Рис. 3.31. показує розподіл напруженості за критерієм фактору Вона-Мізеса в зміненій конструкції під впливом критичного загального навантаження.



Рис. 3.30. Конструкція зміни колінчастого валу.

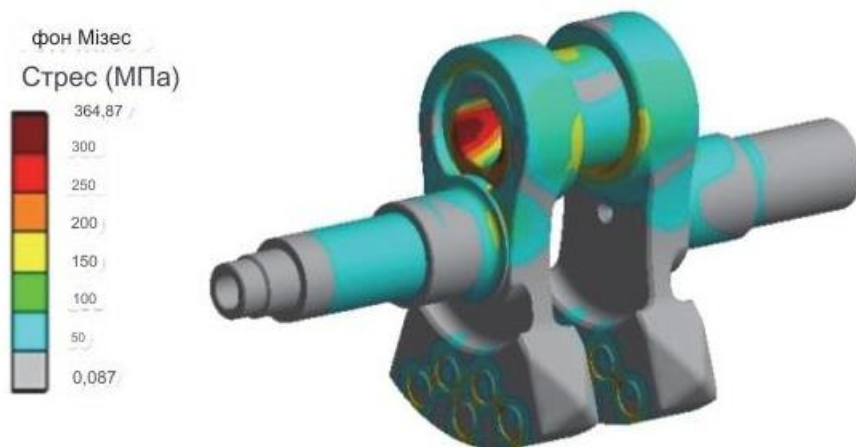


Рис. 3.31. Розподіл напруженості Вона-Мізеса зміненого колінчастого вала, спричинений критичним загальним навантаженням.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Підхід до виконання дослідницьких експериментів

Процедури, що застосовуються для термічного впливу на колінчаті вали, спрямовані на підвищення їх робочих якостей. Процес зміцнення підшипників проводиться шляхом індукційного нагріву за допомогою струмів стандартної або високої частоти. Вибір методу охолодження та рідини для охолодження залежить від можливостей виробництва і включає варіанти, такі як повітря під тиском, водяні стрімені, суміш води та повітря, або масляний спрей. Цей процес вимагає значної кількості робочого часу та ресурсів.

Протягом останніх чотирьох десятиліть у світі було розроблено численні методи поверхневого індукційного зміцнення. Цей метод зменшує час, необхідний для термічної обробки, та дозволяє автоматизувати цей процес. Частотний діапазон струму для індукційного зміцнення варіюється від 500 до 10 000 Гц при використанні машинних генераторів, і доходить до 1 000 000 Гц при використанні лампових генераторів. Лампові генератори переважно застосовуються, коли потрібно загартувати шар товщиною не більше 2 мм.

Цей метод є вельми продуктивним у масовому або серійному виробництві. Натомість, його застосування у сфері ремонтних робіт значно підвищує вартість ремонту, оскільки як джерела струму використовуються машинні чи лампові генератори, а в якості інструментів служать індуктори, які потребують індивідуального дизайну для кожної окремої деталі.

Лазерне зміцнення. Зміцнювання за допомогою лазерного випромінювання, що виробляється у лазерних генераторах світла, також є методом високої продуктивності. Лазерне зміцнення відбувається через екстремально швидке нагрівання поверхні компонента (тривалістю від 10^{-3} до 10^{-6} секунд) за допомогою концентрованого потоку енергії з лазерного променя до високих температур, за яким слідує швидке остигання через ефективний відвід тепла в глибину металу. Темп охолодження може досягати $10^3 - 10^5$ °C/сек. Важливою перевагою цього методу є здатність зміцнювати окремі частини поверхні виробу, у тому числі внутрішні поверхні різних форм,

оскільки лазерний промінь можна направити на потрібну ділянку через систему дзеркал

4.2 Техніки поверхневої обробки лазером

Застосування лазерного випромінювання варіюється в залежності від співвідношення інтенсивності енергетичного потоку та тривалості його впливу. За невисокої інтенсивності енергії до $103...104 \text{ Вт/см}^2$ матеріал лише нагрівається до температур нижчих за температуру плавлення. При значеннях $106...107 \text{ Вт/см}^2$ матеріал досягає точки плавлення, а при інтенсивності понад 107 Вт/см^2 відбувається руйнування матеріалу через випаровування.

Шляхом регулювання інтенсивності та часу впливу променів на речовину можливо виробляти проколи, спаювання та зміцнення за допомогою теплової обробки.

Теплова обробка із зміною фаз вимагає відносно низької енергії від 103 до 104 Ватт на квадратний сантиметр та тривалості від однієї до ста двох секунд.

Зі зростанням інтенсивності енергії до 106-107 Ватт на квадратний сантиметр і скороченням часу впливу до 0.001-0.1 секунди, виконуються процедури спаювання, розплавлення та лазерного доопрацювання, а також відбувається рідина матеріалу у тонких зовнішніх шарах (кілька до десятків мікрон). Під час швидкого охолодження, що настає зі швидкістю 108 градусів за секунду, відбувається закалювання, що формує на поверхні майже аморфні структури. При найвищій інтенсивності до 108-1010 Ватт на квадратний сантиметр і найбільшій тривалості впливу 0.000001-0.0000001 секунди, відбувається процес, відомий як ударне чи шокове зміцнення.

Під час процесу ударного зміцнення відбувається наступне: протягом короткого періоду високої енергетичної активності (0.00000001 секунди) верхній шар речовини перетворюється на плазму, що, розширюючись, генерує ударну хвилю. Тиск у цій хвилі може досягти 100 кілобарів. Поширення цієї хвилі в глиб металу часто супроводжується пластичною деформацією, що призводить до зміцнення через наклеп.

Лазерна обробка застосовує техніки, що нагадують традиційні способи теплової обробки. Під час лазерного закалювання (термічного зміцнення) вони зосереджують лазер на окремій частині поверхні великої деталі, підігріваячи її до екстремально високих температур. Після зупинки лазерного випромінювання, ця область швидко охолоджується через передачу тепла в глибші шари металу. Швидке охолодження сприяє формуванню закалених структур (мартенситу, бейніту, троститу) і підвищенню твердості поверхні. Якщо товщина оброблюваної деталі близька до розмірів зони лазерного впливу і швидкий тепловідвід неможливий, використовують лазерний відпал. Цей метод застосовується в мікроелектроніці для відпалу напівпровідників. Лазерний відпуск, який полягає у підігріві лазером раніше закалених деталей до температур нижчих за критичні, застосовується для обробки дрібних деталей у виробництві приладів.

Техніка розплавлення поверхні з'явилася з розвитком лазерного проміння. У процесі розплавлення, для поліпшення характеристик поверхні (зменшення пористості або нерівностей) вибирають параметри обробки, зосереджуючись на досягненні оптимальної поверхневої мікрогеометрії, при цьому швидкість охолодження не є визначальною. Для процесу аморфізації необхідно використовувати максимально швидке охолодження, внаслідок чого глибина розплавлення зазвичай не перевищує 50 мікрометрів.

Техніки створення поверхневих покриттів – додавання легуючих елементів та напилювання – базуються на принципі, де область поверхні підігривається до температур вищих за точку плавлення, і в розплавленій регіон вносяться легуючі добавки. Це призводить до формування шару з хімічними властивостями, що відрізняються від властивостей основного металу. Процедура вакуумного лазерного напилення включає випаровування матеріалу з області поверхні під впливом лазера у вакуумних умовах та наступну конденсацію випарених речовин на поверхні підкладки.

Використання інтенсивного впливу лазера може служити для підвищення міцності та запуску фізико-хімічних змін, наприклад, створення р-п переходів у напівпровідникових елементах. Започатковування хімічних реакцій на поверхні сплавів за допомогою тепла від лазера або застосування плазмового шару біля

поверхні може бути направлено на окислювальні або відновні процеси окремих елементів сплаву або створення особливих хімічних з'єднань.

4.3 Характеристики фазових та структурних змін в вуглецевих сталях під час лазерного зміцнення тепловою обробкою

Принцип лазерної термічної обробки (ЛТО) базується на фазовій трансформації матеріалу після його швидкого підігріву до температур, що перевищують фазову перекристалізацію та точку плавлення, за умови швидкого охолодження області обробки шляхом видалення тепла через теплопровідність речовини деталі.

Охолодження при температурі підігріву, яка є нижчою за точку плавлення, досягає $(5...10) \times 10^3$ градусів за секунду, а під час переходу з рідкого стану в твердий – до 10^6 градусів за секунду, що в тисячі разів перевищує швидкість охолодження у традиційному процесі закалювання.

Регіони, на які впливає лазер (ЗЛВ), мають шарувату структуру. Це обумовлено різним рівнем нагрівання різних шарів. У рамках ЗЛВ можна розрізнити три різні шари: (див. рис. 4.1)

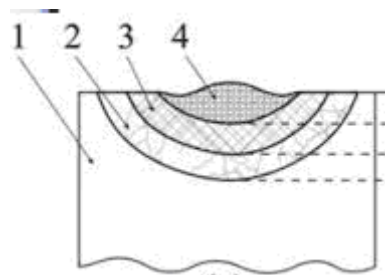


Рис. 4.1. Представлення створення шарів у регіоні дії лазера під час процедури з розплавленням поверхні:

- 1 - область розплавлення; 2 – область закалювання із твердого стану; 3 – проміжний шар; 4 – первинна структура.

Перший шар – область розплавлення – утворюється в процесі закалювання з розплавленого стану і характеризується стовпчасто-дендритною структурою. Основні осі кристалів розташовані вертикально відносно нижньої

межі області розплавлення. Переважною структурою є мартенсит. Карбіди, як правило, у цій області розчинені в твердому стані. У випадку лазерного закалювання без розплавлення цей шар не утворюється.

Другий шар – область закалювання з твердого стану – створюється під час процесу закалювання без розплавлення. Його нижню межу встановлює нагрівання до критичної точки A_{c3} , що означає проведення як повного, так і часткового гартування.

Третій шар – проміжний регіон – утворюється, коли метал підігрівається до температур нижчих за точку A_{c1} .

У цьому шарі мікроструктура та твердість можуть варіюватися, залежно від первісного стану сталі. Під час лазерної обробки уже закаленої або відпущеної сталі в цій зоні спостерігається зменшення мікротвердості.

4.4 Особливості кристалізації сталі при лазерній обробці з розплавленням

У процесі лазерної обробки з розплавленням, через великі темпи охолодження розплавленого металу, застосовують методику закалювання з рідкого стану. Як наслідок, утворена структура володіє низкою унікальних характеристик.

