

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### «Відновлення колінчастого валу двигуна Mercedes OM442 шляхом детонаційного напилення»

Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 132 Матеріалознавство  
Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр КвРМТВА. 21155.01.08.00

Виконав студент 4 курсу група МТВА-21-1



Підпис

Владислав НІЩУН

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ



Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ



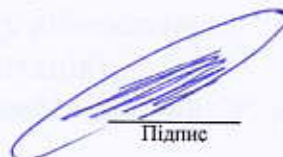
Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:  
Завідувач кафедри ТАМ

6.06 25

Дата



Підпис

Олександр ДИХА

Хмельницький, 2025

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства  
Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 132 Матеріалознавство  
Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТАМ

  
Диха О.В.  
07.02 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ніщуну Владиславу Васильвичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: Відновлення колінчастого валу двигуна Mercedes OM442 шляхом детонаційного напилення.

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 07.02.2025 р. № 23 (Д 14)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 17.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали курсових проектів та робіт.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Аналіз конструкції та умов роботи колінчастого валу двигуна внутрішнього згорання.

2) Матеріали, обладнання та підготовчі операції при відновленні.

3) Розробка технологічного процесу відновлення.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 20.02 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Аналіз конструкції та умов роботи колінчастого валу двигуна внутрішнього згорання.</i>	4.05.25	вик
2	<i>Матеріали, обладнання та підготовчі операції при відновленні.</i>	16.05.25	вик
3	<i>Розробка технологічного процесу відновлення.</i>	26.05.25	вик
4	<i>Оформлення роботи</i>	14.06.25	вик
5	<i>Захист роботи</i>	17.06.25	

Студент

  
Підпис

*Владислав НІЩУН*

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис

*Сергій ПОСОНСЬКИЙ*

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка

## РЕФЕРАТ

Студент гр. МТВА-21-1 Ніщун В.В.

*Структура та обсяг пояснювальної записки.* Дипломна робота на тему «Відновлення колінчастого валу двигуна Mercedes OM442 шляхом детонаційного напилення» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 16 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 2 додатків розміщених на 19 сторінках. Роботу викладено на 72 сторінках, з них 64 сторінок основного тексту, на яких розміщено 17 рисунки і 18 таблиць.

Найбільш відомими з перспективно-розвиваються способів відновлення деталей є газо плазмове та детонаційне напилення. Дані способи відновлення широко застосовуються під час ремонту.

Колінчастий вал - одна з найбільш відповідальних, дорогих, а також складних у ремонті деталей, що працює при знакозмінних навантаженнях, абразивному зношуванні та при впливі високих температур у двигунах внутрішнього згорання.

Виконано аналіз конструкції і умов роботи колінчастого валу двигуна автомобіля Mercedes OM442. В результаті аналізу експлуатаційних дефектів колінчастих валів Mercedes OM442 було встановлено, що найпоширенішими дефектами є: деформація колінчастого валу (69%); провертання, задир або аварійний знос корінних та (або) шатунних шийок (22%).

Виконано аналіз способів відновлення працездатності зношених колінчастих валів, з яких запропоновано метод детонаційного напилення сталюого колінчастого валу зносостійким порошком марки ПР-Н65Х25С3Р3. Детонаційне напилення запропоновано виконувати на комплексі ССДС2000.




Розроблений технологічний процес відновлення опорних та корінних шийок сталюого колінчастого валу, що включає 12 операцій. Розраховано нормування технологічного процесу відновлення, трудомісткість та площу виробничого приміщення для відновлення, призначено обладнання.

**Перелік ключових слів:** КОЛІНЧАСТИЙ ВАЛ, ШАТУННІ ШИЙКИ, КОРІННІ ШИЙКИ, ЗНОШУВАННЯ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, ГАЗОПЛАЗМОВЕ НАПИЛЕННЯ, ДЕТОНАЦІЙНЕ НАПИЛЕННЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 КОНСТРУКЦІЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛУ ДВИГУНА	7
1.1 Призначення та особливості роботи колінчастого валу.	7
1.2 Зношування та основні дефекти колінчастого валу.	14
1.3 Аналіз напружено-деформованого стану колінчастого валу.	15
1.4 Методи відновлення зношених частин колінчастих валів.	24
2 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ПІДГОТОВЧІ ОПЕРАЦІЇ	36
2.1 Оформлення та склад технологічної документації для відновлення машинних деталей.	36
2.2 Матеріали для колінчастих валів.	36
2.3 Порошковий матеріал.	37
2.4 Установка детонаційна.	39
2.5 Обробка струменево-абразивна.	42
3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВІДНОВЛЕННЯ ВАЛУ	48
3.1 Розробка маршруту технологічного відновлення.	48
3.2 Розрахунок норм часу для технологічного процесу.	62
3.3 Визначення трудомісткості та чисельності персоналу	65
3.4 Загальна площа для виробничого приміщення.	68
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70
ДОДАТКИ	72

КвРМТВА. 21155.01.08.00

Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Ніщун			Відновлення колінчастого валу двигуна Mercedes OM442 шляхом детонаційного напилення	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Посонський				4	72	
Н.контр.		Бабак			ХНУ МТВА-21-1			
Затвер.		Диха						

## ВСТУП

Головною функцією автомобільного транспорту є забезпечення повного, якісного та своєчасного задоволення потреб у перевезенні вантажів при мінімальних витратах матеріальних і трудових ресурсів. На сьогоднішній день автотранспорт в Україні виконує приблизно 80% загального обсягу вантажних перевезень [1]. Це свідчить про значну роль вантажного автотранспорту та тенденцію до його постійного зростання, що, у свою чергу, стимулює розвиток сфери ремонту та відновлення деталей і вузлів транспортних засобів.

Сьогодні існує широкий спектр методів відновлення деталей, які можуть бути як традиційними, так і сучасними, експериментальними. У процесі відновлення забезпечується повернення деталі її первинних розмірів, форми та характеристик поверхні. Методи відновлення поділяють на основні та допоміжні. До основних належать такі, як використання ремонтних розмірів, встановлення додаткових елементів, застосування тиску, методи зварювання і наплавлення, металізація, хромування, залізнення тощо.

Серед перспективних технологій відновлення деталей особливе місце займають газоплазмове та детонаційне напилення, які активно використовуються в ремонтній практиці.

Колінчастий вал є однією з найбільш навантажених і складних у ремонті деталей двигуна внутрішнього згоряння. Він працює в умовах змінних навантажень, високих температур і абразивного зношування, що висуває особливі вимоги до його відновлення.

Метою цієї випускної кваліфікаційної роботи є розробка технологічного процесу відновлення сталевого колінчастого валу двигуна Mercedes OM442 із застосуванням методу детонаційного напилення.

Основні завдання роботи полягають у наступному:

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Провести аналіз конструктивних особливостей та умов експлуатації колінчастих валів, а також дослідити існуючі методи їх відновлення.

2. Розробити технологічний процес відновлення сталевого колінчастого валу для двигуна Mercedes OM442.

3. Виконати необхідні технологічні розрахунки для обґрунтування процесу відновлення шийок колінчастого валу за допомогою детонаційного напилення.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

# 1 КОНСТРУКЦІЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛУ ДВИГУНА

## 1.1 Призначення та особливості роботи колінчастого валу.

Колінчастий вал (див. рисунок 1.1) виконує ключову функцію у двигуні внутрішнього згоряння — він сприймає зусилля, які передаються від поршнів через шатуни, та перетворює їх у крутний момент. Цей момент далі через маховик передається елементам трансмісії автомобіля [2].

Основні складові частини колінчастого валу:

1. Корінна шийка — слугує опорною частиною валу, що встановлюється в корінному підшипнику, закріпленому в картері двигуна.

2. Шатунна шийка — елемент, що забезпечує з'єднання з шатуном; для подачі мастила до підшипників передбачені спеціальні масляні канали.

3. Щоки валу — виконують функцію зв'язку між корінними та шатунними шийками.

4. Передня частина валу (носовик) — місце кріплення шківів або зубчастого колеса для приводу газорозподільного механізму (ГРМ) і додаткових систем двигуна.

5. Задня частина валу (хвостовик) — служить для з'єднання з маховиком або передачею обертового моменту через ведучу шестерню.

6. Противаги — компенсують відцентрові сили інерції, що виникають через масу кривошипно-шатунного механізму, знижуючи навантаження на корінні підшипники.

Конфігурація колінчастого валу залежить від кількості циліндрів двигуна, черговості їх роботи та типу робочого циклу [3]. У більшості автомобільних двигунів застосовуються повноопорні колінчасті вали — їх конструкція передбачає розміщення кожної шатунної шийки між двома

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

корінними. Таким чином, кількість корінних шийок завжди на одну більша за кількість шатунних.

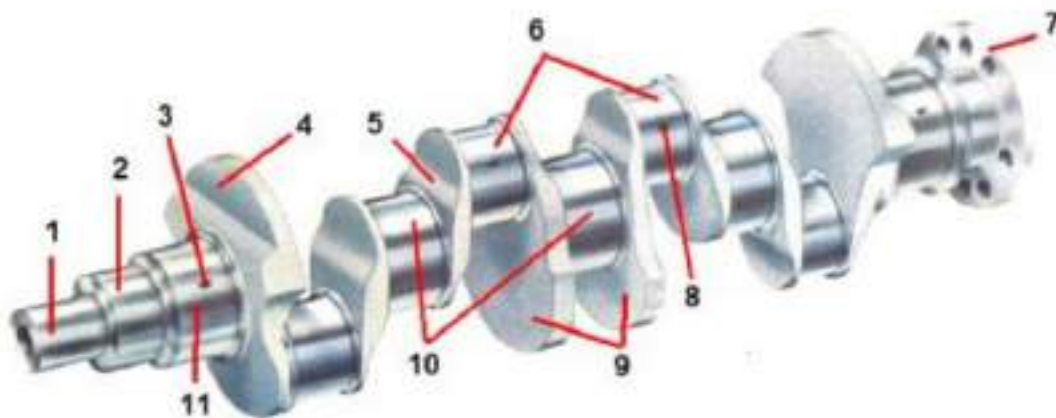


Рисунок 1.1 – Складові елементи колінчастого валу:

1 - носок колінчастого валу; 2 - посадочне місце зірочки (шестерні) приводу розподільного валу; 3 - отвір підведення мастила до корінної шийки; 4 - противага; 5 - щока; 6 - шатунні шийки; 7 - фланець крутня; 8 - отвір підведення олії до шатунової шийки; 9 - противаги; 10 - корінні шийки; 11 - корінна шийка упорного підшипника.

Виробництво колінчастих валів здійснюється за допомогою гарячого штампування із легованих сталей або литтям із високоміцного чавуну. Противаги можуть бути виконані як разом із тілом валу, так і окремими елементами. Розташування шатунних шийок визначається таким чином, щоб такти роботи циліндрів (наприклад, такт розширення) відбувалися рівномірно по кутах обертання валу, що дозволяє досягти балансування сили інерції у двигуні.

Якщо конструкція колінчастого валу не забезпечує повного балансування сил інерції та спричинених ними моментів, для усунення небажаних навантажень встановлюють противаги або застосовують спеціальні балансувальні механізми в двигуні.

						КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			8

Щоб продовжити ресурс роботи корінних і шатунних шийок колінчастого валу та зменшити їх зношування, ці елементи піддають зміцненню шляхом індукційного загартування струмами високої частоти, після чого проводять операції шліфування й полірування. Місця переходу від шийок до щок (жолобники) виконують із плавними радіусами, що дозволяє зменшити концентрацію напружень і попередити можливі руйнування валу. Також для підвищення жорсткості та міцності конструкції застосовують перекриття шийок [3].

Більшість колінчастих валів мають у шатунних шийках спеціальні порожнини для накопичення забруднень і додаткового очищення мастила під дією відцентрових сил. Як опори для корінних шийок використовують тонкостінні вкладиші, основною функцією яких є зниження тертя між поверхнями й зменшення інтенсивності зношування.

Під час роботи зчеплення та косозубих передач газорозподільного механізму на колінчастий вал діють осьові сили, що прагнуть змістити його вздовж осі. Найбільші з них виникають під час роз'єднання зчеплення. Для утримання валу в осьовому напрямку застосовують упорний підшипник, який зазвичай розміщують по обидва боки першої корінної опори.