Кристали, які формуються під час початкової кристалізації, відрізняються невеликими розмірами через велику кількість точок кристалізації. Проміжки між вторинними осями в дендритах значно звужуються, а за умови охолодження зі швидкістю 106 градусів за секунду і вище може спостерігатися відсутність вторинних осей. Зменшення дендритної ліквідації відбувається через пригнічення граничної дифузії у зоні кристалізації.

Може відбуватися створення метастабільних утворень – перенасичених твердих розчинів та метастабільних перехідних фаз.

Через зміни в процесі кристалізації можливе утворення нетипових структур: шарування евтектик і квазіевтектик, аморфних та металокристалічних структур.

4.5 Фазові та структурні зміни у твердому стані

У процесі лазерного закалювання без розплавлення, етап підігріву є критичним, оскільки під час наступного прискореного охолодження зберігаються стадії трансформації, які відбувалися під час підігріву.

Під час підігріву залізвмісних сплавів і перетинання критичної точки A_{c1} розпочинається, а з перетинанням точки A_{c3} закінчується процес трансформації. Зазвичай цей процес відбувається швидко, оскільки при високій температурі дифузійна активність атомів є значною. Тривалість впливу лазера перевищує час, необхідний для структурних змін перліту, і може призвести до зміщення критичних точок A_{c1} і A_{c3} до вищих температурних діапазонів.

Додатково, механізм формування та розвитку аустеніту може зазнати змін. При високих темпах підігріву, ядра аустеніту мають потенціал утворюватися не лише на межах зерен фериту та цементиту, а й усередині феритних зерен на межах блоків, оскільки зростання темпу підігріву зменшує критичний розмір для кристалізаційного центру. Більше того, при значному перегріві вище точки A_{c3} , ферит може перетворитися на аустеніт через поліморфний механізм без перерозподілу вуглецю, а при подальшому збільшенні швидкості підігріву – переходити в аустеніт за мартенситним механізмом дуже швидко.

Після трансформації сталі виникає необхідність у часі для дифузійного балансування, яке полягає в переміщенні вуглецю з колишніх зон цементиту до ареалів колишнього фериту. Проте, при високих темпах підігріву та короткій тривалості впливу, дифузія вуглецю не встигає здійснитися повністю, в результаті чого аустеніт в районах колишнього фериту має низький вміст вуглецю.

У процесі наступного стрімкого охолодження в сталі, що не досягає евтектоїдного складу, на місцях колишніх зерен фериту через низький рівень вуглецю замість мартенситу знову формується ферит, подібно до ситуації часткового закалювання, незважаючи на те, що температура підігріву була вищою за точку A_{c3} .

Затримку в урівноваженні структури, крім швидкості обробки, також впливає дрібнозернистість первинної структури та склад легованих елементів у сталі.

У сталі з вмістом елементів вище евтектоїдного складу, надлишкові карбіди часто не встигають розчинитися під час підігріву до високих температур. На кордонах між карбідами та аустенітом у мікроскопічних зонах може відбутися евтектична реакція, що призводить до утворення рідкої фази, це може збільшити схильність таких сталей до розплавлення під час лазерної обробки.

Внаслідок зростання критичних температур і замедлення процесу рівномірного розподілу, аустеніт у сталі має значну мікро- та субмікронну нерівномірність, особливо за вмістом вуглецю.

Цю нерівномірність структури ще більше підсилює присутність у сталі не розчинених карбідів при високих температурах. Аустеніт, який формується з α -фази, також сприяє формуванню нерівномірності через фазовий наклеп під час перетворення.

Зерна аустеніту характеризуються дуже дрібними розмірами. Наступні фактори сприяють подрібненню зерна аустеніту під час лазерного підігріву:

Підвищення рівня перегріву, що веде до зменшення критичних розмірів кристалізаційних центрів аустеніту, в результаті чого зерна аустеніту формуються не лише на межах зерен фериту, але й на межах блоків.

Залишення частинок карбідів до досягнення високих температур.

Короткий час дії лазера, через що не встигає відбутися переміщення меж та збільшення розміру зерен, як це буває при звичайному підігріві.

Ключовий елемент, що впливає на остаточний розмір зерен аустеніту, є температура. Для досягнення достатньої глибини зміцненого шару, процес лазерного закалювання здійснюється з підігріванням до найвищої можливої температури, через що вкрай дрібне зерно аустеніту зазвичай не формується. Вплив чинників, які сприяють або перешкоджають збільшенню розміру зерна, призводить до того, що зерно при лазерному закалюванні має розмір 7 – 10 балів, аналогічно до зерна при звичайному закалюванні.

Під час лазерного зміцнення в сталях утворюються аналогічні структури, які зустрічаються у процесі звичайного закалювання: мартенсит, цементит (карбіди), та рештковий аустеніт. Проте, висока швидкість охолодження сприяє збільшенню дефектності структур через виникнення фазового наклепу, уповільнення процесів повороту і рекристалізації, а також більш глибокому збереженню первинних дефектів фаз. Це призводить до подрібнення блоків, зростання щільності дефектів та збільшення напружень у кристалічній ґратці.

Мартенсит, який формується при лазерному закалюванні, виявляється більш дрібнозернистим порівняно з тим, що утворюється при звичайному закалюванні. Наприклад, у сталі У8 після стандартного закалювання розмір мартенситних голок становить 7 - 10 мікрметрів, в той час як після лазерного закалювання вони мають довжину лише 2 - 3 мікрметри. Більше того, цей мартенсит характеризується високою концентраційною нерівномірністю та часто зберігає варіаційну перлітну структуру.

Ці характеристики призводять до збільшення мікротвердості сплавів після лазерного термозміцнення порівняно зі стандартними методами закалювання (для сталей це становить приблизно 1000 ... 2000 мегапаскалів).

4.6 Обладнання та технологічні нюанси лазерної теплової обробки імпульсними лазерами

Технічні підходи до імпульсної лазерної обробки. Під час обробки за допомогою одиночного імпульсу, область дії лазера на поверхні заготовки зазвичай утворює круглий слід із діаметром D . Головні геометричні параметри зони зміцнення включають: D – діаметр зони впливу лазера; S – відстань між точками обробки; h – глибина зміцненого шару (див. рис. 4.2).

Характеристики зони теплового впливу визначаються енергетичними характеристиками лазерного випромінювання. Зі зростанням інтенсивності енергії збільшуються як діаметр, так і глибина зони зміцнення. Для обробки великих поверхонь використовують методіку послідовного пересування за контуром з окремими точками кроком S і коефіцієнтом перекриття $K_n = S / D$.

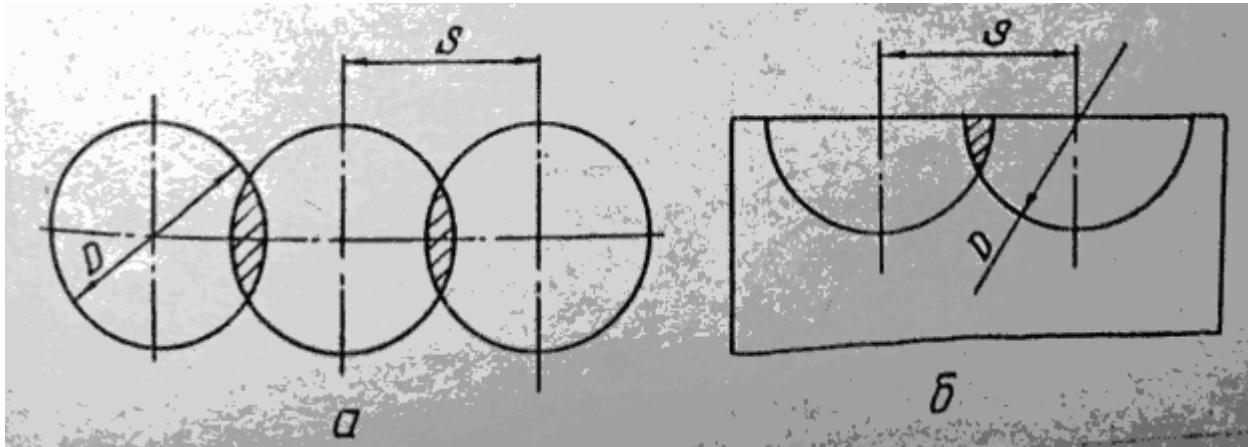


Рис. 4.2. Візуалізація розташування зон дії: а) погляд згори; б) у поперечному напрямку.

Коли обробка вздовж контуру відбувається у двох напрямках – вздовж осі X з інтервалом S_x і вздовж осі Y з інтервалом S_y , то цей процес описується коефіцієнтом заповнення:

$$K_z = F_{зм.} / F_{кнт.},$$

Існують різноманітні методи обходу контуру з декількома варіантами K_p , K_z , $K_{вик.}$. Найбільш розповсюдженою є методика обробки, коли $S_x = S_y$; $K_z = 0,94$; $K_{вик.} = 0,72$, що вважається ефективною та технологічно нескладною.

Продуктивність процесу зміцнення під час імпульсної обробки з певною частотою імпульсів визначається за формулою: $P = F_{зм.} / t$.

Також можливе створення лазерного сліду не лише у формі кола, а й у вигляді еліпса, квадрата та інших форм.

У випадку, коли зміцнення проводиться з переміщенням вздовж контуру, деталь переміщують під час перерви між імпульсами, в той час як під час самого опромінювання деталь залишається стаціонарною.

Під час обробки з накладенням лазерних слідів у зміцненому металі утворюються області, які піддаються дво-, трьох- або чотириразовому підігріву.

Це призводить до формування відпускної зони на віддалених ділянках, де метал підігрівається до температури нижчої за критичну точку A_{c1} .

У пристроях імпульсної обробки параметри обробки керуються шляхом зміни енергії імпульсу E та діаметра сліду D . Ці показники можуть бути інтегровані з щільністю потужності випромінювання q , виходячи з припущення, що розподіл енергії у межах сліду є приблизно однорідним.

Процедури лазерної термічної обробки (ЛТО) залежать від коефіцієнта відбиття поверхні. Підвищити ефективність ЛТО можна шляхом збільшення шорсткості поверхні та нанесенням спеціальних покриттів, що поглинають світло. Перед процесом лазерного закалювання шийки колінчастого валу зазвичай піддають фінішному шліфуванню.

Застосування покриття, що поглинає світло, призначеного для збільшення оптичної поглинальної спроможності сталевих поверхонь. Такі покриття є простими за складом і виробництвом, мають хорошу прилипання до металу, екологічно безпечні, стабільні при довготривалому зберіганні, володіють високою точкою плавлення та випаровування, а також високою теплопровідністю. Використовуються наступні типи покриттів: хімічні – фосфатування за допомогою марганцю або цинку, сульфідкування, оксидування.

Композиції для фарбування, металеві оксиди (Al, Zn та інші); колоїдні розчини вуглецю в ацетоні чи спиртах; напилені оксиди різноманітних металів; сажа.

Лазерне зміцнення на робочу поверхню вала наноситься у вигляді спіральної лінії з коефіцієнтом заповнення зони зміцнення між 70 та 90 відсотками.

4.7 Методологія реалізації експериментальних дослідів

Процес підігріву колінчастого валу для зміцнення проводять у електropечах типу камери (див. рис. 4.3). Ці печі розраховані на нагрів до 1000°C , що робить їх придатними для застосування у процедурах зміцнення та відпускання.



Рис. 4.3. Камерна піч для нагрівання.

Укріплення за допомогою лазерного випромінювання, створюваного у лазерних джерелах світла, є високоефективним підходом. Лазерне зміцнення проводиться шляхом надзвичайно швидкого короткотривалого (10^{-3} - 10^{-6} с) підігріву поверхні елемента концентрованим потоком енергії лазерного променя до високої температури та швидкого охолодження завдяки ефективному відведенню тепла вглиб металу. Швидкість охолодження може досягати 10^3 – 10^5 °C/с. Основною перевагою цього методу є здатність зміцнювати окремі зони поверхні предметів, внутрішні поверхні будь-якої форми, оскільки лазерне випромінювання можна направити у вказане місце за допомогою системи дзеркал (див. рис. 4.4.).



Рис. 4.4. Схема лазера.

Мікротвердість вимірювалася за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3. Процедура вимірювань була здійснена відповідно до стандарту. Застосоване навантаження становило 100 грамів (див. рис. 4.5).

Мікроструктура зразків була проаналізована за допомогою техніки оптичної мікроскопії, використовуючи мікроскоп (див. рис. 4.6), розроблений для створення зображень із відбитого світла. Максимальне збільшення

мікроскопа - 1500 разів. Мікроскоп додатково укомплектований цифровою мікроскопічною відеокамерою SIMAGIS 2P-2C та системою автоматизованого аналізу зображень.

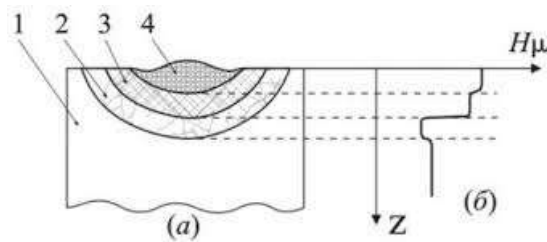


Рис. 4.5. Мікротвердість уздовж глибини області зміцнення:

- а) Стратифікована область зміцнення: 1 – первісна структура; 2 – перехідна зона; 3 – зміцнена область з твердої фази; 4 – розплавлена зона; б) Варіація твердості вздовж глибини зміцненої області.



Рис. 4.6. Цифровий мікроскоп XS - 3330 LED від MICROmed.

Для металографічного дослідження структури сталі після термообробки зразки проходили через процеси шліфування та поліровки. Для шліфування застосовували металографічний папір з великими (№ 6 -120) та малими (№ 420 -600) зернами. При шліфуванні, змінюючи папір з одного номера на інший (більш дрібний), зразок поворачивали на 90 градусів. За допомогою води змивали абразивні частинки, а потім зразки полірували, використовуючи суспензії на основі оксидів металів (Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , Al_2O_3). Досягнувши потрібного рівня чистоти, поверхню зразка очищали водою, спиртом та сушили фільтрувальним папером. Для розкриття мікроструктури сталі використовували 4% розчин азотної кислоти в спирті.

Тестування жорсткості колінчастого валу та проб за методикою Роквелла проводилися за допомогою твердоміра моделі (див. рис. 4.7).



Рис. 4.7. Зовнішній вигляд обладнання для визначення твердості методом Роквелла (ТР 5006).

Мікротвердість визначалася відповідно до ДСТУ Оцінювання мікротвердості за допомогою вдавлювання алмазних вістря (див. рис. 4.8.)



Рис. 4.8. Зовнішній вигляд твердоміра типу ПМТ-3.

Коефіцієнт опору та швидкість зношування поверхонь проб і контрзразків визначалися за допомогою автоматизованого фрикційного аналізатора (Tribometer CSM Instruments), управління яким здійснювалося комп'ютером (див. рис. 4.9), за стандартною процедурою тестування «сфера-диск». Ці тести дозволяють застосовувати модель Герца, відповідають міжнародним стандартам ASTM G 99-959, DIN 50324 і можуть використовуватися для визначення зносостійкості проб і контрзразків.



Рис. 4.9. Конструкція автоматизованого фрикційного аналізатора (Tribometer, CSM Instruments).

Трибометр високих температур від CSM Instruments - це унікальний пристрій, що забезпечує екстремальну точність у вимірах сил, як у режимах лінійного та ротаційного рухів. Усі трибометри від CSM оснащені функцією автоматичного зупинення експерименту при досягненні попередньо встановленого максимуму коефіцієнту опору або заданої кількості циклів.

Трибометри від CSM обладнані спеціалізованими камерами, що дозволяють проводити наукові експерименти в умовах, де контролюється оточуюче середовище, зі змінною вологістю або складом мікроатмосфери. Ці пристрої також оснащені сенсорами для моніторингу глибини, надаючи інформацію про глибину в реальному часі, що є критичним для аналізу характеристик зношування матеріалів залежно від часу.

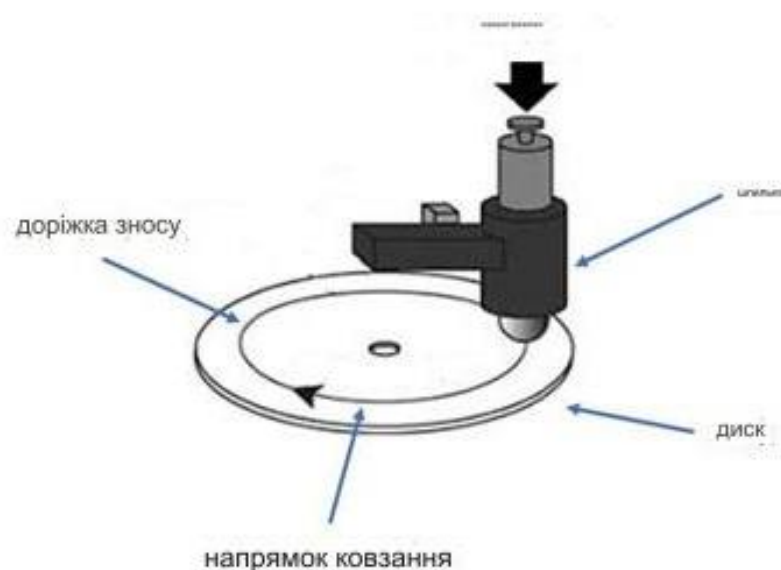


Рис. 4.10. Звичайна конфігурація тестування «сфера-диск»,

R - радіус кривизни зношеної ділянки; r - радіус зразка; F - застосована сила

Моніторинг глибини вдавнення штифта або сфери в пробу можливий в неперервному режимі за допомогою трибометра. Вертикальна траєкторія важеля приладу під час тестування корелює з глибиною зносу в контактній області. Трибометр відтворює ротаційно-поступальний рух, який типовий для багатьох механізмів, що використовуються в повсякденному житті. Прилад здійснює виміри коефіцієнта опору як під час руху вперед, так і під час руху назад в робочому циклі, а програмне забезпечення обробляє та узагальнює дані згідно з частотою Герца, статичними характеристиками та швидкістю зносу зразка. Метод ротаційно-поступального руху є ефективним для дослідження статичного коефіцієнта опору з часом, на відміну від динамічного коефіцієнта опору, вимірювання якого проводиться в конфігурації штифт-диск.

Проби фіксували в утримувачі, а перпендикулярно до площини проби кріпили стрижень, на кінці якого розташована сфера діаметром 6 мм з Al₂O₃ (алюмінієвого оксиду). Використовуючи регулятор переміщення, налаштовували радіус кривизни зносу. Інший датчик балансував опірну силу та дозволяв визначати величину коефіцієнту опору на певний момент часу.

Підготовчі дії до тестування включають: налаштування - регулювання швидкості та обертання двигуна; настроювання бокового зсуву датчика; налаштування радіуса.

Внесення даних для тестування за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (програма Instrum X для Tribometer).

Вводились такі необхідні дані для тестування: частота зчитування даних з датчика;

Індикатори стану навколишнього середовища: температура, рівень вологості. Розмір навантаження для проведення тестів; лінійна швидкість у см/с; протяжність шляху в метрах або кількість циклів; дані про підставу - тип покриття, матеріал основи; метод попередньої очистки зразка перед тестами. Інформація про контрелемент (сферу): тип покриття; матеріал контрелемента; метод попередньої очистки контрелемента перед тестами: розміри в мм, геометрія.

Дослідження було здійснене на відкритому повітрі з використанням навантаження у 3 Ньютонів та зі швидкістю руху 10 сантиметрів за секунду.

Кривизна зони зношування коливалася від 3 до 6 міліметрів, а загальна довжина шляху тертя становила 500 метрів. В результаті цих тестів була виміряна стійкість до зношування зразка та його статистичного еквівалента (кульки) відповідно до критерію зносу, заданого формулою 45.

$$W = V / (P \cdot L). \quad (4.1)$$

У випадку коли діаметр зношування кульки вимірювався за допомогою оптичного переверненого мікроскопа OLIMPUS GX51, обчислення об'єму матеріалу, що було втрачено з кульки, проводилося відповідно до наступної математичної формули.

$$V = \pi \cdot h^2 \cdot (r - (1/3)h). \quad (4.2)$$

$$h = r - \left(r^2 - [d / 2]^2 \right)^{1/2}.$$

Кількість матеріалу, який був знятий із зразка, встановлюється шляхом вимірювання перетину траси зносу на його поверхні. Це виконується з використанням контактного профілометра Surtronic 25, автоматизованого пристрою від компанії TaylorHobson.

Визначення об'єму матеріалу, що було втрачено зі зразка, здійснюється за допомогою специфічної математичної формули.

$$V = s \cdot l. \quad (4.3)$$

Використовуючи профілометр SURTRONIC 25, була здійснена оцінка нерівностей на поверхні зразків після численних проходжень контактної частини по досліджуваній поверхні. Цей інструмент застосовується для швидкого та точного вимірювання характеристик поверхневої нерівності виробів, перетин яких у площині вимірювань представляє собою пряму лінію.

Його використовують у виробничих цехах, точках контролю якості на промислових об'єктах, а також у науково-дослідних інституціях.