Передній кінець колінчастого валу обладнаний не лише зубчастим колесом приводу ГРМ, а й масловідбивачем, маточиною для шківів приводу водяного насоса, вентилятора та генератора. У торцевій частині валу встановлюють храповик, що використовується для запуску двигуна вручну та фіксації деталей, розташованих на цьому кінці. Герметизація передньої частини валу виконується за допомогою самопідтискного сальника з гуми, який встановлений у корпусі розподільних шестерень, додатково захищений масловідбивачем. Завдяки спеціальному кожуху із загнутими краями мастило не потрапляє на сальник. Для захисту від пилу та бруду на маточині шківів передбачений пилевідбивач.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Ущільнення задньої частини колінчастого валу включає сальник, маслозгінну різьбу та масловідбивний гребінь. Маслозгінна різьба виконується у напрямку, протилежному обертанню валу, що сприяє поверненню мастила у піддон. Як сальник тут використовується азбестовий шнур, насичений антифрикційним складом із графітовим покриттям [2].

У задній частині валу встановлений шарикопідшипник первинного валу коробки передач. Також на фланці, який є невід'ємною частиною валу, закріплюється маховик за допомогою болтів із високоміцної сталі.

У рамках цієї випускної кваліфікаційної роботи об'єктом дослідження обрано колінчастий вал двигуна стандарту Євро-2 моделі Mercedes OM442 (рисунок 1.2). На його прикладі буде розроблено технологічний процес відновлення пошкоджених поверхонь за допомогою газотермічного напилення порошкових матеріалів. Цей метод вважається універсальним і може бути адаптований для ремонту інших типів колінчастих валів [5].



Рисунок 1.2 – Двигун Mercedes OM442.

Двигуни Mercedes OM442 – це двигуни з V-подібним розташуванням циліндрів. Вони відзначаються широким набором модифікацій, які охоплюють практично весь діапазон потужностей. Дані двигуни мають 8 циліндрів, діаметром до 130 мм із парою клапанів. Вони досягають високих показників потужності за низьких оборотів. При швидкості обертання 1800 оборотів на хвилину вони видають 408 к.с. (300 кВт).

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10



У блоці циліндрів встановлений сталевий колінчастий вал, що забезпечує хід поршня довжиною 120 мм. Діаметр корінних шийок валу становить 95 мм, а шатунних — 80 мм. Шатунні деталі виготовляють зі сталі, їх довжина дорівнює 225 мм. Поршні, виконані з алюмінієвого сплаву, мають висоту 75,7 мм та оснащені камерою згоряння, зміщеною на 5 мм відносно центральної осі. Діаметр отвору під поршневий палець дорівнює 45 мм.

Зверху блоку розміщуються окремі чавунні головки для кожного циліндра, кожна з яких обладнана двома клапанами — впускним і випускним. Діаметр тарілки впускного клапана становить 51,6 мм, а випускного — 46,6 мм. Розподільний вал розташований в блоці циліндрів, і він керує роботою клапанного механізму через систему штовхачів, штанг і коромисел. Привід розподільного валу здійснюється за допомогою шестерень, які з'єднують його з колінчастим валом.

Колінчастий вал двигуна MERCEDES OM442 стандарту Євро-2 (рисунок 1.3) виготовляють із легованої сталі марки 42ХМФА та піддають азотуванню для підвищення твердості й зносостійкості. Конструктивно вал має п'ять корінних і чотири шатунних шийки, які поєднані щоками та плавними перехідними жолобниками. Для забезпечення рівномірного чергування тактів у циліндрах шатунні шийки розміщені під кутом  $90^\circ$  одна до одної.

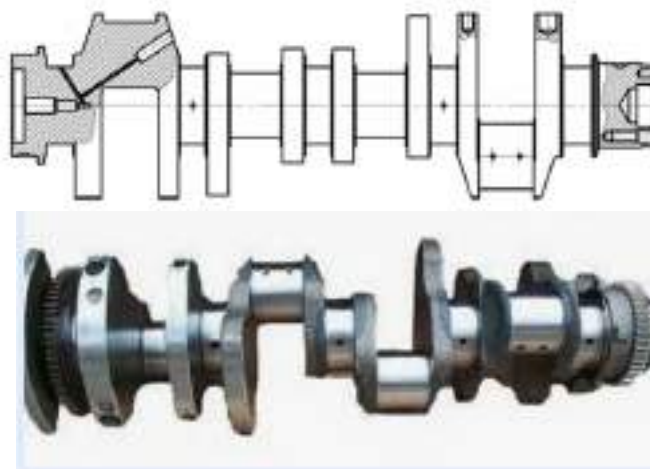


Рисунок 1.3 – Схема і зовнішній вигляд колінчастого валу двигуна OM442

					КВРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Зміцнення колінчастого валу виконується методом азотування, при якому формується зміцнений шар завтовшки 0,5–0,7 мм із твердістю не менше 600 HV. Постачання масла до шатунних шийок забезпечується через масляні канали, що проходять у корінних шийках.

Щоб зменшити рівень вібрацій і компенсувати сили інерції, колінчастий вал оснащують шістьма основними противагами, які виконані разом зі щоками. Додатково встановлюється знімна противага, яка напресовується на вал і фіксується в певному положенні шпонкою.

На хвостовику валу передбачена шийка для центрування маховика та зубчастого колеса. У задній торцевій частині розташовано десять різьбових отворів M16x1,5-6H, призначених для кріплення маховика та шестірни. Передній торець має вісім отворів M12x1,25-6H для встановлення гасника крутильних коливань. Розміри корінних шийок складають 95-0,015 мм, а шатунних — 80-0,013 мм. Для продовження строку служби валу передбачено вісім ремонтних розмірів вкладишів.

При ремонті колінчастого валу важливо зберігати точність діаметрів згідно з нормативами для нових деталей. Якщо при обробці азотованого або карбонітрованого валу розміри шийок зменшуються до 94 мм або менше для корінних та до 79 мм або менше для шатунних, необхідно повторно провести зміцнювальну обробку за спеціальною методикою.

Азотування має як переваги, так і недоліки [4]. Головним плюсом є утворення шару з високою твердістю до 1200 HV. Для валів зі сталі 42ХМФА (ТУ 14-1-1296-75) твердість досягає 800 HV при мінімально допустимих 600 HV. Ще однією перевагою азотування є рівномірне насичення азотом усієї поверхні деталі, що підвищує її міцність на вигин. Серед недоліків технології виділяють тривалість процесу (до 30 годин), обмежену товщину зміцненого шару, складність подальшої механічної обробки, зниження пластичності та в'язкості, а також крихкість азотованого шару і ризик його руйнування при перегріві.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

## 1.2 Зношування та основні дефекти колінчастого валу.

Під час роботи колінчастий вал піддається впливу циклічних навантажень, що виникають від тиску газів і масових сил інерції, що створює вигинальні та скручувальні моменти, а також крутильні коливання, які при резонансі можуть спричинити підвищені напруження [5].

Зношування поверхонь деталей відбувається внаслідок складних фізико-хімічних процесів, які залежать від матеріалів, умов контакту, навантажень та швидкості переміщення. Основним типом руйнування є механічний знос, який включає абразивне і втомне зношування. Також можуть проявлятися молекулярно-механічний і корозійно-механічний види зносу, які іноді стають провідними в залежності від умов експлуатації.

Серед типових дефектів колінчастого валу виділяють:

1. Викривлення валу;
2. Зношування посадочних місць і шпонкових пазів під шків або шестерню;
3. Пошкодження різьбових з'єднань під храповик;
4. Вироблення отворів або різьблення на фланці кріплення маховика;
5. Зношування шийок тощо.

Вали вибраковують при виявленні тріщин, відшарування металу на шийках, які неможливо усунути шліфуванням, а також при будь-яких тріщинах у щоках валу. Підлягають вибраковці також вали зі зношуванням шийок, що перевищує допустимі ремонтні розміри.

Корінні та шатунні шийки, разом із жолобниками, схильні до контактного зношування. Шатунні шийки з часом набувають форми еліпса, а також можуть бути конічними по довжині. Зношування найбільше проявляється в зоні, що ближче до осі валу. Корінні шийки частіше зношуються рівномірно по довжині, але по колу можуть набувати овальної форми.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

За результатами аналізу дефектів колінчастих валів Mercedes OM442 найчастіше зустрічаються такі проблеми:

- деформація валу (69% випадків);
- знос або пошкодження шийок (22%);
- ослаблення посадок, руйнування різьблення, зминання штифтів у зоні кріплення маховика (19%).
- поява тріщин на корінних і шатунних шийках (7%);

При нормальному зношуванні відхилення діаметра корінних шийок становить у середньому 0,027 мм, а шатунних — 0,029 мм. Биття середньої шийки коливається від 0,02 до 0,17 мм (у середньому 0,054 мм), тоді як при аварійному зношуванні ці показники зростають до 0,040–0,730 мм із середнім значенням 0,227 мм.

Основними причинами задирів шийок є порушення мастильного режиму або перевищення граничної похибки форми понад 0,05 мм.

Випадки руйнування валів від втомних навантажень становлять близько 1,1%. Зазвичай тріщини виникають у площині кривошипа під дією згинальних моментів. При цьому більшість зруйнованих валів мали супутні дефекти, такі як задири, тріщини або подрізи в зонах галтелей. Додатково близько чверті зруйнованих валів мали приховані дефекти, що виникли ще на стадії штампування.

### 1.3 Аналіз напружено-деформованого стану колінчастого валу.

Для дослідження прогину колінчастого валу та визначення розподілу реактивних сил у зонах контакту головних шийок із опорами «V» - подібної головки блоку було створено кінцево-елементну модель [6] валу вантажного автомобіля. Для проведення аналізу геометрична модель валу була розбита на сітку з використанням чотиригранних об'ємних елементів типу STETRA, кожен із яких мав три поступальні ступені свободи в кожній вузловій точці.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

У результаті дискретизації отримана скінченно-елементна модель складалася з 137 475 елементів та мала 126 114 ступенів свободи. Побудовану модель, яка застосовувалася для розрахунків, представлено на рисунку 1.4.

При моделюванні передбачалося, що вал виготовлений із сталі марки AISI 1060-2, що має такі характеристики: модуль пружності (Юнга)  $E = 212$  ГПа, коефіцієнт Пуассона — 0,29, а щільність матеріалу становить  $7,7 \times 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>.

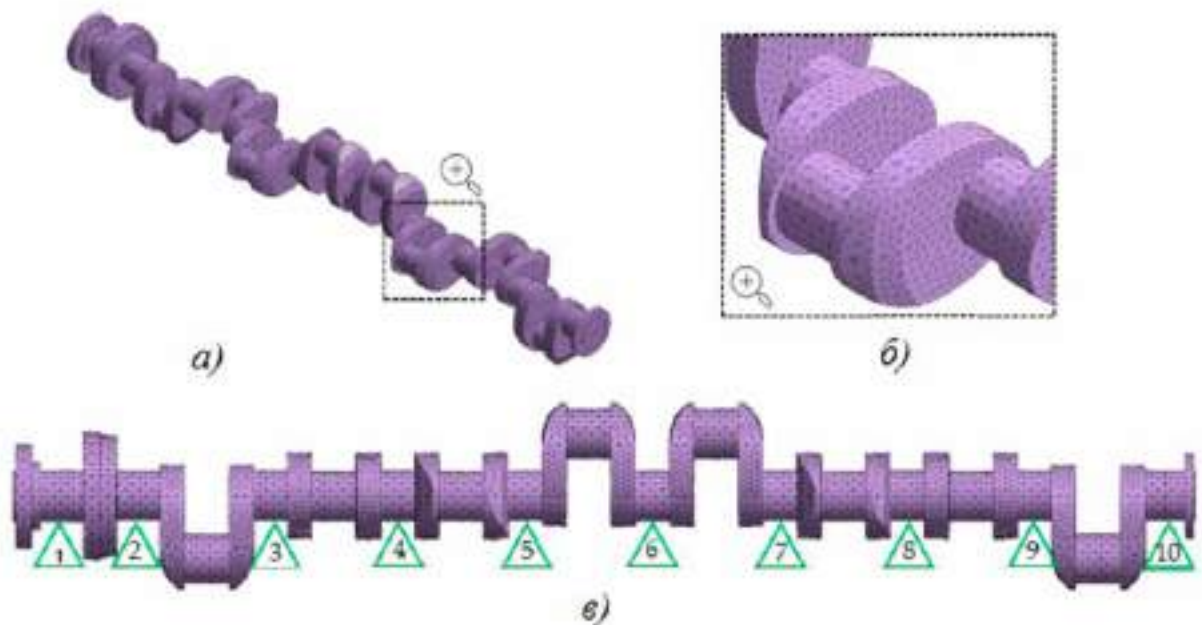


Рисунок 1.4 – Сітчаста модель колінчастого валу:

а - вигляд ізометричний; б - план сітки (збільшений); в - прикладання підтримки опор.