Визначення лінійного контуру поверхні здійснюється за допомогою фіксації вертикальних зміщень алмазного датчика, який рухається з низьким навантаженням із сталою швидкістю у стані механічного взаємодії з об'єктом вимірювання. SURTRONIC 25 може працювати як від інтегрованих акумуляторів, так і від зовнішнього джерела енергії. Цей прилад оснащений універсальним портом RS-232, який дозволяє передавати дані на принтер для виведення або на комп'ютер для подальшої обробки за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Talysurf.

Ця програма уможливорює виконання обчислень характеристик, налаштування обчислювальних режимів у відповідності з міжнародними нормативами. Її спеціальні можливості включають аналіз вертикальних /горизонтальних рефлексій профілю, умисне створення відрізків профілю для дослідження зношування поверхні, збільшення конкретних частин для детального аналізу, вилучення непотрібних сегментів профілю, окреме визначення хвилювості та нерівності. Використовуючи результати вимірювань, програма дозволяє оцінювати поверхневий профіль уздовж лінії та розраховувати нерівності поверхні. Пристрій може визначати 35 параметрів нерівності відповідно до стандартів ГОСТ, ДСТУ, ISO, ANSI, JIS, DIN.

Після термічної обробки виконується перевірка колінчатого валу на дотримання вимог до розмірів та текстури поверхні:

Оцінка на присутність тріщин за допомогою магнітного дефектоскопа (див. рис.4.10).

Огляд текстури поверхні шеек валу. Кінцева гладкість шеек повинна бути в межах $Ra = 0,63—0,32$ мкм.

Заміри твердості шеек колінчатого валу. Проведення замірів геометрії валу та розмірів шеек (допустиме відхилення не перевищує 0,016-0,022 мм та відхилення від циліндричної форми не більше 0,005 мм, коливання основних та допоміжних шеек має бути у межах 0,01-0,08 мм).

Перевірка рівності шатунних і основних шеек валу.

Щоб покращити якість поверхні та збільшити зносостійкість шеек колінчастих валів, рекомендується застосувати фінішну антифрикційну обробку без використання абразивів (ФАБО). Цей процес включає нанесення тонкого шару латуні, бронзи або міді на тертя зазнаючі поверхні шеек, використовуючи ефект перенесення металу під час тертя. Товщина нанесеного металевого шару складає 1-3 мікрметри.

4.8 Мікроструктурний аналіз

Спочатку сталь 40Х характеризується феритно-перлітною мікроструктурою: ферит знаходиться уздовж кордонів пластинчастого перліту (див. рис. 4.11).

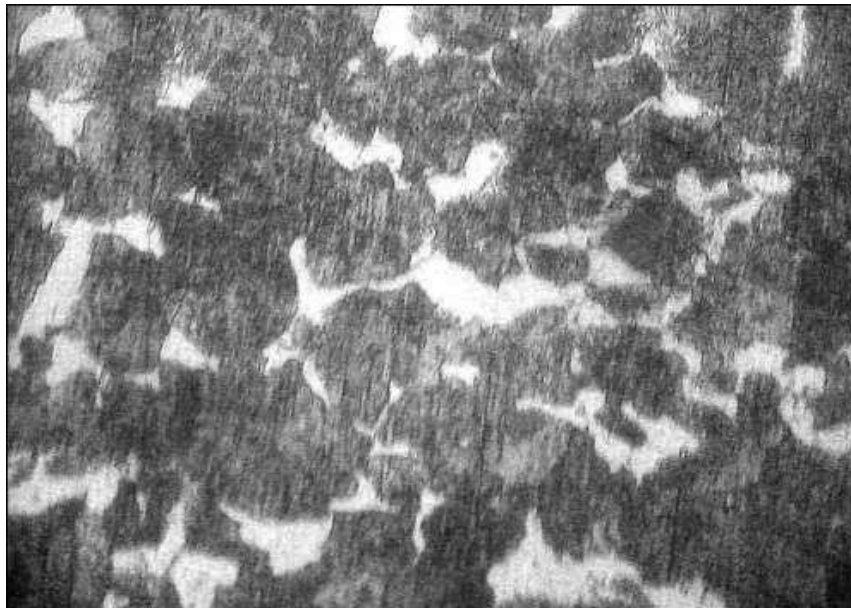


Рис. 4.11. Мікроструктура сталі 40Х у початковому стані.

Колінчатий вал після виробництва проходить через два етапи термічної обробки: попередню та фінальну.

Мета попередньої термообробки полягає у виправленні будь-яких мікроструктурних дефектів, що з'явилися під час виготовлення валу, а також у зниженні внутрішніх напружень.

Фінальна термообробка має на меті розвиток робочих характеристик у завершеному колінчатому валу. Цей процес включає в себе етапи загартовування та високотемпературного відпуску.

Загартовування здійснюється шляхом рівномірного нагрівання компонента у печі до 850 °С, де час нагріву визначається відповідно до рекомендацій як 1 хвилина на кожний міліметр перетину деталі. Після цього відбувається охолодження у маслі з температурою 65–70 °С.

В результаті процесу загартовування утворюється мартенситна структура, яка характеризується підвищеною твердістю та ламкістю (див. рис.4.2). Щоб забезпечити надійність у роботі колінчатого валу, важливо провести його відпуск після загартовування.



Рис. 4.12.

Мікроструктура сталі 40Х після процесу загартовування перетворюється на мартенсит.

Процес відпуску здійснюється при високій температурі 600°С, з часом утримання у печі 40 хвилин, за умовами повітряного охолодження (див. рис. 4.13).

Мікротвердість поверхні шеек (на глибині до 50 мікрометрів) після застосування лазерного загартовування підвищилась до діапазону 7000 - 8000

МПа. До проведення лазерного загартовування, мікротвердість поверхні знаходилася в межах від 1500 до 2000 МПа.

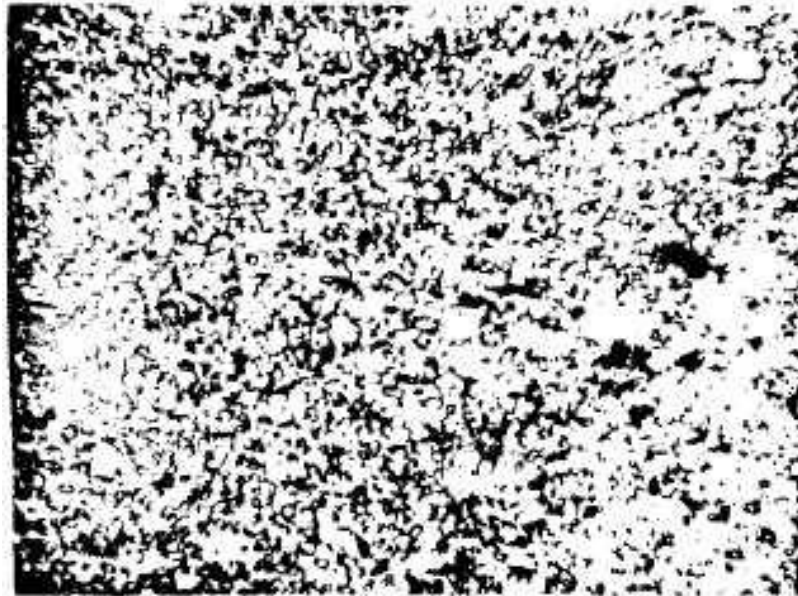


Рис. 4.13. Мікроструктура сталі 40X після процедури високотемпературного відпуску перетворюється у сорбіт.

Мікроструктура на поверхні складається з дрібнозернистого мартенситу типу рейки. Розміри мартенситних голок досягають 2-3 мікрометрів (в порівнянні з 6-7 мікрометрами при стандартному загартовуванні). У зоні теплового впливу формується мартенсит, який прилягає до мартенситно-троситної мережі біля областей мартенситу. Ця зона поступово переходить у троситно-феритну структуру, злиття з якою відбувається на межі з первинною структурою (див. рис.4.14).



Рис. 4.14. Мікроструктура сталі після застосування лазерної термічної обробки

4.9 Характеристики сталі після застосування лазерного загартовування

Головна ціль лазерного загартовування полягає у збільшенні стійкості до зношування для компонентів, що функціонують у умовах трибологічних навантажень. Завдяки лазерному загартовуванню відзначається зниження зносу компонентів через підвищену твердість, високу дисперсність структури, підвищення значень специфічних навантажень та зниження коефіцієнту трибологічного впливу. Коефіцієнт трибологічного впливу знижується на 10-12%, а також скорочується час налаштування. Вигин валу після лазерної обробки є меншим, ніж після зміцнення за допомогою високочастотного струму. Вироби, зміцнені лазерним загартовуванням, демонструють підвищену стійкість до втоми через особливості структури, такі як виражене дрібнозернисте будову та голчасту конструкцію компонентів. Межа міцності після лазерного загартовування зростає з 200...300МПа до 280...520МПа. Досягнення оптимальних структур можливе за дотримання умов лазерної обробки, включаючи сканування лазерного променя зі швидкістю 15 мм/с.

Аналіз показників стійкості до зносу в компонентах із сталі 45, підданих цілісному та лазерному загартовуванню (Потужність=1кВт, Швидкість=25 мм/с), виявив:

Рівень зношуваності – Q: при стандартному загартовуванні – $8,2 \times 10^{-7}$,
у випадку лазерного загартовування – 1,1.

Показник коефіцієнта
трибологічного впливу – f: при традиційному загартовуванні – 6,7,
для лазерного загартовування – 3,9.

Кількість циклів до досяг-
нення оптимального стану: у випадку звичайного загартовування – 20,
при лазерному загартовуванні – 4.

Під час трибологічних випробувань на сталі ШХ15, яка була загартована як традиційним, так і лазерним методом, було виявлено, що інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя значно нижчі у зразків, оброблених лазером.

Лазерне загартовування ефективно скорочує час досягнення оптимальної робочої кондиції тертьових пар. Поліпшення стійкості до зносу після лазерної обробки пояснюється підвищеною твердістю поверхні, високою дисперсією структури, покращенням несучої спроможності поверхні, нижчим коефіцієнтом трибологічного впливу та іншими факторами. Істотно впливає на зростання зносостійкості варіативність характеристик місцевих сегментів поверхні, оброблених лазером.

Посилення за допомогою перекриття, а також створення ізольованих плям або шляхів лазерної обробки веде до формування слабших та невідсиленних зон у місцях, де метал піддавався впливу лазера кілька разів або взагалі не піддавався. Ці області можуть стати зонами розслаблення решти структурних та теплових напружень. Окрім того, часткове випаровування матеріалу в районах лазерної обробки призводить до утворення мікроуглиблень, які служать утримувачами мастила, сприяючи таким чином збільшенню зносостійкості в тертьових парах. Залишкові напруження після лазерного посилення є значно нижчими.