У моделі було враховано дію власної ваги колінчастого валу. Для розрахунку прогинів і визначення реактивних сил в опорах застосовано лінійний статичний аналіз за допомогою програмного комплексу «Настрон» (SOL101) [7]. Додаткові дослідження проводились для аналізу впливу деформацій та змін реактивних сил на опорних шийках у разі наявності

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

геометричних відхилень і зміщень опор, коли шийки спираються на опори. Різні положення валу моделювалися шляхом його обертання під впливом сили тяжіння [8].

Планування дослідження включало аналіз прогину валу та розподілу реакційних сил у місцях контакту головних шийок із опорами V-подібного блоку. Було розглянуто чотири основних випадки, що найкраще ілюструють можливі робочі ситуації [9]:

- Випадок 1: усі головні шийки мають ідеальне співвісне розташування, але п'ята опора (відліком від зубчастого механізму) встановлена вище на 0,03 мм відносно решти.

- Випадок 2: шийки зберігають ідеальну коаксіальність, проте п'ята опора знаходиться нижче на 0,03 мм щодо інших.

- Випадок 3: вісь п'ятої головної шийки зміщена догори на 0,03 мм, при цьому всі опори встановлені на одному рівні.

- Випадок 4: вісь п'ятої головної шийки зміщена донизу на 0,03 мм при рівномірному розташуванні опор по висоті.

Візуалізацію розглянутих випадків наведено на рисунку 1.5.

#### Опис першого випадку

В рамках дослідження були виконані розрахунки переміщень та реактивних сил, що виникають у зоні контакту головних опорних шийок із опорами, за умови зміщення п'ятої опори на +0,03 мм. Таке розташування опорних точок створює початковий прогин валу навіть у випадку ідеальної геометрії деталі. Результати для цього випадку наведені на рисунку 1.6, а на рисунку 1.7 представлено графік зміни прогину при обертанні валу на кут  $15^\circ$ . При цьому відхилення шийок залишалось на рівні 0 мм. Рисунок 1.7 демонструє графіки зміни прогинів, зафіксовані у вертикальній площині на окремих головних цапфах при поступовому повороті вала на  $150^\circ$  за один крок, а також у ситуації, коли одна з опор (№ 5) піднята на 0,03 мм відносно решти.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для кута повороту валу  $90^\circ$  та заданої конфігурації опор у таблиці 1.2 наведено значення змін реактивних сил, що діють у зоні контакту п'ятої опори [9]. Таблиця 1.2 відображає зміну сил реакції, що виникають у точках контакту опор із кожною головною цапфою під час повороту валу на  $90^\circ$ , при цьому одна з опор (№5) піднята на 0,03 мм вище за інші.

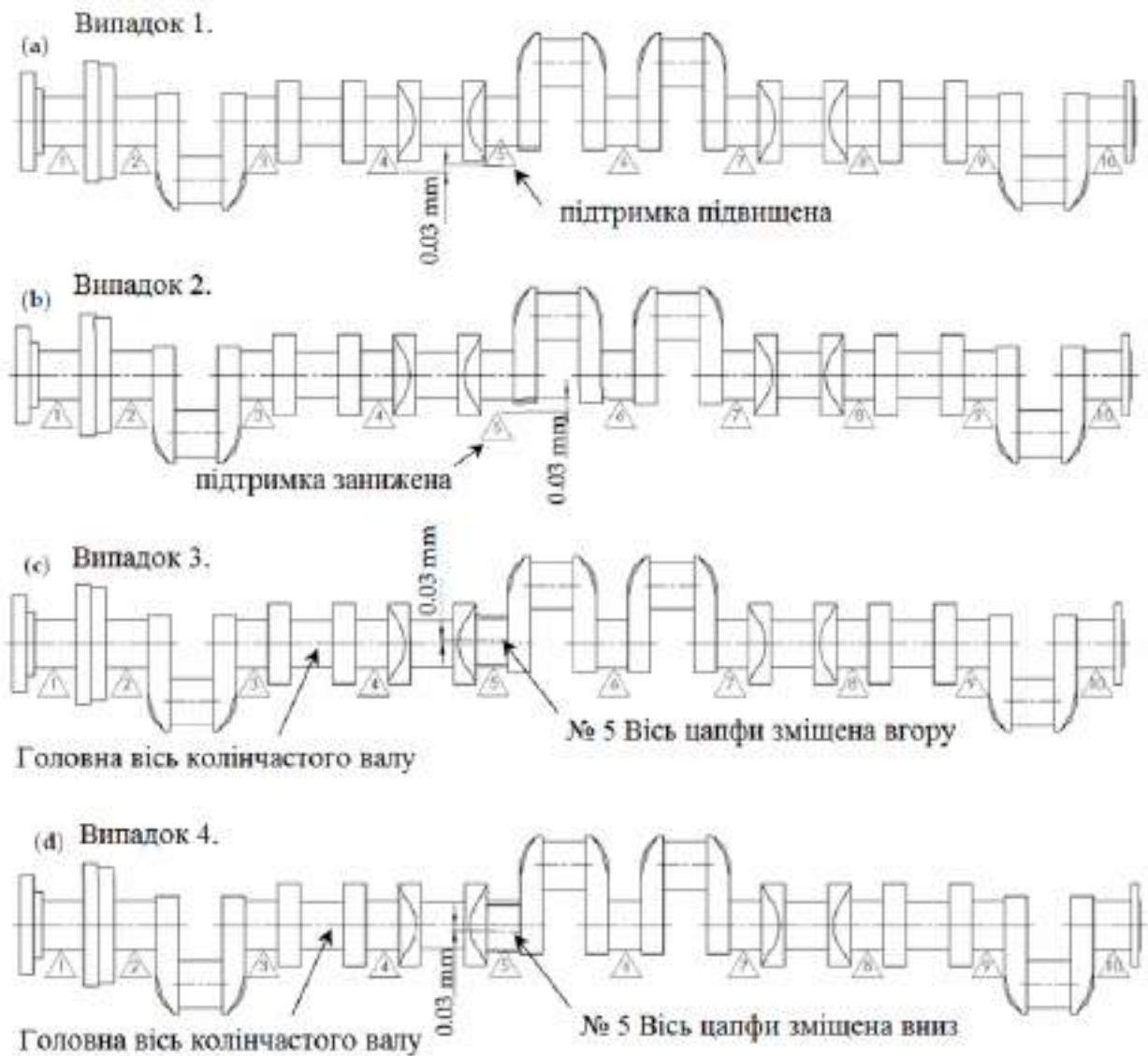


Рисунок 1.5 – Ілюстрація розглянутих випадків.

У першому випадку спостерігається циклічне вигинання валу догори, що спричиняє значне навантаження на опору № 5, яка фактично стає основною підтримкою. У результаті такого зміщення опори інші опорні

									Арк.
									18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

точки — № 3, 4, 6 і 7 — втрачають контакт із відповідними цапфами, оскільки вал піднято вгору в зоні п'ятої опори.

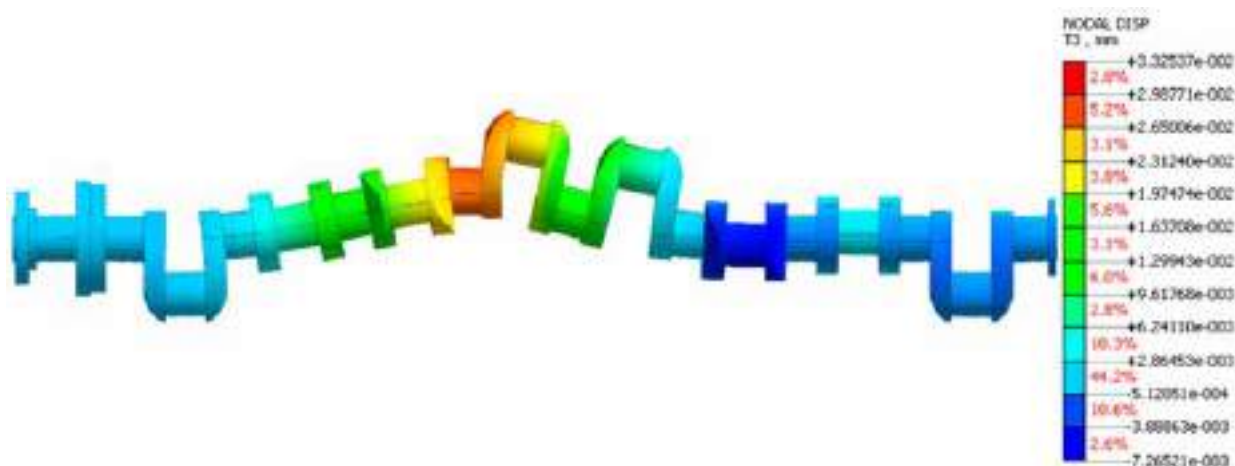


Рисунок 1.6 – Перший випадок, результати аналізу.

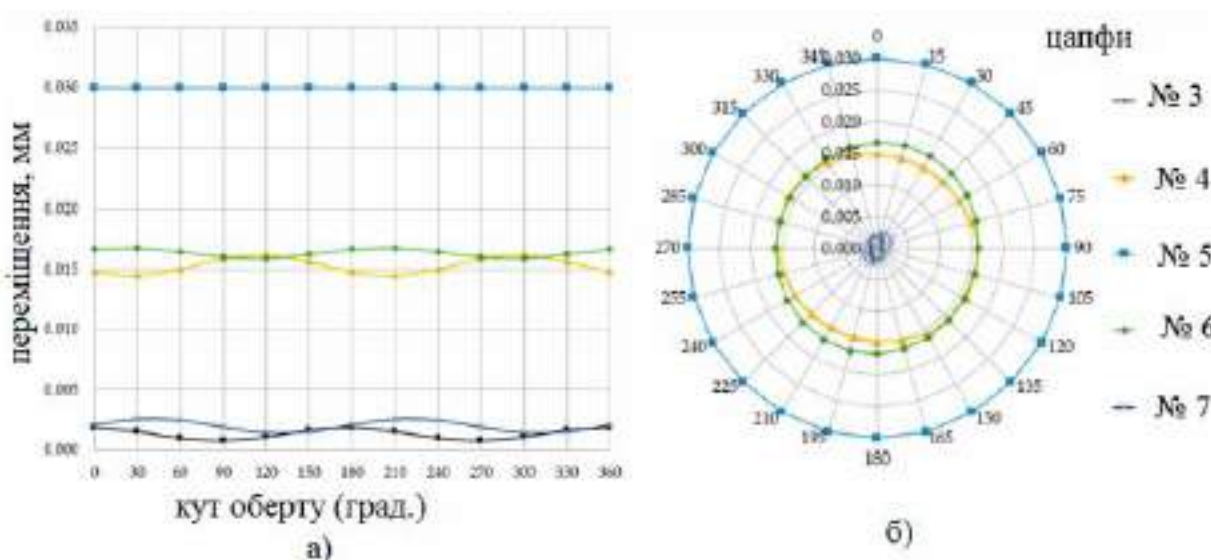


Рисунок 1.7 – Графіки зміни прогинів:

а) – результати представлені в декартовій системі координат; б) – результати відображені в полярній системі координат.

Другий випадок.

При опусканні п'ятої опори на 0,03 мм відносно інших її функція як опорного елемента порушується, що фактично виводить її із зони контакту з

валом. Це призводить до того, що опора перестає виконувати підтримку валу в заданому місці.

Результати кінцево-елементного аналізу для цієї ситуації наведені на рисунку 1.8. Графічна залежність зміни прогину колінчастого валу при обертанні на  $150^\circ$  для цього випадку представлена на рисунку 1.9. Рисунок 1.9 ілюструє зміну прогинів, зафіксованих у вертикальній площині на окремих головних цапфах під час послідовного повороту валу на  $150^\circ$  за кожен крок у випадку, коли одна з опор (№5) опущена на 0,03 мм нижче відносно інших.

Таблиця 1.2 – Варіація сил реакції (опора №5 встановлена вгору)

Кут повороту	Величина реакції від сили (Н) на опорах №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$270^\circ$	878,8	1302,2	-	-	3928,8	-	-	1470,9	1162,4	540,7
$180^\circ$	681,2	1545,4	-	-	3891,3	-	-	1441,7	1157,6	566,5
$90^\circ$	878,8	1302,2	-	-	3928,8	-	-	1470,9	1162,4	540,7
$0^\circ$	681,2	1545,4	-	-	3891,3	-	-	1441,7	1157,6	566,5

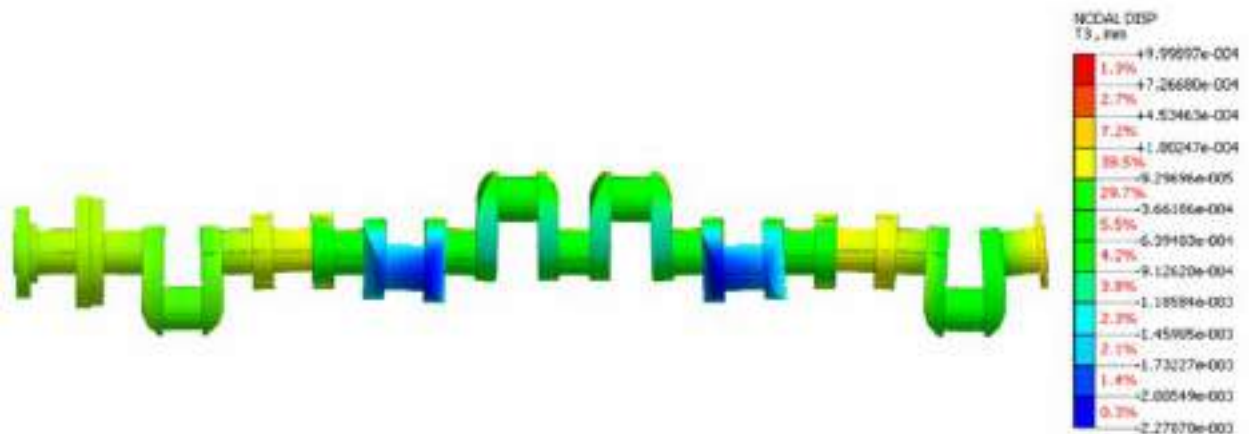


Рисунок 1.8 – Другий випадок, результати аналізу.

Таблиця 1.3 містить дані про зміну сил реакції в місцях контакту опор із кожною з головних цапф під час повороту вала на  $90^\circ$ , при цьому одна з опор (№5) опущена на 0,03 мм нижче відносно інших.

Таблиця 1.3 – Варіація сил реакції (опора №5 встановлена вниз)

Кут повороту	Величина реакції від сили (Н) на опорах №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$270^\circ$	817,30	844,7	775,50	1773,6	-	1541,2	914,90	907,9	1168,40	540,3
$180^\circ$	725,40	996,9	729,40	1714,0	-	1750,0	584,30	1183,4	1025,20	572,3
$90^\circ$	817,30	844,7	775,50	1773,6	-	1541,2	914,90	907,9	1168,40	540,3
$0^\circ$	725,40	996,9	729,40	1714,0	-	1750,0	584,30	1183,4	1025,20	572,3

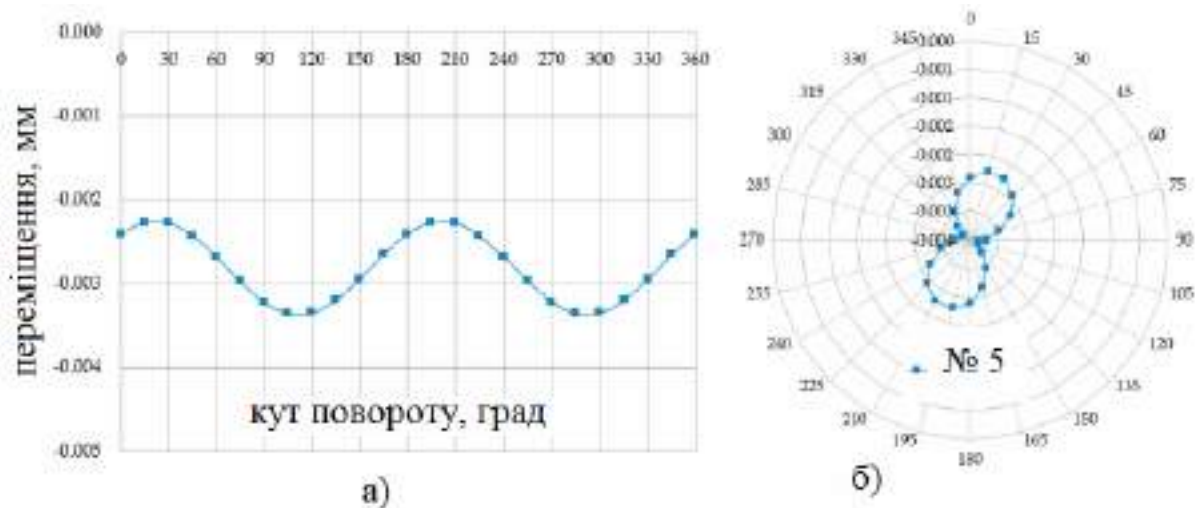


Рисунок 1.9 – Графіки зміни прогинів (2 випадок):

а) – результати представлені в декартовій системі координат; б) – результати відображені в полярній системі координат.

На рисунку 1.10 наведено графіки зміни прогинів, зафіксованих у вертикальній площині на окремих головних цапфах колінчастого валу, коли цапфа № 5 була встановлена із підйомом на 0,03 мм відносно інших опор. Відображення результатів представлено у двох системах координат:

- а) у декартовій системі;  
 б) у полярній системі координат.

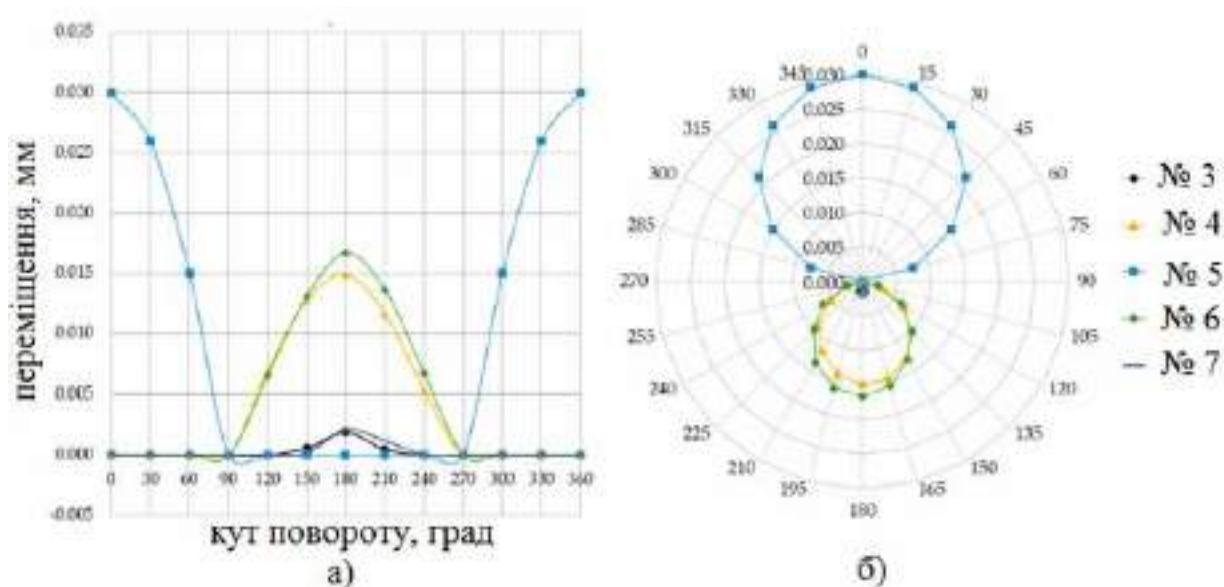


Рисунок 1.10 – Графіки зміни прогинів (3 випадок).

У таблиці 1.4 подано значення реактивних сил опор для чотирьох основних кутових положень валу при зазначеній конфігурації.

Таблиця 1.4 – Варіація сил реакції (3 випадок).

Кут повороту	Величина реакції від сили (Н) на опорах №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
270°	833.3	763.1	1134.0	891.3	1126.1	809.9	1127.1	886.2	1173.4	539.5
180°	725.4	996.9	-	-	3891.3	-	-	1441.7	1157.6	566.5
90°	833.3	763.1	1134.1	891.3	1126.1	809.9	1127.1	886.2	1173.4	539.5
0°	725.4	996.9	729.4	1714.0	0	1750.0	584.3	1183.4	1025.2	572.3

Четвертий випадок.

При повороті колінчастого валу на 180° ексцентричність осі п'ятої цапфи зміщується на протилежний бік щодо попереднього випадку. Аналіз

показав, що при кутових положеннях валу від  $0^\circ$  до  $360^\circ$  результати розрахунків прогинів і реакційних сил залишаються аналогічними даним із таблиці 1.4.

Конфігурація деформації валу при цьому нагадує форму, раніше подану на рисунку 1.6. Графік змін прогинів при поступовому обертанні валу через кожні  $15^\circ$  представлений на рисунку 1.11. На рисунку 1.11 показано зміну прогинів у вертикальній площині для окремих головних цапф у випадку, коли цапфа № 5 була зміщена вниз на 0,03 мм відносно інших:

- а) у декартовій системі координат;
- б) у полярній системі координат.

Зсув інших цапф, що не відображені на графіку, становив 0 мм.

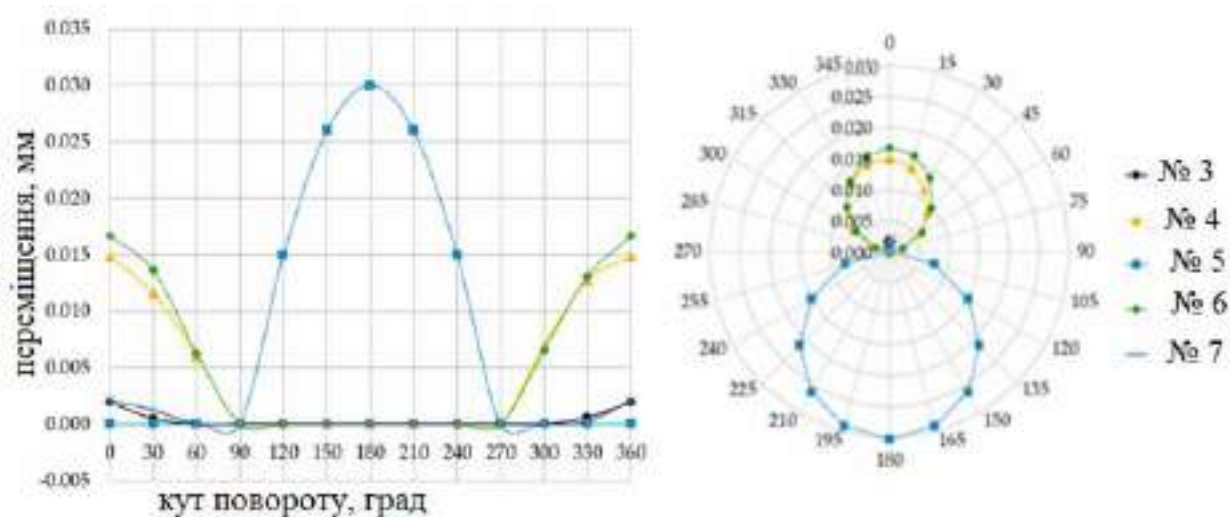


Рисунок 1.11 – Графіки зміни прогинів (4 випадок).

Проведене дослідження підтвердило важливість забезпечення оптимальних умов підтримки колінчастого валу для запобігання виникненню прогинів і відповідних пружних деформацій, що виникають як під дією власної маси валу, так і внаслідок його геометричних відхилень. Досягнення такого ефекту можливе лише при постійному та надійному контакті між корінними шийками валу та опорами.

Відхилення положення осей цапф або наявність попередніх деформацій можуть призводити до додаткових пружних змін під час обертання валу. Такі явища стають причиною взаємного впливу геометричних похибок і пружних деформацій, що, у свою чергу, викликає порушення стабільності контакту між опорними поверхнями шийок і підшипниками валу.

#### 1.4 Методи відновлення зношених частин колінчастих валів.

Відновлення деталей повинно здійснюватися з мінімальними витратами часу та ресурсів, при цьому важливо забезпечити тривалий термін експлуатації після ремонту. Досягнення цього можливе завдяки правильному підбору ефективних способів ремонту. Варто зазначити, що один і той самий метод відновлення може по-різному впливати на деталь залежно від конкретних умов її експлуатації та характеру дефекту.

Нижче наведено основні технології, які застосовуються для відновлення колінчастих валів [10, 2, 4].