Аналіз впливу швидкості лазерного оброблення на товщину загартованої області виявив, що зростання швидкості обробки з 5 до 11 мм/с зменшує товщину загартованого шару з 1.2 мм до 0,45 мм. Поглиблення області лазерного впливу можна досягти за допомогою нанесення покриття, що містить оксиди алюмінію, цинку та вуглецю у формі аерозолію.

Лазерна обробка тих частин деталей, які схильні до інтенсивного зношування, сприяє збільшенню твердості та стійкості до зносу через створення унікальної дрібногочастотної структури та особливого розподілу залишкових напружень.

Різні методи термообробки колінчастих валів використовуються для забезпечення цих компонентів підвищеними експлуатаційними характеристиками. Підсилення шеек забезпечується шляхом індукційного загартовування за допомогою струмів промислової або високої частоти. Тип охолодження та вибір охолоджувального агента визначаються на основі можливостей виробничих умов. Це може бути сжатє повітря, водяна

зрошування, водно-повітряна суміш, масляна зрошування тощо. Ці процедури вимагають значних зусиль, енергетичних та трудових ресурсів.

Цей метод загартовування зменшує часові витрати на термічну обробку та дозволяє автоматизувати процес. Діапазон частоти струму для індукційного загартовування з генератора машинного типу становить від 500 до 10 000 Гц, тоді як для лампового – до 1 000 000 Гц. Для загартовування шарів з глибиною до 2 мм зазвичай використовуються лампові генератори.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Аналіз умов праці в моторному відділенні автотранспортного підприємства

На автотранспортних підприємствах технічне обслуговування і ремонт автомобілів виконується при різній температурі, вологості і швидкості руху повітря, а також за наявності теплових випромінювань від поверхонь термічних печей, нагрітого устаткування, оброблюваного матеріалу виробів. При створенні безпечних і високопродуктивних умов праці має важливе значення так званий тепловий комфорт. Повний тепловий комфорт у виробничому приміщенні працівник відчуває, тільки коли в ньому створений сприятливий мікроклімат.

Температура, вологість, рух повітря і випромінювання від нагрітих тіл відносяться до метеорологічних умов, або так званого мікроклімату. Кожен з цих чинників, при недотриманні встановлених норм гігієни праці, може чинити шкідливий вплив на самопочуття і працездатність людини.

Температурний режим моторного відділення залежить від кількості тепловиділень від устаткування, виробів і поковок, а також від сонячної радіації, проникаючої всередину приміщення через заклені поверхні у вікнах і світлових ліхтарях будівлі. Кількість тепловиділень виражає у кілокалоріях (ккал) в годину на 1 м³ приміщення. Згідно з санітарними нормами (СН 245-63) цехи і відділення, де виділяється тепла менше 20 ккал/м³ в годину, відносять до холодних, а при більшій величині тепловиділень — до гарячих.

В моторному відділенні несприятливі температурні умови праці спостерігаються при виконанні зварювальних, ковальських, кузовних, малярних робіт в зимовий час у невиробничих приміщеннях.

Під вологістю повітря розуміють вміст в ньому водяної пари. У виробничих приміщеннях автотранспортних підприємств спостерігається різна вологість повітря: від 5 – 10% в сушарних камерах; 70 – 80% в розбирно-мийній і шиномонтажній дільницях; у гальванічному і мийному відділеннях вологість досягає до 90 – 95%, а в холодний період року в цих відділеннях відносна

вологість іноді досягає 100% (туманоутворення). Підвищена вологість повітря створює несприятливі метеорологічні умови, відбувається порушення терморегуляції і перегрівання організму, зменшується випар поту, а, отже, зменшується і віддача тепла організмом людини. Низька ж відносна вологість повітря сприяє випару поту, внаслідок чого відбувається швидка віддача тепла організмом.

На тепловіддачу людського організму істотний вплив чинить рух повітря. Чим більше швидкість руху повітря, тим більше тепловіддача людським організмом за рахунок конвекції та випару вологи з поверхні шкіри.

Сукупність параметрів повітря (температура, вологість, швидкість руху) визначають так звані комфортні умови.

Для людини, що знаходиться в стані спокою, комфортними умовами в залежності від швидкості руху повітря є наступні:

$v = 0$ м/с; $t = 18^{\circ}\text{C}$; відносна вологість $r = 50\%$;

$v = 1$ м/с; $t = 24^{\circ}\text{C}$; відносна вологість $r = 50\%$;

Для людини, що виконує важку фізичну роботу, теж саме:

$v = 0$ м/с; $t = 14^{\circ}\text{C}$; відносна вологість $r = 50\%$;

$v = 2$ м/с; $t = 26^{\circ}\text{C}$; відносна вологість $r = 40\%$.

Промениста тепла енергія утворюється нагрітими до високої температури виробами, поковками, печами та іншими установками. Залежно від температури нагрітих тіл промениста енергія ділиться на три категорії:

випромінювана нагрітими до температури 500°C тілами (невидимі інфрачервоні промені);

випромінювана нагрітими до температури 3000°C тілами (видимі світлові промені);

випромінювана нагрітими вище температури 3000°C тілами (невидимі ультрафіолетові промені).

В моторному відділенні переважає промениста тепла енергія першої категорії, дуже рідко доводиться відчувати енергію другої категорії при роботі нагрівальних печей, термічних ванн і у момент плавки і заливки металу, у виняткових випадках можна зустрітися з енергією третьої категорії (при зварювальних роботах).

Інфрачервоне опромінення характеризується як місцевою, так і загальною дією на організм людини. Інфрачервоні промені мають здатність викликати хімічні зміни у білкових клітинах, а при дії на органи зору викликати помутніння кришталика ока (катаракта). Катаракта виникає при дії інфрачервоних променів з довжиною хвилі від 0,8 до 1,4 мкм.

Висока температура повітря чинить несприятливий вплив на життєво важливі органи і системи працівників: серцево-судинну, центрально-нервову, систему травлення та інші. Висока температура викликає порушення нормальної діяльності даних систем та органів, а за найбільш несприятливих умов вона може викликати перегрівання організму (тепловий удар). Низька температура повітря охолоджує організм, в результаті цього він стає сприйнятливішим до захворювань (грип, пневмонія, радикуліт).

На автотранспортних підприємствах виділення пилу пов'язане з щоденним обслуговуванням автомобілів (вантажних, легкових, автобусів), обробкою металу і деревини, приготуванням формувальних сумішей, розбиранням автомобілів і агрегатів, фарбуванням агрегатів і автомобілів, термічною і гальванічною обробкою та іншими технологічними процесами. Промисловий пил, що викидається системою вентиляції, забруднює повітряні басейни міст і населених пунктів, шкодить здоров'ю населення.

Пил шкідливо діє на дихальні шляхи, шкіряні покриви, органи зору і кишковий тракт. Враження пилом верхніх дихальних шляхів в початковій стадії супроводжується подразненням, при тривалій дії з'являється кашель, відкашлювання брудною мокротою. Пил, глибоко проникаючий в дихальні дороги, призводить до розвитку в них патологічного процесу, який дістав назву пнеумоконіозу.

Пнеумоконіози – пилові захворювання легенів від дії усіх видів пилу. Найбільшу агресивність має кварцовий пил, що викликає силікоз. Розвиток силікозу залежить від концентрації пилу. Силікоз має здатність до подальшого розвитку і після припинення роботи в заповнених виробничих приміщеннях. Найбільш часті захворювання силікозом зустрічаються у робочих ливарних цехів (стержневиків, формувальників, вибивальників литва) та у шахтарів.

При роботі в запилених виробничих приміщеннях іноді спостерігаються випадки ураження органів зору пилом, яке призводить до запального процесу слизових оболонок (кон'юнктивіту). Металевий пил при потраплянні в очі може викликати травму рогової оболонки, а абразивний пил призводить до помутніння рогівки.

Токсичний пил (хромовий, свинцевий, марганцевий) навіть у відносно невеликій кількості, потрапляючи в органи травлення, викликає інтоксикацію (отруєння). Нетоксичний пил не викликає якої-небудь несприятливої дії.

Одним з важливих заходів боротьби з пилом на виробництві є організація технологічного процесу, що усуває утворення пилу або ж що змінює його кількість і якість. Для цього при щоденному обслуговуванні автобусів і легкових автомобілів прибирання в кузовах слід виконувати за допомогою пилососа. У механічному відділенні заточні верстати мають бути обладнані місцевими відсмоктувачами, інструмент потрібно заточувати з використанням охолоджувальної рідини, а сухе шліфування замінити мокрим.

При виконанні робіт в умовах значної запиленої (ручне вантаження і вивантаження сипких матеріалів, ремонт автомобілів цементовозів) робітники мають бути забезпечені індивідуальними захисними засобами – протипиловим спецодягом, респіраторами і окулярами, а також душами і умивальниками.

До роботи у відділеннях ливарного цеху не допускаються працівники, що страждають захворюваннями легенів, а особи, що приймаються на такі роботи, повинні проходити попередній і періодичний медичний огляд.

Отрутами називаються токсичні речовини, які, проникаючи в невеликих дозах в організм людини, викликають в клітинах тканини хімічні зміни і хворобливі явища (отруєння).

Отрути по характеру своєї дії діляться на:

отрути місцевої дії – вражають тільки ті ділянки тіла, на які вони потрапили. Такими є кислоти, луги, хромові сполуки та деякі інші, що викликають подразнення слизових оболонок носа, гортані, бронхів і очей;

отрути загальної дії – отруєння починається після проникнення отрути в кров. Прикладом може служити окисел вуглецю, який витісняє кисень з оксигемоглобіну, утворюючи карбоксигемоглобін, тобто сполуку, яке не

дозволяє крові розносити кисень по організму людини, внаслідок чого настає кисневе голодування. На автотранспортних підприємствах нерідко зустрічаються речовини, які мають як місцеву, так і загальну дію на організм людини.

Найбільшу небезпеку з усіх промислових отрут представляють отрути, що мають канцерогенну дію, оскільки вони здатні викликати злоякісні пухлини.

Отруєння, викликані дією токсичних речовин, можуть бути гострі і хронічні. Гострі отруєння виникають при раптовому надходженні в організм великих доз токсичної речовини. Хронічні отруєння розвиваються поступово внаслідок тривалої дії токсичних речовин малих концентрацій. Усі токсичні речовини по біологічній дії їх на організм людини умовно ділять на п'ять груп:

- речовини, що викликають опіки;
- речовини, що вражають органи дихання;
- речовини, що діють на кров;
- речовини, що вражають нервову систему;
- ферментні і обмінні (протоплазматичні) отрути.

Виробничий шум різної інтенсивності і спектру (частоти), який протягом тривалого часу діє на працівників, може призвести до порушень артеріального тиску і ритму серцевої діяльності, притуплення чутливості слуху, а іноді і до розвитку професійної глухоти.

В результаті тривалої дії шуму слабшає увага і пам'ять працівників, знижується працездатність, зростає ймовірність виробничого травматизму. Шум негативно впливає на стан психічної рівноваги. Під дією шуму спостерігається виснаження клітин головного мозку, уповільнення психічних реакцій і функціональні порушення нервової системи, що проявляється у вчинках, не характерних нормальній діяльності людини.

Відомо, що чим вище частотний склад шумів, чим вони інтенсивніше і триваліше, тим швидше і сильніше вони виявляють несприятливу дію на орган слуху. У випробувачів двигунів і осіб, що працюють в умовах шуму, нерідко підвищується кров'яний тиск, з'являється аритмія, змінюється тонус коронарних судин, нерідкі гастрити, виникнення виразкової хвороби. Сон у них стає поверхневим, часто уривається, а іноді настає безсоння.

Вібрація також небезпечна для організму, оскільки супроводжується напруженням нервової і серцево-судинної системи. На транспорті джерелами вібрацій є передусім транспортні засоби. Розрізняють загальну і локальну вібрації. Загальна вібрація діє на увесь організм, місцева залучає до коливальних рухів окремі частини тіла. Загальна вібрація з частотою 0,7 Гц хоч і неприємна, але не призводить до вібраційної хвороби. Вібраційна безпека нормується ДСТУ "Система стандартів безпеки праці. Вібрація, загальні вимоги безпеки". Для боротьби з шумами і вібраціями використовують як загальні, так і індивідуальні засоби захисту.

Розробка інструкції з охорони праці і техніки безпеки.

Загальні вимоги безпеки в моторному відділенні.

До самостійної роботи з ремонту і технічного обслуговування автомобілів допускаються особи, що мають відповідну кваліфікацію, отримали вступний і первинний інструктажі на робочому місці з охорони праці, пройшли перевірку знань з управління підйомними механізмами.

Слюсареві забороняється користуватися інструментом, пристосуваннями, устаткуванням поводитися з якими він не навчений і не проінструктований. Слюсар повинен працювати в спеціальному одязі і у разі потреби використовувати інші засоби індивідуального захисту. Слюсар повинен дотримувати правила пожежної безпеки уміти користуватися первинними засобами пожежогасінні.

Про виявленні порушення вимог безпеки на своєму робочому місці, а також при несправності устаткування, пристосувань, інструменту і засобів індивідуального захисту слюсар повинен повідомити свого безпосереднього керівника і не приступати до роботи до усунення помічених порушень і несправностей.

За виконання вимог справжньої інструкції, слюсар несе відповідальність згідно з чинним законодавством.

Вимоги безпеки перед початком роботи

Перед початком роботи слюсар повинен одягнути спецодяг і застібнути манжети рукавів, оглянути і підготувати своє робоче місце, прибрати усі зайві

предмети, не захаращуючи при цьому проходи. Перевірити наявність і справність інструменту, при цьому:

слюсарні молотки і кувалди повинні мати опуклу поверхню бойка, мають бути надійно укріплені на руків'ї шляхом розклинювання клинами;

руків'я молотків повинне мати гладку поверхню;

ударні інструменти (зубила, борідки, керни тощо) не повинні мати тріщин, задирів і наклепів. Зубила повинні мати довжину не менше 150 мм;

напилки, стамески та інші інструменти не повинні мати загострених неробочих поверхонь, бути надійно закріплені на дерев'яній ручці з металевим кільцем на ній;

електроінструмент повинен мати справну ізоляцію струмопровідних частин і надійне заземлення.

Слюсар повинен перевірити стан підлоги на робочому місці, підлога має бути сухою і чистою. Перед використанням переносного світильника слід перевірити, чи є на лампі захисна сітка, чи справні шнур і ізоляційна гумова трубка. Переносний світильник повинен включатися в електричну мережу з напругою не вище 42 В.

Перед початком роботи з вантажопідіймальним механізмом слід переконатися в його справності і відповідності ваги агрегату вантажопідйомності, вказаної на трафареті вантажопідіймального механізму, визначити, чи не прострочені його випробування, а на знімних вантажозахватних пристосуваннях перевірити наявність бирок з вказівкою допустимої маси вантажу, що піднімається.

Вимоги безпеки під час роботи

При розбірно-складальних та інших кріпильних операціях, що вимагають великих фізичних зусиль, слід застосовувати знімачі, гайкокрути та подібний інструмент. Гайки, що важко відвертаються, при необхідності змочувати гасом або спеціальним складом.

Для зняття і встановлення вузлів і агрегатів вагою понад 30 кг слід користуватися підйомними механізмами, обладнаними спеціальними пристосуваннями або іншими допоміжними засобами механізації. При вивішуванні частин автомобіля, карданних валів, напівпричепів підйомними

механізмами (домкратами, талями тощо), окрім стаціонарних, необхідно спочатку поставити під колеса, що піднімаються, спеціальні упори (черевики), потім вивісити деталь, підставити під вивішену частину козелки і опустити на них.

Видаляти розлите масло або паливо слід за допомогою піску або тирси, які після їх використання слід зсипати в металеві ящики з кришками, встановлювані зовні приміщення. Під час роботи необхідно розташовувати інструмент так, щоб не виникало необхідності тягнутися за ним.

Важливо правильно підбирати розмір гайкового ключа, переважно користуватися накидними і торцевими ключами, а у важкодоступних місцях – ключами з тріскачкою або шарнірними голівками. Слід правильно накладати ключ на гайку, не підтискати гайку ривком. При роботі із зубилом або іншим рубаючим інструментом необхідно користуватися захисними окулярами, а також надівати на зубило захисну шайбу для захисту рук. Випресовувати пальці і втулки, що сидять туго, слід тільки за допомогою спеціальних пристосувань. Зняті з автомобіля вузли і агрегати дозволяється складати на спеціальні стійкі підставки, а довгі деталі класти тільки горизонтально. Перевіряти співвісність отворів можна тільки конусним оправлянням. При роботі на свердлувальних верстатах слід встановлювати дрібні деталі в лещата або спеціальні пристосування.

Видаляти стружку з просвердлених отворів можна тільки після відведення інструменту або зупинки верстата. При роботі на заточному верстаті слід стояти збоку, а не навпроти абразивного кола, що обертається, при цьому використовувати захисні окуляри і екрани. Проміжок між підручником і абразивним колом не повинен перевищувати 3 мм.

При роботі електроінструментом напругою вище 42 В необхідно користуватися захисними засобами (гумовими рукавичками, калошами, гумовими килимками, сухими дерев'яними стелажками). Підключати електроінструмент можна тільки за наявності справного штепсельного роз'єму.

При припиненні подачі електроенергії або перерві в роботі треба від'єднувати електроінструмент від мережі, при роботі пневматичним інструментом подавати повітря дозволяється тільки після установки

інструменту в робоче положення. З'єднувати і роз'єднувати шланги пневматичного інструменту дозволяється тільки після відключення подачі повітря.

Паяльні лампи, електричні і пневматичні інструменти дозволяється видавати особам, що пройшли інструктаж і знають правила поводження з ними.

Використаний обтиральний матеріал необхідно прибирати в спеціально встановлені для цього металеві ящики і закрити кришкою. Якщо на тіло і засоби індивідуального захисту потрапив бензин або інша легкозаймиста рідина, забороняється підходити до джерел відкритого вогню, палити і запалювати сірника.

Слюсареві забороняється:

піднімати агрегати при косому натягу троса або ланцюга підйомного механізму, а також зачалувати агрегати стропом, дротом тощо;

переносити електричний інструмент тримаючи його за кабель, а також торкатися рукою частин, що обертаються, до їх зупинки;

здувати пил і стружку стисненим повітрям, направляти струмінь повітря на людей, що стоять рядом, або на себе;

встановлювати прокладення між зівом ключа і гранями гайок і болтів, а також нарощувати ключ трубою або іншими важелями, якщо це не передбачено конструкцією ключа;

використовувати для кріплення шлангів проволікатиму або інші предмети;

використовувати гайки і болти із зім'ятими гранями;

вивішені на підйомних механізмах агрегати штовхати або тягнути руками;

промивати деталі в бензині, прати в бензині спецодяг;

зберігати в приміщенні легкозаймисті рідини, порожню тару з під палива і мастильних матеріалів;

заправляти автомобіль паливом.

Вимоги безпеки по закінченні роботи

По закінченні роботи слюсар зобов'язаний:

відключити від електромережі електроустаткування, вимкнути місцеву вентиляцію;

привести в порядок робоче місце, прибрати пристосування, інструменти у відведене для них місце;

зняти засоби індивідуального захисту і прибрати їх в шафу, своєчасно здавати спецодяг в хімчистку (прання) і ремонт;

вимити руки з милом, а після роботи з деталями і вузлами двигуна, що працює на етилірованном бензині, необхідно заздалегідь мити руки гасом;

Про усі недоліки, виявлені під час роботи сповістити свого безпосереднього керівника.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

Про кожен нещасний випадок, очевидцем якого він став, слюсар повинен негайно повідомляти роботодавця, а потерпілому надати першу долікарняну допомогу, викликати лікаря, доставити потерпілого в найближчу медичну установу.

Якщо нещасний випадок стався з самим слюсарем, він повинен по можливості звернутися в медичну установу, повідомити про те, що сталося роботодавця або попросити зробити це кого-небудь з оточуючих.

У разі виникнення пожежі слід негайно повідомити в пожежну охорону по телефону 101, роботодавця і приступити до гасіння пожежі наявними засобами пожежогасінні.

5.2 Планування цивільного захисту об'єкта

Розробка плану відбувається у три етапи в певній послідовності.

Перший етап – підготовчий, протягом якого визначається склад виконавців і затвердження їх, підготовка виконавців до роботи, доведення до них директив, рекомендацій та інших документів, узагальнення й аналіз вихідних даних, необхідних для розробки плану ЦЗ, визначення обсягу робіт і розподіл обов'язків між виконавцями та закріплення відповідальних за розділами плану.