##### 1. Усунення вигину колінчастого валу.

При деформації валу проводять його правку, яка може здійснюватися як без нагріву (холодна), так і з попереднім підігрівом. Для виконання цієї операції вал розміщують на призмах за крайні корінні шийки, а середню шийку встановлюють під пресом таким чином, щоб максимальний прогин був зверху. Під час правки створюється додаткове навантаження, що перевищує значення викривлення у 10 разів.

Після проведення холодної правки для стабілізації матеріалу проводять нагрівання валу до температури 400–450 °С із витримкою від 30 до 90 хвилин. Така термічна обробка дозволяє знизити залишкові напруження, що виникли під час виправлення.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

## 2. Шліфування шийок до ремонтного розміру

Шліфування шийок колінчастого валу до ремонтних розмірів є ефективним способом відновлення, за умови що під час обробки не буде повністю видалений зміцнений термічною обробкою поверхневий шар. Пошкодження та дефекти на поверхні усуваються шляхом механічної обробки до заздалегідь визначеного ремонтного розміру, після чого використовуються нові вкладиші відповідного розміру. У результаті досягається відновлення необхідного зазору чи натягу в сполученні, хоча самі розміри деталей вже відрізнятимуться від початкових.

Використання вкладишів ремонтного розміру (збільшених, наприклад, на 0,5 мм) дозволяє зменшити витрати праці й знизити загальну вартість відновлювальних робіт, при цьому забезпечуючи надійну роботу відремонтованих вузлів, таких як блоки циліндрів та шатуни.

Розміри та допуски для ремонтних шийок встановлюються виробником. Як правило, для колінчастих валів передбачені такі ступені зменшення діаметра шийок: на 0,25 мм, 0,5 мм, 0,75 мм, 1 мм та 1,5 мм.

Такий метод відновлення вирізняється простотою виконання, мінімальними витратами праці (приблизно в 1,5–2 рази менше, ніж при проведенні наплавлення чи зварювання) та високою економічною ефективністю, а також дозволяє зберегти взаємозамінність деталей у межах ремонтних розмірів.

Шліфування шийок колінчастого валу виконується на круглошліфувальних верстатах, наприклад, типу За432. Для обробки сталевих валів застосовуються шліфувальні круги марок Е46-60 СТ1-СТ25К, а для чавунних — КЧ46СМ2-М25К, розмірами ПП 900×30×305 мм. Оптимальні режими роботи передбачають швидкість обертання шліфувального круга в межах 25–30 м/с. При цьому для шатунних шийок

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

рекомендована швидкість подачі становить 10–12 м/хв, а для корінних — 18–20 м/хв. Поперечна подача круга під час обробки дорівнює 0,006 мм.

У процесі шліфування важливо дотримуватися необхідних параметрів жолобників і не допускати збільшення довжини шатунних шийок. Першими обробляють корінні шийки, встановлюючи вал у центри верстата так, щоб фланець був спрямований до задньої бабки. Для обробки шатунних шийок застосовують центрозміщувач, завдяки чому вісь оброблюваної шийки точно збігається з віссю верстата. Роботу починають із першої шийки, а для переходу до наступних вал повертають на відповідний кут.

Фаски в області масляних каналів на корінних та шатунних шийках притуплюють за допомогою конусного абразивного інструменту, що працює через пневматичну бормашину. Щоб досягти потрібної шорсткості поверхні, після шліфування проводять суперфінішування на верстаті типу 2К34. Для цього застосовують бруски з білого електрокорунду марки ЛОЗ-3 перетином 20×20 мм. Для початкового суперфінішування використовують бруски твердістю С2РВ83-88, а для завершальної обробки — С1РВ77-82.

Серед недоліків цього методу можна виділити збільшення номенклатури запасних частин, що ускладнює логістику, зберігання деталей, а також їх подальше комплектування та складання.

Якщо шийки колінчастого валу мають зношення, що перевищує останній ремонтний розмір, їх відновлюють до первинних параметрів за допомогою наплавлення під шаром флюсу. Після цього виконують нормалізацію, механічну обробку, зміцнення жолобників шляхом пластичної деформації, загартування високочастотними струмами, а завершальним етапом є шліфування та полірування поверхонь.

### 3 Дугове наплавлення.

Процеси відновлення сталевих колінчастих валів за допомогою наплавлення можна умовно розділити на дві основні групи: наплавлення з

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

подальшою термічною обробкою та наплавлення під шаром легованого флюсу без необхідності додаткової термообробки.

До першої категорії належить технологія, яка передбачає нанесення металу на шийки валу за допомогою дроту марки НП-30ХГСА під флюсом типу АН-15. Після наплавлення деталь піддається нормалізації, далі виконується токарна обробка, загартування шийок струмами високої частоти, фінішне шліфування та полірування. В результаті такого відновлення вдається досягти показників втомної міцності, що відповідають значенням для максимально зношених, але ще працездатних валів.

Другий підхід включає наплавлення циліндричної частини шийки із застосуванням дроту НП-30ХГСА та флюсів АН-348А (20%) і АНК-118 (80%). Перед початком процесу вал нагрівають до температури 200–220 °С, після чого проводять чорнове шліфування, формування жолобників і завершальну обробку для досягнення необхідних геометричних параметрів і якості поверхонь.

Фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона розроблено технологію багатоелектродного наплавлення колінчастих валів під флюсом, де формування металу здійснюється в окремих зварювальних ваннах. Під час одного обертання валу на поверхню шийки одночасно наноситься кілька паралельних валиків без перекриття. Їх кількість визначається довжиною шийки та обмежується можливостями обладнання за струмом.

Після первинного наплавлення проводять додатковий етап обробки, при якому включається другий механізм подачі, що дозволяє наплавити метал у проміжках між початковими валиками. Завдяки використанню електродного дроту з різним хімічним складом можна створити багат шарове покриття зі змінними властивостями. Наприклад, для поверхні шийок застосовують матеріали з підвищеною твердістю, а для жолобників підбирають електроди, що забезпечують підвищену пластичність металу.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

#### 4 Наплавлення під шаром флюсу.

Наплавлення під флюсом — це технологія, при якій зварювальна дуга між електродом і оброблюваною деталлю захищається шаром розплавленого флюсу. Товщина цього шару зазвичай становить від 20 до 40 мм. Сам флюс переходить у рідкий стан під впливом тепла, що виділяється в зоні дуги.

Попри ефективність такого способу, він має й певні обмеження. Одним із головних недоліків є висока вартість обладнання, яке значно перевищує вартість установок для ручного дугового наплавлення із застосуванням покритих електродів.

Ще одним мінусом є значна зона нагріву, що ускладнює використання цього методу для відновлення невеликих або складних за формою деталей. Крім того, наплавлення під флюсом може негативно впливати на втомну міцність відновленої деталі — у деяких випадках її зниження може досягати до 40%.

#### 5. Наплавлення вібродугове.

Цей метод відновлення чавунних колінчастих валів відзначається високою чутливістю до параметрів процесу та складу використовуваного електродного дроту. Найменші зміни у режимах наплавлення чи хімічному складі можуть суттєво вплинути на якість отриманого шару. Навіть при стабільних умовах наплавлення існує ризик утворення дефектів у вигляді тріщин і пор, які часто з'являються на поверхнях шийок, а їх кількість збільшується в глибших шарах.

Через таку схильність до появи дефектів, чавунні колінчасті вали після вібродугового наплавлення зазвичай шліфують лише до третього ремонтного розміру, після чого деталь підлягає вибраковці. Крім того, цей спосіб відновлення значно знижує втомну міцність виробу — у середньому на 35–40 %. З огляду на такі недоліки, вібродугове наплавлення практично не

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

застосовується для ремонту колінчастих валів автомобільних двигунів, оскільки не забезпечує достатнього рівня надійності.

#### б. Приварювання стрічки електроконтактне.

Дана технологія відновлення ґрунтується на точковому з'єднанні сталеві стрічки з поверхнею деталі шляхом впливу сильного імпульсу електричного струму. У місці контакту під дією струму відбувається локальне розплавлення як матеріалу стрічки, так і поверхні відновлюваної деталі.

Відновлювану деталь закріплюють у центрах або патроні, після чого зварювальна головка із притискними роликками, що працюють через пневматичні циліндри, щільно притискає стрічку до поверхні. Живлення струмом до роликів забезпечує трансформатор, а точну тривалість процесу регулює переривник струму, що задає необхідний робочий цикл.

У процесі електроконтактного приварювання сталеву стрічку закріплюють по всій площі зношеної поверхні або укладають по спіральній траєкторії під час обертання деталі. Частота імпульсів струму та швидкість обертання деталі взаємопов'язані зі швидкістю переміщення зварювальної головки вздовж поверхні.

Серед переваг цього способу варто виділити високу ефективність — його продуктивність приблизно у 2,5 раза перевищує вібродугове наплавлення. Завдяки мінімальному тепловому впливу (до 0,3 мм), обмеженій глибині зони впливу та низькій витраті матеріалу (у 4–5 разів меншій порівняно з вібродуговим методом) цей спосіб забезпечує якісне відновлення при зручних умовах роботи для оператора.

Водночас серед недоліків можна відзначити складність обладнання та обмеження по товщині нанесеного шару.

Основні експлуатаційні характеристики отриманого шару залежать від складу сталі стрічки. Для досягнення високої твердості зазвичай використовуються стрічки на основі хромистих або марганцевих сплавів.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Рекомендована товщина стрічки знаходиться в межах від 0,3 до 1,5 мм, а сила притискання роликів під час приварювання становить 1,3–1,6 кН.

#### 7. Напилення газополум'яне.

Цей метод відновлення деталей широко використовується для підвищення стійкості елементів машин до високих температур, зносу, корозії та ерозії. Однак у технології газополум'яного напилення є певні обмеження, які впливають на можливість його застосування [10, 4].

Одним із суттєвих нюансів є те, що при збільшенні товщини нанесеного шару понад 1 мм суттєво знижується міцність зчеплення покриття з основою. Тому цей спосіб найчастіше використовують для відновлення поверхонь із глибиною зносу до 0,8 мм.

Серед переваг газополум'яного напилення слід відзначити невеликий тепловий вплив на деталь, що дозволяє уникнути її деформації, змін структури основного металу та зниження показників втомної міцності. Цей метод є особливо ефективним при відновленні чавунних деталей, адже вони більш схильні до утворення тріщин при традиційному наплавленні.

Особливості структури покриттів, отриманих методом газополум'яного напилення, а також їхня пористість сприяють покращенню роботи вузлів, що працюють в умовах ковзання з мастилом. Для підвищення зносостійкості поверхонь застосовують різноманітні матеріали, зокрема вуглецеві та леговані сталі, молібден, сплави, що самофлюсуються (наприклад, типу «Колмоною»), а також оксидні сполуки алюмінію та хрому.

Максимальну зносостійкість при абразивному терті за низького тиску забезпечують покриття на основі карбіду вольфраму з кобальтом, які демонструють удвічі кращі характеристики, ніж покриття з діоксиду алюмінію чи оксиду титану.

Газополум'яне напилення широко використовується для зміцнення та відновлення різних деталей, таких як розподільні та колінчасті вали, вали насосів, поршні, поршневі кільця, циліндри та випускні клапани двигунів

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

внутрішнього згоряння. Цей метод ефективно застосовують для підвищення зносостійкості лопаток турбін, вентиляторів і димососів. Також напиленням обробляють шнеки живильників, робочі елементи ковшів, черпаків, матриць, пуансонів та інші частини прес-форм і штампів.

Однак серед недоліків цього способу можна виділити недостатньо високу адгезію покриття до основного матеріалу. Цю проблему вирішують шляхом використання технологій високошвидкісного нанесення, таких як детонаційне напилення, які дозволяють отримати покриття з покращеними показниками зчеплення.

#### 8. Напилення детонаційне.

Серед сучасних методів відновлення та зміцнення поверхонь колінчастих валів особливу увагу привертає технологія детонаційного напилення. Ця технологія була розроблена в 1950-х роках у США компанією Union Carbide і з того часу активно застосовується в різних галузях промисловості.

Детонаційне напилення дозволяє створювати покриття з високою щільністю, яка перевищує 98%, використовуючи композиційні порошкові матеріали. Завдяки своїм властивостям цей метод знайшов широке застосування в авіабудуванні, автомобільній сфері та інших секторах машинобудування [11].

Детонаційне напилення вирізняється імпульсним режимом роботи, що базується на використанні енергії газового вибуху для нагріву та прискорення частинок порошкового матеріалу. Завдяки поєднанню значної теплової енергії та сильного динамічного впливу, продукти детонації здатні розігрівати частинки до температур плавлення та надавати їм швидкість приблизно 1000 м/с. Покриття, отримані за цією технологією, характеризуються високою міцністю, що забезпечує провідну роль цього методу при виконанні найскладніших технічних задач.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Детонаційні покриття створюються за допомогою спеціальних установок, загальна схема яких представлена на рисунку 1.12. Такі установки зазвичай включають водоохолоджуваний ствол (1), змішувальну камеру (3), електричну свічку запалювання (2), пристрій для подачі порошку (4) та низку допоміжних компонентів.

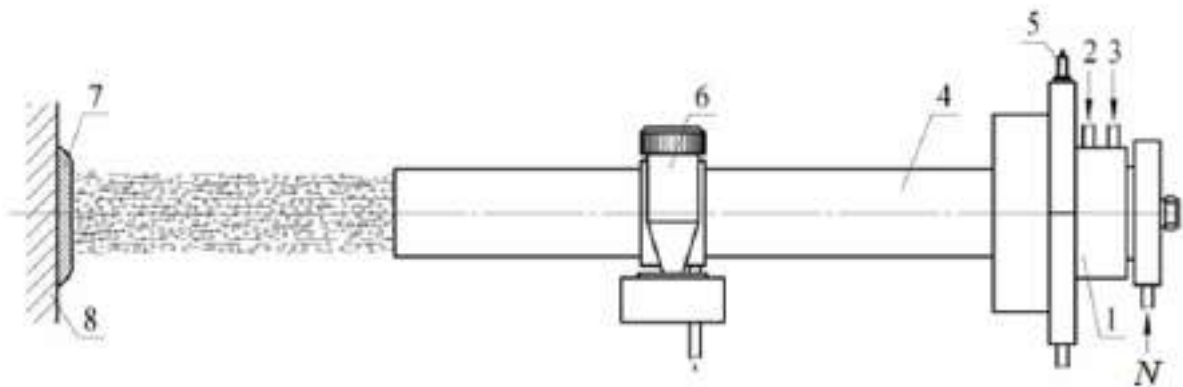


Рисунок 1.12 – Схема процесу напилення детонаційного.

Під час роботи установка функціонує таким чином: із газових балонів у змішувальну камеру (3) подається розрахована кількість окислювача та пального (наприклад, кисню й ацетилену), одночасно з порошкового живильника (4) надходить необхідна доза порошкового матеріалу. Газова суміш запалюється за допомогою електричної іскри, яку створює свічка (2). Полум'я швидко поширюється сумішшю газів, поступово переходячи в детонаційний режим. У цей момент утворюється детонаційна хвиля, що рухається стволом з постійною швидкістю, яка залежить від конструкції установки та складу газової суміші.

Вибух спричиняє значне підвищення тиску й виділення великої кількості теплової енергії, що забезпечує викид порошкового матеріалу в напрямку поверхні-основи (6), утворюючи окремий шар покриття (7). Після кожного імпульсу система очищується від залишкових продуктів горіння шляхом продувки азотом.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Коли детонаційна хвиля досягає відкритого кінця ствола, вона руйнується, оскільки може поширюватися лише в межах газової суміші, здатної підтримувати детонацію. Поза межами ствола рух ударної хвилі ще можливий, однак вже на відстані понад 100 мм її інтенсивність практично зникає.

Після виходу з каналу ствола продукти детонації формують надзвуковий потік. У цей момент температура та тиск у стволі поступово знижуються. Процес витікання триває до вирівнювання тиску на виході з атмосферним. Після цього відбувається зворотний рух повітря — спершу воно надходить у ствол уздовж його стінок, а згодом заповнює більшу частину внутрішнього об'єму.

У завершальній фазі процесу продукти детонації захоплюють частинки порошкового матеріалу, формуючи двофазний потік, до складу якого входять як газоподібні продукти вибуху, так і частинки, що напилюються. Такий потік характеризується неоднорідністю як уздовж довжини ствола, так і в його поперечному перерізі. Причиною цієї нерівномірності є нестабільність процесу викиду та різниця в фізико-хімічних властивостях і розмірах частинок порошку. Під дією високої температури та швидкості продуктів детонації частинки нагріваються і прискорюються, а в окремих випадках можуть частково розплавлятися або навіть випаровуватися.

Після виходу двофазного потоку зі ствола продукти детонації зазнають інтенсивного розширення, що супроводжується зниженням температури, швидкості та густини газів у міру віддалення від виходу, проте ці зміни відбуваються нерівномірно. У зоні поблизу поверхні деталі (підкладки) газовий потік сповільнюється та переходить у розтікання вздовж поверхні перешкоди. У цій області формується прикордонний шар, де частинки поступово втрачають швидкість, яка інколи може падати досить різко. Частина частинок, що не осіла на поверхню, підхоплюється газовим потоком, що огинає підкладку, і віддаляється разом із ним.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Під час нанесення покриттів із матеріалів з однорідним хімічним складом, таких як метали чи оксиди, шар може утворюватися як із повністю розплавлених частинок, так і з комбінації розплавленої та твердою фази. У випадку напилення композиційних матеріалів, наприклад твердого сплаву ВК, процес відбувається із суміші, де кобальт перебуває в розплавленому стані, а частинки карбиду вольфраму зберігають тверду форму.

Детонаційне напилення є складним процесом, що залежить від великої кількості технологічних параметрів. Серед основних варто виділити такі: відстань від точки подачі порошкового матеріалу до виходу зі ствола установки (глибина завантаження порошку); співвідношення між об'ємами пального, кисню та газу для розведення, що визначає склад вибухової суміші; загальна витрата газів у суміші, яка впливає на рівень заповнення об'єму ствола й змішувальної камери за один робочий цикл; товщину покриття, що наноситься за один імпульс; а також відстань від зрізу ствола до оброблюваної поверхні під час напилення (дистанція напилення).

Однією з характерних особливостей детонаційного напилення є висока концентрація частинок у момент формування покриття. Це сприяє посиленню ефекту ударного ущільнення, коли щільність уже сформованого шару зростає завдяки дії найбільших твердих частинок, що взаємодіють із покриттям. Завдяки високим швидкостям частинок під час зіткнення вивільняється значна кількість енергії, що призводить до підвищення температури як самих частинок, так і зони їх контакту з поверхнею. У результаті, окрім теплової активації, важливу роль у процесі формування покриття відіграє пластична деформація, яка відбувається під час удару частинок об підкладку. Проте основним фактором, що забезпечує утворення покриття, залишається тепла енергія, яка активує цей процес.

Детонаційне напилення вирізняється рядом значних переваг. Серед них варто відзначити низьку пористість отриманого покриття, яка трохи перевищує 1%, відсутність перегріву оброблюваної деталі під час процесу,

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

високу міцність зчеплення покриття з основою (понад 80 МПа), а також ефективне використання порошкового матеріалу.

Ця технологія підходить для нанесення покриттів із різних матеріалів, включаючи метали, сплави, оксиди, карбіди та інші композиції. Найкращі результати детонаційний спосіб забезпечує при нанесенні зносостійких покриттів на деталі невеликих розмірів, що потребують високої якості обробки.

					КВРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

## 2 ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ПІДГОТОВЧІ ОПЕРАЦІЇ

2.1 Оформлення та склад технологічної документації для відновлення машинних деталей.

При розробці технологічних процесів для відновлення деталей машин формується відповідний комплект конструкторсько-технологічної документації. До нього входять: ремонтне креслення, операційна карта, маршрутна карта, документ із описом процесу дефектації, а також ескізна карта.

Ремонтне креслення створюється, спираючись на робоче креслення деталі, вимоги до проведення дефектації, інформацію про оптимальні методи усунення пошкоджень і технічні умови, яким повинна відповідати відновлена деталь.

Операційна карта містить детальний опис етапів технологічного процесу, із зазначенням необхідного обладнання, інструментів, пристосувань, параметрів обробки, методів виконання, витрат матеріалів і трудових нормативів.

Документація з описом технології дефектації складається відповідно до стандарту Р50-60-88 «Правила оформлення документа на технологічний процес ремонту» і включає перелік можливих дефектів, методи їх усунення, засоби контролю, допустимі відхилення та граничні розміри, при яких ремонт не потрібен.

2.2 Матеріали для колінчастих валів.

У цій кваліфікаційній роботі в якості об'єкта для розробки технології відновлення розглядається колінчастий вал двигуна Євро-2 Mercedes OM442. Для його виготовлення використовується високоякісна сталь марки

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

42ХМФА, яка пройшла процес азотування [13]. Хімічний склад цієї сталі наведений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад 42ХМФА

C	Fe	S	Mn	P	Cr	Ni	V	Si	Cu
0.4-0.45	Залишок	0.007-0.025	0.5-0.8	$\leq 0.025$	1-1.3	$\leq 0.3$	0.08-0.12	0.17-0.37	$\leq 0.3$

Фізико-механічні характеристики 42ХМФА зазначені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Фізико-механічні властивості 42ХМФА

Параметр	Символ	Величина
Твердість за Брінелем, [МПа]	НВ	268
Межа міцності, [МПа]	$\sigma_B$	1031
Відносне подовження (при розриві), [%]	$\delta_s$	13,0
Межа пропорційності, [МПа]	$\sigma_T$	920
В'язкість ударна, [кДж/м <sup>2</sup> ]	КСУ	878
Звуження відносне, [%]	$\psi$	50,0

### 2.3 Порошковий матеріал.

Підбір порошкового матеріалу для відновлення виконується з урахуванням максимальної відповідності складу основного металу та напиленого покриття. Для ремонту зношених поверхонь корінних і шатунних шийок методом детонаційного напилення доцільно застосовувати самофлюсуючий порошок на основі Ni-Cr-B-Si, наприклад, марки ПР-

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

H65X25C3P3 [13]. Характеристики та склад цього порошку наведені в таблиці 2.3.

Крім того, рекомендується використовувати порошок фракції з розміром частинок у межах від 15 до 50 мкм сферичної форми, що оптимально підходить для високошвидкісних методів напилення [13].

Таблиця 2.3 – Склад хімічний порошку ПР-Н65Х25С3Р3

Марка	склад, у %						
	Cr	Ni	Fe	B	Mo	Cu	Si
ПР- H65X25C3P3	26,0	залишок	$\geq 5,0$	3,0	0	1,5	2,3

Щоб отримати порошок із потрібним розміром частинок, його просіюють через сита з відповідними отворами, які забезпечують необхідну фракцію. Перед використанням порошковий матеріал піддають сушінню на спеціальних деках при температурі 150–200 °С протягом 2–3 годин. У процесі сушіння рекомендується регулярно перемішувати порошок для рівномірної обробки.

Сплави на основі Ni-Cr-B-Si відрізняються порівняно низькою температурою плавлення, що коливається в межах 1030–1150 °С, що дає можливість проводити їх оплавлення. Завдяки цьому покриття набуває підвищеної міцності зчеплення з поверхнею деталі та характеризується зниженим коефіцієнтом тертя. Самофлюсуючі властивості забезпечуються присутністю кремнію та бору. Під час нагрівання ці елементи формують тонкий шар боросилікатів, який покриває деталь разом із сплавом і виконує функцію відновлювального середовища.

					КВРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

## 2.4 Установа детонаційна.

Для нанесення покриттів на зношені поверхні шийок колінчастого вала застосовується детонаційна установка, зображена на рисунку 2.1. Комплекс CCDS2000 включає в себе гармату, комп'ютеризовану систему управління, автономну систему охолодження, а також допоміжне обладнання. Такий комплекс призначений для формування зносостійких, термостійких, антикорозійних та інших захисних покриттів на деталях машин і механізмів [14].

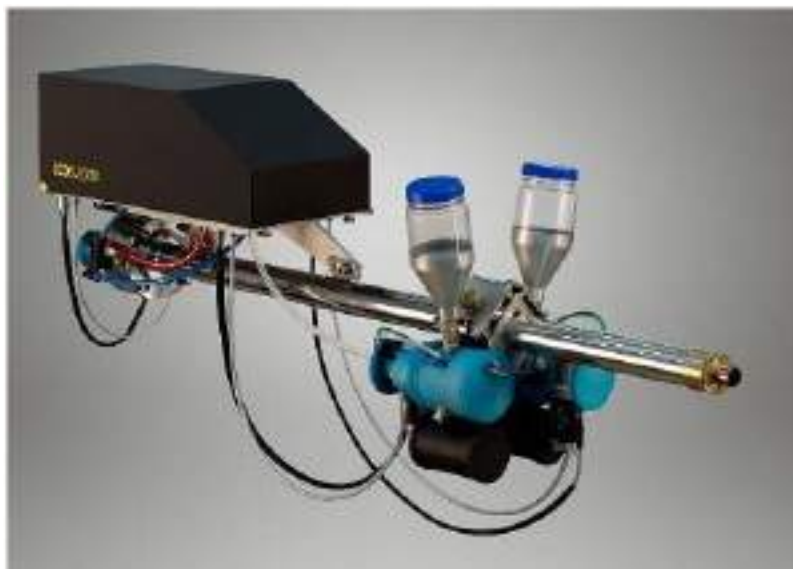


Рисунок 2.1 – Гармата комплексу «CCDS2000».