Для планування, підготовки і проведення заходів евакуації має бути інформація, щоб забезпечити відповіді на такі запитання: чисельність працюючих відвідувачів, обслуговуючого персоналу на даному об'єкті, всього населення в населеному пункті; час доби, коли буває найбільше скупчення людей у приміщеннях; розміщення людей у приміщеннях; стан входів, аварійних виходів; наявність і стан входів для пожежників, міліції, поліції, внесення технічних засобів; труднощі, які треба враховувати під час евакуації людей (вузькі проходи, сходи, непрацюючі ліфти та ін.); забезпеченість будівельними матеріалами, матеріалами для огорожування небезпечних місць, захищення аварійної або цінної апаратури; забезпеченість тимчасовими робочими місцями та ін.; устаткування, прилади, апаратура, документи, які необхідно евакуювати і перелік тих, що можна залишити; можливість переведення виробництва, переведення установ на скорочений режим роботи; вирішення питань зупинення виробництва, установ на скорочений режим роботи; вирішення питань зупинення роботи технологічних ліній, припинення чи скорочення виробництва продукції; забезпечення засобами індивідуального захисту, оповіщення і зв'язку; підготовленість пунктів збору, транспорту для перевезення людей і цінностей, наявність поблизу загрозованих об'єктів (пожежо- і вибухонебезпечні будівлі й матеріали, столярні цехи, приміщення складів, комор, трансформаторні приміщення, хімічні підприємства чи склади).

Планування евакуації має передбачати виникнення найбільш несприятливих ситуацій під час підготовки і проведення евакуації: відсутність відповідних керівників, транспорту, електрозабезпечення, погані погодні умови, аварія на дорозі, паніка серед людей та ін.

Другий етап – практична розробка, оформлення документів. Заходи, які плануються в документах плану, мають бути спрямовані на виконання завдань ЦЗ у надзвичайних ситуаціях.

У документах плану визначають заходи, які потрібно виконати в мирний час, при загрозі виникнення надзвичайних ситуацій, несподіваному нападі противника, стихійних лихах, виробничих аваріях, катастрофах і при ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, проведенні рятувальних та інших невідкладних робіт, а також характер і порядок дій формувань, зміст і обсяг

робіт, строки виконання заходів з урахуванням конкретних умов і можливостей даного об'єкта.

Заходи, які потребують капітальних затрат і матеріально-технічних засобів, також мають бути висвітлені в цих планах.

До них належать: будівництво протирадіаційних укриттів, пункту управління, забійних площадок і пунктів, площадок ветобробки сільськогосподарських тварин; придбання засобів для герметизації тваринницьких ферм, складських приміщень і колодязів; систем зв'язку і оповіщення; придбання майна для формувань, спеціальної техніки, необхідної формуванням для проведення рятувальних та інших невідкладних робіт, автономних джерел електроенергії.

Оскільки заходи потребують матеріальних затрат, вони повинні здійснюватися у комплексі з іншими економічними заходами, через що їх необхідно включити в поточний і перспективний план об'єкта, де вони будуть забезпечені коштами.

За даними оцінки можливої обстановки, що може скластися на об'єкті, керівники об'єкта планують заходи підвищення стійкості роботи об'єкта. Всі пропозиції, пов'язані із затратами, необхідно документально обґрунтувати з поданням відповідних заявок із кошто-рисами в місцеві, районні, обласні органи управління ЦЗ, а якщо необхідно то у відповідні міністерства, відомства. Фінансування капітальних вкладень на будівництво захисних споруд, складів, пункту управління та інших об'єктів ЦЗ відбувається за рахунок об'єкта з коштів,

які виділяються міністерствами в межах загальних обсягів капітальних вкладень.

Планування таких заходів, як підготовка і забезпечення майном формувань, навчання керівного особового складу формувань, працюючих, організація зв'язку і оповіщення, створення навчально-матеріальної бази та ін., проводиться за рахунок коштів об'єкта.

Планування забезпечення особового складу формувань ЦЗ засобами індивідуального захисту та іншими матеріально-технічними засобами

проводиться за нормами, затвердженими Начальником ЦЗ України, узгодженими з Кабінетом Міністрів, відповідним міністерством, відомством.

Третій етап – узгодження розроблених планів із відділом ЦЗ району, з районним агропромисловим управлінням, адміністрацією населеного пункту, службами ЦЗ району, після цього затвердження документів плану ЦЗ. Документи плану ЦЗ підписує керівник – ЦЗ об'єкта, деякі (план евакуації, прийому і розміщення евакуйованого) підписує і начальник ЦЗ голова адміністрації населеного пункту. Зміст плану ЦЗ об'єкту узгоджується з вимогами плану ЦЗ району, що підтверджує начальник відділу з питань цивільного захисту населення району, після чого план ЦЗ затверджує керівник ЦЗ об'єкта.

Після затвердження плану об'єкта організується вивчення документів усім керівним складом об'єкта.

У зв'язку зі зміною вихідних даних, покладених в основу розробки плану об'єкта, таких як: розвиток господарства, технічне забезпечення, кількість і структура населення, рівень розвитку ЦЗ, установлених вимог і завдань та ін., необхідно періодично уточнювати і переробляти розроблені раніше документи плану даного об'єкта. Уточнення і коригування документів плану проводять на тренуваннях і комплексних об'єктових навчаннях ЦЗ.

Зміни і доповнення, які не мають принципових змін, вносять у документи після узгодження з керівництвом об'єкта. Доповнення і зміни принципового характеру узгоджують із відділом цивільного захисту населення району.

На одному з пронумерованих листків позначають, коли, де і ким внесені зміни у план. Це засвідчується підписом керівника ЦЗ і підтверджується печаткою об'єкта.

Структура і зміст плану для забезпечення життєдіяльності в надзвичайних ситуаціях такі.

План цивільного захисту на особливий період. План на воєнний час складається з текстової частини і додатків. Оцінка обстановки, що може скластися на об'єкті в результаті дій противника.

У цьому розділі висвітлюється: коротка характеристика і оцінка обстановки, що може скластися на території об'єкта після несподіваного нападу і при плановому переведенні ЦЗ на воєнний стан;

можливий ступінь руйнування виробничих ділянок і житлових будинків; ступінь радіоактивного забруднення тварин, території; можливість виникнення і характер впливу осередків сильнодіючих отруйних речовин (СДОР), лісових, торфових пожеж, зон затоплення; можливе зниження виробництва; можлива радіаційна, пожежна і хімічна обстановка; стан транспортних артерій, систем енерго-, газо-, водо-, теплозабезпечення, матеріально-технічної бази, оповіщення, зв'язку і управління; втрати сил і засобів ЦЗ і людей, об'єкта та населеного пункту; втрати від повторних факторів ураження; обставини, які можуть скластися на території об'єкта і населеного пункту при використанні противником звичайних засобів ураження.

Висновки з оцінки можливої обстановки і стан сил для рятувальних робіт, вплив на вирішення завдань об'єкта при переведенні на воєнний стан і в період проведення рятувальних та інших невідкладних робіт.

Виконання заходів на об'єкті при планомірному переведенні на особливий період.

Виконання заходів при загрозі нападу противника:

Захист працюючих і членів їх сімей:

а) організація і порядок укриття їх у захисних спорудах: підготовка захисних споруд; організація будівництва ПРУ; будівництво найпростіших укриттів; використання підвалів, погребів та інших заглиблених приміщень для укриття населення і формувань; управління людьми, які знаходяться у захисних спорудах;

б) організація прийому і розміщення евакуйованого населення; порядок оповіщення про початок евакуації населення; загальна кількість населення, що прибуває, організація розміщення їх у населеному пункті; порядок, способи і строки доставки людей від пунктів вивантаження, приймальних евакопунктів до місць розселення; організація розміщення евакуйованих для проживання; організація працевлаштування, матеріального, медичного та іншого забезпечення.

Евакууючи населення із зон катастрофічного затоплення і приміських господарств, розміщених у зоні можливих руйнувань, необхідно визначити: кількість населення, матеріальних цінностей, техніки, які підлягають евакуації та її організацію (час евакуації, район евакуації тощо);

в) протирадіаційний і протихімічний захист: порядок роботи об'єкта- в умовах радіоактивного забруднення. Режим протирадіаційного захисту населення; організація дозиметричного контролю; порядок видачі засобів індивідуального захисту; організація санітарної обробки людей і знезаражування техніки;

г) медичний захист: порядок забезпечення медичними засобами індивідуального захисту формувань, працюючих змін, населення в місцях проживання; проведення санітарно-гігієнічних, профілактичних-, лікувальних і протиепідемічних заходів; організація медичного забезпечення під час ліквідації на об'єкті наслідків нападу- противника.

Заходи забезпечення стійкої роботи у воєнний час.

а) Захист сільськогосподарських тварин і продукції тваринництва: протирадіаційний і протихімічний захист: порядок доведення сигналів ЦЗ

до тваринницьких бригад під час випасу; строки переведення тварин на стійлове утримання; герметизація тваринницьких приміщень; режими протирадіаційного захисту й утримання тварин в умовах радіоактивного забруднення луків і пасовищ. Організація дозиметричного контролю; порядок проведення санітарно-ветеринарних профілактичних заходів; поповнення запасів медичних і ветеринарних засобів; створення запасів фуражу, засобів знезаражування, матеріалів для герметизації; порядок проведення ветеринарної обробки тварин, підготовка забійних пунктів. Організація забою уражених тварин, консервація і зберігання продукції тваринництва;

організація і проведення евакуації тварин: назва (номер ферми, приміщень), населених пунктів, у яких вони розміщені і які потрібно евакуювати в безпечні зони, кількість тварин кожної ферми; способи евакуації; розміщення тварин, організація життєзабезпечення тварин на пунктах евакуації.

Для господарств, які приймають евакуйованих тварин, вказати кількість евакуйованих тварин за видами, порядок їх розміщення і життєзабезпечення.

б) Захист сільськогосподарських рослин і продукції рослинництва: організація спостереження за радіаційним забрудненням, хімічним ураженням посівів сільськогосподарських культур; порядок- доставки проб ґрунту і рослин з осередків ураження в районну станцію захисту рослин і агрохімічну лабораторію; способи виклику підрозділів фітопатологічної розвідки в місця зараження; герметизація сховищ насінневого фонду, складів мінеральних добрив, овочесховищ; порядок поповнення запасів пестицидів, мінеральних добрив; організація переробки і тимчасового зберігання продукції рослинництва.

Заходи підготовки господарств до стійкої роботи в умовах війни розробляють ся в повному обсязі заходів згідно з додатком № 5 «План-графік нарощування заходів підвищення стійкості роботи сільськогосподарського-об'єкта у воєнний час».

в) Захист і знезаражування продуктів харчування, урожаю, кормів, води і джерел води: захист продовольства і зерна в складах і сховищах; захист кормів і урожаю в польових умовах; захист урожаю і фуражу при перевезеннях; захист продовольства, води в домашніх умовах; захист колодязів від ОР, РР і БР; знезаражування урожаю, кормів і води в господарстві.

г) Заходи і ведення рятувальних та інших невідкладних робіт: порядок приведення в готовність формувань ЦЗ; сили і засоби, виділені до територіальних формувань ЦЗ; організація висування сил, виділених для надання допомоги іншим об'єктам; порядок надання медичної допомоги населенню і ветеринарної допомоги тварин; порядок використання техніки об'єкта для знезаражування.

д) Організація забезпечення заходів ЦЗ.

З метою забезпечення дії сил ЦЗ розробляються заходи у вигляді завдань спеціалістам, начальникам служб об'єкта.

Основні види забезпечення заходів: розвідка; транспортне, матеріальне і технічне забезпечення; гідрометеорологічна інформація; пожежне забезпечення та забезпечення громадського порядку.

ж) Організація управління.

Управління об'єкта включає: організацію повідомлення керівного складу формувань, населення в місцях проживання; час розгортання ПУ, склад обслуги, організація чергувань; організація зв'язку, у тому числі й рухомими засобами з виробничими дільницями, формуваннями, взаємодіючими організаціями; порядок подання донесень.

Виконання заходів ЦЗ на об'єкті в умовах несподіваного- нападу противника.

Дії за сигналом «Повітряна тривога» (ПТ): порядок і строки повідомлення працюючих і населення за сигналом «ПТ»; порядок видачі засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), приладів розвідки і дозиметричного контролю, які знаходяться біля робочих місць і в ПРУ; організація безаварійної зупинки виробництва; укриття населення; управління населенням, яке знаходиться в укриттях.

Дії після нападу противника: заходи відновлення порушеного управління; приведення в готовність формувань ЦЗ; введення режимів захисту; організація прийому і розміщення евакуйованого населення; порядок розгортання і приведення до готовності сил і засобів ЦЗ; організація прискореного відновлення і будівництва ЗС; організація і ведення рятувальних та інших невідкладних робіт на території об'єкта; порядок відновлення боєздатності об'єктових сил і засобів, що потерпіли.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Магістерська робота "Проект дільниці ремонтного цеху для технологічного процесу відновлення колінчастого валу 96350171 з дослідженням технологічного процесу лазерного гартування" представляє собою важливий крок у вивченні та вдосконаленні процесів обслуговування та відновлення автомобільних деталей в ремонтному цеху. Основною метою цієї роботи є розробка та впровадження технологічного процесу відновлення колінчастого валу за допомогою лазерного гартування.

Основні висновки з цієї магістерської роботи включають:

Необхідність створення спеціалізованої дільниці ремонтного цеху для відновлення колінчастого валу 96350171 виникає з урахуванням значущості цієї деталі для автомобільного транспорту та потреби у високоякісному ремонті.

Впровадження лазерного гартування є обіцяючою технологією для відновлення колінчастого валу, оскільки вона дозволяє досягти високої якості, міцності та довговічності відновленої деталі.

Проект дільниці ремонтного цеху повинен включати розгортання необхідного обладнання та створення відповідної інфраструктури для проведення процесу лазерного гартування, а також надати спеціалістам доступ до необхідних інструментів та ресурсів.

Дослідження технологічного процесу лазерного гартування в контексті відновлення колінчастого валу вимагає докладних досліджень та встановлення оптимальних параметрів для досягнення найкращих результатів.

У цілому, магістерська робота надає важливий внесок у розробку та оптимізацію процесів ремонту та відновлення колінчастого валу, сприяючи підвищенню якості та надійності автомобілів.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Черненко В.С. Променеві методи обробки: Навчальний посібник [Текст] Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. – К.: Кондор. 2008 -166 с.
2. Ляшук О.Л., Гудь В.З., Пиндус Ю.І., Левкович М.Г., Хорошун Р.В. Методичний посібник до виконання кваліфікаційної роботи магістра за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр» галузі знань 27 «Транспорт» спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» – Тернопіль: Видавництво ТНТУ, 2020. – 66 с.
3. Гевко І.Б Техніко-економічне обґрунтування процесу механічної обробки з використанням комбінованого свердла-мітчика / І.Б.Гевко, Р.Я., Ляшук, І.І.Стойко, Н.М.Марчук, М.Д.Сіправська // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст.–Вип. 40.–Луцьк, 2018. С.21-31.
4. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень на СТО та АТП : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Луциків І.В., Плекан У.М., Клендій В.М. - Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 276 с.
5. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Гудь В.З., Левкович М.Г., Сташків М.Я., Сіправська М.Д. - Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 544 с.
6. Конспект лекцій з курсу «Технології обслуговування автотранспортних засобів». / Р.В. Хорошун, О.Л. Ляшук, Н.Т. Навроцька. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ, 2021. – 194 с.
7. Ляшук О.Л. Конспект лекцій з дисципліни«Технічна експлуатація автомобілів» для студентів спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» / О.Л. Ляшук, В.М.Клендій, Р.В.Хорошун. – Тернопіль: Вид. ТНТУ – 2018. – С. 302.
8. Диха О.В., Свідерський В.П., Дробот О.С., Машовець Н.С. Технологічне забезпечення довговічності технічних трибо систем: монографія / О.В.Диха, В.П.Свідерський, О.С.Дробот, Н.С.Машовець.- Хмельницький:ХНУ, 2021. – 178 с.

9. Ремонт автомобілів: Навчальний посібник / Упор. В. Я. Чабанний. – Кіровоград: Кіровоградська районна друкарня, 2007. – 720 с.
10. Технологія та обладнання для відновлення автомобільних деталей. Конспект лекцій / Укл. Авер'янов В.С.– Кам'янське: ДДТУ, 2018.–70 с.
11. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: Підручник – К.: Знання. 2003. – 511 с.
12. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: організація і управління: Підручник – К.: Знання. 2004. – 478 с.
13. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів. Технологія [Текст]: Підручник. / О.А. Лудченко. - Київ: Знання-Прес, 2007. - 527с.
14. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Левкович М.Г., Гудь В.З., Сташків М.Я., Сіправська М.Д. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 544 с.
15. Lyashuk, O., Levkovych, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Slobodian, L., Pyndus, Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2023, 118, 161-172. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.11>.
16. Sokil, B., Lyashuk, O., Sokil, M., Vovk, Y., Lebid, I., Nevko, I., Khoroshun R Matviyishyn, A. (2022). Methodology of Force Parameters Justification of the Controlled Steering Wheel Suspension. Communications, 24(3), B247-B258.
17. Охорона праці в галузі та цивільний захист: навчальний посібник / Ю. А. Гасило, О. А. Крюковська. К. О. Левчук, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2017. — 369 с.
18. Безпека в надзвичайних ситуаціях : навч. посібник для студентів ЗВО України : у 2 ч. Ч. 1: Надзвичайні ситуації / М. Л. Лисиченко, В. В. Вамболь, С. О. Вамболь, М. М. Кірієнко, І. А. Черепньов, В. М. Власовець ; за ред. М. Л. Лисиченка ; ХНТУСГ. – Харків : ТОВ “ПромАрт”, 2021. – 202 с.

19. Охорона праці на автомобільному транспорті : навчальний посібник / Пістун І. П., Хом'як Й. В., Хом'як В. В. - 2-ге вид., стер. - Суми : Університетська книга, 2015. - 374 с.
20. Дяченко С.С. , Дощечкина І.В., Мовлян А.Ф., Плешаков Е.І. Матеріалознавство: Підручник /за ред. проф. С.С.Дяченко- Харків. ХНАДУ. 2007. – 440 с.
21. Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. Лазерна поверхнева обробка матеріалів / Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. Харків : ФОП Панов А.М., 2020. 100 с. ISBN 978-617-7859- 35-1.
22. Сукач М.К. Технічний сервіс машин. Навч. пос.. Гриф МОНМСУ - Ліра-К, 2017 – 288 с.
23. Форнальчик Є. Ю., Качмар Р. Я. Основи технічного сервісу транспортних засобів - Львівська політехніка 2017, - 324 с.
24. Шапко В.Ф., Шапко С.В. Основи теорії та динаміки автомобільних двигунів : підручник. – Харків : Точка, 2016. – 232 с.
25. Шапко В.Ф. Автомобільні двигуни. Основи теорії та характеристики поршневих двигунів внутрішнього згорання: Навчальний посібник. - Кременчук: КНУ, 2011. - 194 с.
26. Коробочка О.М. Основи розрахунків, проектування і експлуатації технологічного обладнання для автомобільного транспорту: Навч. посібник / Коробочка О.М., Скорняков Е.С., Сасов О.О. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007 – 252 с.
27. Кукурудзяк, Ю. Ю. Технічна експлуатація автомобілів. Організація технологічних процесів ТО і ПР навчальний посібник / Ю. Ю. Кукурудзяк, В. В. Біліченко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 198 с.
28. Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту. – К.: Мінтранс України, 1998. – 16 с. – (Нормативний документ Мінтрансу України).
29. Андрусенко С. І. Технологічне проектування автотранспортних підприємств: навч. посіб. / Андрусенко С. І., Білецький В. О., Бортницький П. І.; за ред. проф. С. І. Андрусенка. – К. : Каравела, 2009. – 368 с.

30. Законодавство України про автомобільний транспорт: збірник законодавчих актів : станом на 1 травня 2005 р. / Верховна Рада України. – К.: Парламентське видавництво, 2005. – 140 с. – (Нормативні директивні правові документи).
31. Канарчук В. Є. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Книга 1 :теоретичні основи. Технологія: підручник / В. Є. Канарчук, О. А. Лудченко, А. Д. Чигиринець – К. : "Вища школа", 1994. – 342 с.
32. Канарчук В. Є. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Книга 2: організація, планування і управління : підручник / В. Є. Канарчук, О. А. Лудченко, А. Д. Чигиринець – К.: "Вища школа", 1994. – 383 с.
33. Курніков І. П. Технологічне проектування підприємств автомобільного транспорту : навчальний посібник / І. П. Курніков, М. К. Корольов, В. М. Токаренко. – К. : Вища школа, 1993. – 191 с.
34. Автомобілі. Теорія : навч. посіб. / В.П. Сахно, В.І. Сирота, В.М. Поляков, В. Г. Головань, О.В. Лисий; Військ. акад. - Одеса: Військ. акад., 2017. - 412 с.
35. Lyashuk, O., Levkovych, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Slobodian, L., Pyndus, Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom (2023) Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 118, pp. 161-172. (Scopus).
36. Aulina, V., Kropivnya, V., Kuzyka, O., Lyashuk, O., Bosyia, M., Vovk, Y., Kropivnaa, A., Sokol, M., Senyk, A., Slobodyan, L. The Influence of Titanium as a Desferoidizing Element on the Stability of Production of Magnesium Cast Irons with Compacted Graphite (2021) Tribology in Industry - Kragujevac : University of Kragujevac, 4 (43), pp. 654-666. (Scopus).
37. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. частина «Цивільна безпека»» / автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.