Завдяки малій вазі гармати (менше 20 кг), її можливо встановлювати як на спеціалізовані роботи-маніпулятори, так і на стандартні промислові роботи (рисунок 2.2). Серед особливостей комплексу «CCDS2000» можна виділити високоточну багатоканальну систему подачі газів, контрольовану локальну подачу порошку та автоматизоване управління як гарматою, так і маніпулятором. Установка здатна працювати на різних видах газового палива, включно з можливістю застосування режиму SuperD-Gun із використанням бінарного палива.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39



а)



б)

Рисунок 2.2 – Комбінації монтажу гармати для комплексу «CCDS2000»:  
а) на спеціалізованому тривісному роботі-маніпуляторі; б) на стандартному промисловому роботі.

Технічні параметри детонаційної установки, яка використовується в роботі, наведено в таблиці 2.4 [14].

Таблиця 2.4 – Технічні параметри детонаційної установки.

Параметр установки	Розмірність	Величина
Продуктивність	кг/год	до 2
Швидкість частинок порошку	м/с	1500
Товщина покриття за 1 постріл	мкм	до 20
Швидкострільність	пострілів за секунду	6...20
Коефіцієнт використання порошку	%	до 75
Адгезія	МПа	до 150
Електрична потужність	кВт	1

Паливо – ацетилен, пропан, бутан та ін. Окислювач – кисень.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Рух деталі та переміщення ствола гармати відбуваються синхронно, з автоматичним налаштуванням за допомогою керуючої електронно-обчислювальної машини. Всі основні компоненти комплексу, такі як детонаційна гармата, маніпулятор і обертач, розміщені в шумоізольованій камері, тоді як газові балони та система управління знаходяться окремо від основної робочої зони.

Детонаційні покриття характеризуються високою щільністю та міцністю зчеплення, яка наближається до показників суцільного матеріалу. Завдяки імпульсному тепловому впливу в процесі детонаційного напилення вдається уникнути перегріву, деформацій та небажаних змін структури основного металу. Товщина таких покриттів може варіюватися від кількох мікрометрів до декількох міліметрів.

Відпрацьовано оптимальні режими нанесення для широкого спектра порошкових матеріалів, серед яких:

- метали: алюміній, мідь, нікель, хром, кобальт, молібден, залізо тощо;
- оксиди: алюмінію, хрому, цирконію, титану та інші;
- сплави: сталі, чавун, ніхром, бронза, латунь, самофлюсуючі сплави тощо;
- металокерамічні композиції з карбідами вольфраму, хрому, титану тощо.

Використання двох порошкових дозаторів у системі «CCDS2000» дозволяє автоматично створювати багат шарові композиційні покриття (рис. 2.3), а також сумішові шари зі встановленим програмним шляхом співвідношенням компонентів.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

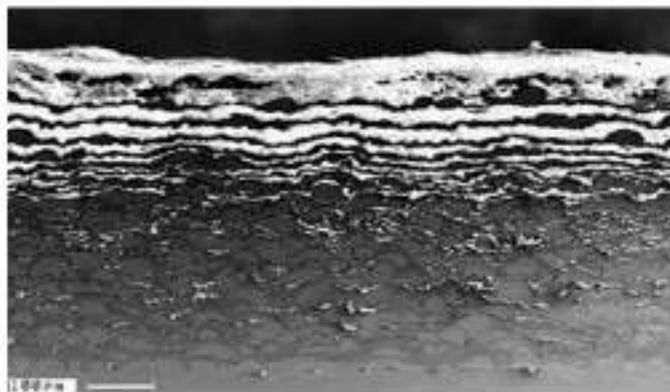


Рисунок 2.3 – Покриття багат шарове

### 2.5 Обробка струменево-абразивна.

Одним із найбільш ефективних та поширених методів підготовки металевих поверхонь перед нанесенням газотермічних покриттів є струменево-абразивна обробка [4]. Цей спосіб використовується для активації поверхні та створення необхідної шорсткості, що забезпечує якісне зчеплення покриття з основою.

Параметри шорсткості після такої обробки залежать як від властивостей матеріалу деталі, так і від запланованої товщини нанесеного шару. Значення міцності зчеплення покриттів для різних методів підготовки поверхні наведено в таблиці 2.5 [11].

Обробка здійснюється на абразивно-пневматичній установці, яка включає кілька ключових компонентів: струминний апарат, систему збору, очищення та повторної подачі абразивного матеріалу, блок підготовки стисненого повітря (з функціями регулювання тиску, осушення та фільтрації від мастила), а також обладнання для механізованої подачі та фіксації деталей у необхідному положенні під час роботи. Робота струминного апарату ґрунтується на використанні енергії стисненого повітря для надання абразивним частинкам високої швидкості, що забезпечує ефективну обробку поверхні.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.5 – Показники міцності зчеплення покриттів залежно від способу підготовки поверхні, МПа [11].

Матеріал основи	Спосіб підготовки поверхні			
	Обробка корундом	Електроіскрова обробка	Обробка кремнеземом	Утворення різьблення
Сталь 0,8%	34	20	14	37
Цинк	12	13	10	16
Сталь 0,1%	38	22	10	50
Алюміній	17	21	13	26
Бронза	40	21	17	43
Латунь	17	24	6	30
Мідь	25	20	13	24

Серед найбільш затребуваних рішень для струминно-абразивної обробки компанії «SANT-TECH» варто відзначити піскоструминні, абразивоструминні установки, а також дробометні системи серії РЕКО, які активно застосовуються для очищення поверхонь.

Конструкція обладнання виконана повністю з використанням зварювальних технологій та має захисне покриття, нанесене методом порошкового фарбування. Всі вузли оснащені перевіреними компонентами, які гарантують тривалий термін служби та стабільну роботу без перебоїв.

Установки для струминно-абразивної обробки серії РЕКО випускаються у двох моделях — РЕКО 100 та РЕКО 140 (див. рис. 2.4), з можливістю оснащення інжекторною або напірною системами подачі абразиву.

До стандартної комплектації піскоструминних (абразивоструминних) машин серії РЕКО входять:

- промислові сопла, виготовлені з карбїду вольфраму, що забезпечують тривалий ресурс роботи;
- система регулювання тиску, яка дозволяє значно підвищити енергію абразивного потоку, що збільшує продуктивність процесу обробки майже у чотири рази;
- редукційний клапан з великим манометром для точного контролю параметрів обробки;
- зручна ножна педаль дистанційного керування для полегшення роботи оператора;
- захисні рукавиці підвищеної міцності з покриттям із ПВХ і внутрішньою бавовняною підкладкою, виготовлені відповідно до вимог директиви ЄС 89/686/ЄЕС;
- проста та швидка система заміни рукавиць;
- ефективна система циркуляції повітря;
- надійний абразивний пістолет типу BNP;
- яскраве люмінесцентне освітлення камери для поліпшення видимості в процесі роботи;
- оглядове вікно зі збільшеною зоною огляду без мертвих зон;
- шланги для піскоструминної обробки, призначені для роботи в інжекторних системах;
- подвійна система закриття дверей забезпечує герметичність робочої камери та захист від витоку абразиву.
- посилені шланги для дробоструминного очищення, стійкі до механічних пошкоджень;

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44



Рисунок 2.4 – Установка СА моделі РЕКО 140.

Під час взаємодії абразивних частинок із поверхнею деталі кожне зерно виконує різну роботу. Одні абразивні зерна вриваються в метал та формують стружку, інші — за рахунок меншої глибини вривання, ніж радіус закруглення ріжучої кромки, здійснюють лише подряпини без зняття матеріалу. Ще частина зерен, потрапляючи на поверхню, спричиняє переміщення металу вбік, ніби видавлюючи його.

У результаті такої дії формується новий мікрорельєф із шаром, що зазнав пластичної деформації. Через вплив пружних і пластичних деформацій, накопичення дефектів, руйнування окремих мікрооб'ємів та утворення залишкових напружень змінюються фізико-механічні характеристики обробленого шару. Водночас спостерігаються зміни у мікроструктурі матеріалу, а також підвищення температури в зоні контакту. Нагрівання сприяє взаємодії між абразивом і металом на молекулярному рівні, що може призводити до прилипання частинок абразиву до поверхні.

Під час струминно-абразивної обробки поверхонь металів можливе виникнення наклепу, що супроводжується зміцненням верхнього шару.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Дані про режими роботи при обробці порошком електрокорунду наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Режими СА обробки

Параметр	Розмірність	Величина
Кут атаки струменя абразиву	град	90
Тиск повітря стисненого	МПа	0,50
Число проходів	штук	2
Зернистість матеріалу абразивного	№	100...125
Відстань від поверхні до зрізу сопла	мм	150
Матеріал абразиву	-	Електрокорунд
Витрата абразиву	кг/год	3

До основних недоліків струминно-абразивної обробки належать такі явища: зниження активності обробленої поверхні через поглинання атмосферних газів і подальше окиснення, проникнення абразивних частинок у поверхневий шар матеріалу, а також невисока зносостійкість самих абразивних зерен. У момент зіткнення абразиву з поверхнею утворюється безліч мікротріщин у верхніх шарах основного матеріалу, які можуть стати осередками концентрації напружень.

Після завершення обробки необхідно провести перевірку якості поверхні, щоб упевнитися в рівномірності отриманої шорсткості.

На рисунку 2.5 наведено тривимірну модель поверхні, яка пройшла обробку струминно-абразивним методом.

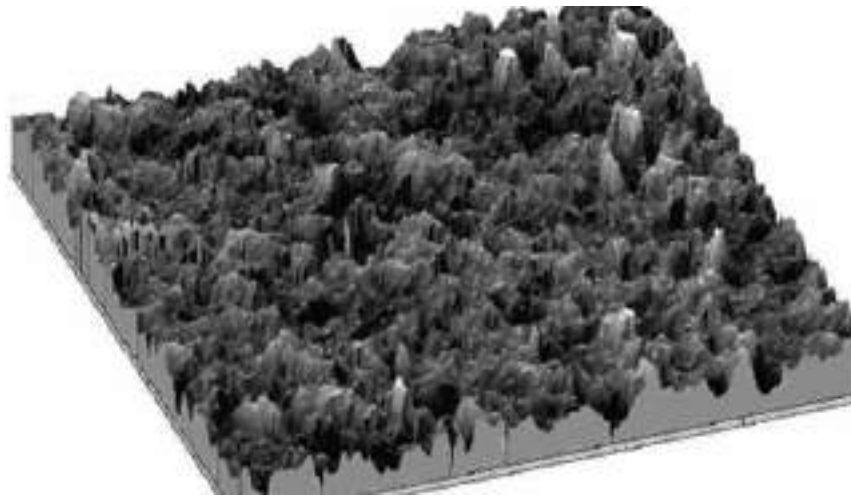


Рисунок 2.5 – Вигляд поверхні після СА обробки.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВІДНОВЛЕННЯ ВАЛУ

#### 3.1 Розробка маршруту технологічного відновлення.

Процес ремонту складається з послідовності технологічних операцій, мета яких — повернення деталі до працездатного стану згідно із затвердженим маршрутом виконання робіт.

У процесі розробки технологічної схеми відновлення зношених ділянок колінчастого валу методом газотермічного напилення важливо забезпечити точну відповідність усім етапам технологічного циклу. Це стосується як параметрів самого напилення, так і підготовчих процедур, вибору обладнання та витратних матеріалів. Недотримання встановленої послідовності або порушення якості виконання окремих операцій може призвести до дефектів виробу.

Технологічний маршрут відновлення колінчастого валу восьмициліндрового двигуна марки Mercedes OM442 із застосуванням газотермічного напилення наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технологічний маршрут відновлення колінчастого валу.

№ Операції	Назва та зміст операції	Назва обладнання	Засоби ТО
05	Очищення. (Встановлення валу у кошик для миття. Виконання автоматичного миття. Виймання валу із кошика.)	Машина мийна «АМ 900AV»	Засіб очищувальний: «МЗ-6»

										Арк.
										48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						



## Продовження таблиці 3.1.

35	Газотермічна (Встановлення валу, вивірення, закріплення. Нанесення покриття на шийки. Демонтаж валу)	Установка детонаційна	Порошок для напилення
40	Термообробка (Встановлення валу на піддон. Оплавлення покриття. Демонтаж валу)	Електропіч	-
45	Контрольна (Контроль товщини покриття)	Верстак	СЕМ товщиномір «DT-156»
50	Шліфувальна (Встановлення валу, вивірка, закріплення; шліфування шийки валу; демонтаж валу)	Шліфувальний верстат для колінчастих валів «ЗД4230»	Шліфувальне коло; стійка разом з індикатором.
55	Контрольна (Контроль товщини покриття, шорсткості поверхонь, діаметрів шийок, технічних вимог відповідно ремонтним кресленням)	Верстак	Центри; призми; СЕМ товщиномір «DT-156»; індикаторна стійка; мікрометр «МК 75- 100»; індикатор годинникового типу
60	Консервація (нанесення тонкого шару мастила; обгортання папером)	Верстак	Обгортковий папір; мастило індустріальне 20

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Далі здійснюється докладне опрацювання кожної технологічної операції [16].

#### Операція 05 – Очищення.

На цьому етапі проводиться видалення масляних залишків та інших забруднень, які накопичилися на поверхні колінчастого валу в процесі роботи двигуна. Для виконання цієї операції застосовується мийна установка моделі «AM900AV».

Ця автоматизована машина функціонує за принципом замкнутого циклу очищення та оснащена керуючою панеллю для встановлення параметрів, таких як температура та тривалість мийного процесу. Обертання кошика із деталями зі швидкістю 5–10 обертів за хвилину дозволяє рівномірно обробляти всю поверхню виробу, забезпечуючи високий рівень чистоти. Конструкція системи передбачає «П» - подібну форму рамп, завдяки чому мийний розчин подається одночасно зверху, знизу та з боків, що сприяє якісному очищенню.

Для заповнення бака використовується звичайна вода з водопроводу. Завдяки рівномірному обертанню кошика та оптимальному розподілу мийної рідини, досягається ефективне очищення поверхонь деталей.

Основні технічні параметри установки «AM900AV» наведено в таблиці 3.2.

Відповідно до рекомендацій [16], для проведення цієї операції обирають мийний засіб марки «МЗ-6», який призначений для очищення та знежирення металевих деталей. Параметри виконання мийного процесу наведено в таблиці 3.3.

#### Операція 10 – Дефектація.

На цьому етапі здійснюється перевірка стану колінчастих валів із подальшим їх розподілом на три категорії:

- деталі, що не потребують ремонту та можуть бути повторно використані;

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

- вали, які підлягають ремонту;
- деталі, що не підлягають відновленню та здаються на металобрухт.

Вали, що не мають пошкоджень і не потребують ремонту, відправляються на складування в зону зберігання придатних деталей. Непридатні вали утилізуються шляхом здачі в металобрухт. Ті ж деталі, які мають зношення, направляються до ремонтної дільниці для відновлення.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики «AM900AV».

Найменування	Розмірність	Величина
Потужність елементів нагрівальних	кВт	3,15
Діаметр кошика	мм	900 мм
Потужність насосу	кВт	0,6
Вантажопідйомність кошика	кг	150 кг
Максимальна температура розчину	°С	90
Висота простору робочого	мм	500 мм
Продуктивність насосу	л/хв	60
Об'єм баку розчину миючого	л	80 л
Тиск у насосі	бар	2-3
Загальна вага	кг	100

Основним критерієм для оцінки зносу є діаметр корінних і шатунних шийок. Для шатунних шийок цей показник становить 79,6 мм, а для корінних — 94,6 мм. Якщо виміряні значення менші за вказані, то вали направляють на процедуру відновлення.

У межах цієї випускної кваліфікаційної роботи для подальших розрахунків і створення технологічного процесу відновлення шийок колінчастого валу прийнято наступні значення діаметрів: для корінних шийок — 94,5 мм, для шатунних шийок — 79,5 мм.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Таблиця 3.3 – Режими операції мийної.

Найменування	Розмірність	Величина
Температура розчину мийного	°С	60
Частота обертання кошику	об/хв	10
Тривалість миття	хв	25

Під час проведення дефектації виявляють наступні види пошкоджень:

- знос робочих поверхонь, що проявляється у зміні розмірів, порушенні геометрії, появі подряпин і рисок;
- залишкові деформації, які можуть виражатися у вигляді вигину, скручування або короблення деталі;
- наявність тріщин, обломів, пробоїн та зон викришування матеріалу;
- зміни фізичних і механічних властивостей поверхневого шару або всієї деталі внаслідок впливу підвищених температур.

Діагностика дефектів виконується декількома способами:

1. Проведенням візуального огляду;
2. Використанням спеціального вимірювального інструменту, приладів та стендів.

Під час зовнішнього огляду можна виявити більшість очевидних пошкоджень, таких як пробоїни, тріщини, обломи, деформації у вигляді вигинів або скручування, корозійні ураження, пошкоджені різьбові з'єднання та інші дефекти.

Що стосується прихованих пошкоджень, до яких відносяться дрібні тріщини, раковини та внутрішні порожнини, їх виявляють за допомогою фізичних методів контролю. Одним із найбільш ефективних є ультразвукова діагностика.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Суть ультразвукового методу полягає в здатності ультразвукових хвиль відбиватися від меж різних середовищ, наприклад, між суцільною металевою структурою і дефектною порожниною. Відбиті сигнали фіксуються на екрані приладу, що дозволяє визначити розташування та розміри виявленого дефекту.

У межах цієї кваліфікаційної роботи для виявлення внутрішніх дефектів застосовується ультразвуковий дефектоскоп марки «УЗД-7Н».

Операція 15 – Шліфування.

Ця операція виконується на спеціалізованому обладнанні — верстаті моделі «ЗД4230», який призначений для обробки шийок колінчастих валів. Технічні параметри цього верстата наведені в таблиці 3.4.

Перед проведенням відновлювальних процедур деталі проходять підготовчу механічну обробку. На цьому етапі здійснюється чорнова обдирка, метою якої є усунення дефектів у вигляді тріщин, раковин та пор, а також відновлення правильної геометрії зношених зон [21].

Розрахунок параметрів режимів різання при шліфуванні здійснюється відповідно до рекомендацій, наведених у джерелі [10].

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики «ЗД4230».

Параметр	Розмір ність	Характер истика
Висота центрів	мм	300
Клас точності	-	В/А
Максимальний діаметр встановлюваного виробу	мм	580
Точність обробки (конусність)	мкм	2,5
Максимальна довжина виробу в центрах	мм	1600
Максимальний діаметр шліфування в люнеті	мм	200, 130

## Закінчення таблиці 3.4

Максимальна довжина виробу в патроні	мм	1450
Максимальна довжина шліфування	мм	1600
Максимальний діаметр шліфування без лонету	мм	200
Максимальний радіус кривошипу	мм	110
Мінімальний діаметр шліфування в лонеті	мм	25
Частота обертання шпинделя шліфувальної бабки	об/хв	740
Максимальна вага виробу	кг	160
Діаметр шліфувального круга - найбільший / найменший	мм	900/750
Максимальне переміщення шліфувальної бабки	мм	175
Посадковий діаметр шліфувального кола	мм	305
Частота обертання виробу (при частоті струму 50 Гц)	об/хв	85; 174; 30; 60;
Максимальна висота кола	мм	63
Кількість швидкостей обертання виробу	штук	4
Окружна швидкість шліфувального кола	м/с	35
Сумарна потужність електродвигунів	кВт	14,63
Електродвигун шпинделя шліфувальної бабки М1	кВт	11,0
Точність обробки - овальність	мкм	2,5
Маса верстата з електрообладнанням та охолодженням	кг	7500
Кількість електродвигунів на верстаті	штук	7
Габаритні розміри верстата (довжина x ширина x висота)	мм	5600x260 0x1900

Виконаємо розрахунок параметрів шліфування шатунної шийки з діаметром 79<sub>-0,1</sub> мм.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

- 1) Приймаємо припуск на сторону, який становить  $h = 0,25$  мм.
- 2) Швидкість обертання шліфувального круга згідно з рекомендаціями становить  $V_k = 30\text{--}35$  м/с, для розрахунків беремо  $V_k = 30$  м/с.
- 3) Швидкість обертання заготовки встановлюємо на рівні  $V_z = 30$  м/хв.
- 4) Глибина різку під час шліфування приймається рівною  $t = 0,25$  мм.
- 5) Поздовжню подачу розраховуємо за формулою:

$$S = (0,4..0,7)V, \quad (3.1)$$

де  $V$  – ширина шліфувального круга, мм. Припустимо, що  $V = 30$  мм, тоді:  $S = 0,5 \cdot 30 = 15$  мм/об.

6) Частоту обертання заготовки встановлюємо з урахуванням технічних характеристик верстата. Приймаємо  $n_v = 100$  об/хв.

7) Визначаємо фактичну швидкість різання у процесі роботи (значення розраховується за відповідною формулою ).

$$V_D = \frac{3,14 \cdot 94 \cdot 100}{1000} = 30 \text{ м/хв.}$$

8) Потужність, необхідну для здійснення різання, обчислюємо за формулою:

$$N = C_N V_3^R t^X S^Y d, \quad (3.2)$$

де  $C_N = 1,3$ ;  $R = 0,75$ ;  $X = 0,85$ ;  $Y = 0,7$  показники та коефіцієнти.

$$N = 1,3 \cdot 210,75 \cdot 0,020,85 \cdot 150,7 \cdot 94 = 2,85 \text{ кВт.}$$

9) Далі перевіряємо, чи вистачає потужності приводу верстата для виконання цієї операції:

$$N_{шп} = 11,0 \cdot 0,85 = 9,35 \text{ кВт. } 2,85 < 9,35.$$

Оскільки  $2,85 < 9,35$ , привід верстата забезпечує необхідну потужність.

10) Розрахунок основного часу обробки проводиться за відповідною формулою:

					КВРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

$$T_0 = \frac{(L_0 + B + L_p)hk_T}{Snt}, \quad (3.3)$$

Де L — довжина ділянки, яка підлягає обробці, та становить 36,2 мм, а коефіцієнт точності приймається в межах 1,2–1,5, для розрахунків обираємо значення 1,3.

$$T_0 = \frac{(67 + 30 + 6)0,25 \cdot 1,3}{15 \cdot 100 \cdot 0,025} = 0,9 \text{ хв.}$$

Загальний основний час шліфування чотирьох шатунних шийок дорівнює 3,6 хв.

Розрахунок параметрів шліфування для корінної шийки діаметром 94–0,1 мм виконується за аналогічною методикою, наведеною вище, а отримані дані узагальнено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Режими різання при шліфуванні однієї корінної шийки.

Зміст	V, м/хв	S, мм/хв	t, мм	n, об/хв	T <sub>0</sub> , хв
Шліфування корінної шийки розміром 94-0,1 мм	30	15	0,25	100	1,1

Основний час для обробки п'яти корінних шийок складає 5,5 хвилин.

У підсумку сумарний основний час для шліфування всіх шийок колінчастого валу становить 9,1 хвилин.

Операція 20 – Слюсарні роботи.

Цей етап передбачає встановлення металевих захисних екранів на ті частини поверхні, які не підлягають газотермічному напиленню. Це

необхідно для запобігання їх пошкодженню під час обробки газовим потоком.

Додатково проводиться підготовка порошкового матеріалу та газів до напилення. Порошок просівають через сито з отворами, розмір яких забезпечує відбір часток діаметром від 15 до 50 мкм. Далі матеріал піддають сушінню в спеціальному деку при температурі 150–200 °С протягом 2–3 годин. У процесі сушіння порошок необхідно періодично перемішувати для рівномірного прогріву та запобігання злипанню частинок.

Газова суміш перед напилюванням проходить перевірку для підтвердження її відповідності встановленим вимогам до складу.

#### Операція 25 – Струменево-абразивна обробка.

Перед початком струменево-абразивної обробки поверхню шийок необхідно ретельно знежирити за допомогою уайт-спіриту. Далі виконується обробка абразивним струменем відповідно до встановлених параметрів, що дозволяють отримати необхідну шорсткість поверхні на рівні Rz 40 мкм. Напилення покриття повинно бути розпочате не пізніше ніж через 60 хвилин після завершення цієї операції, щоб уникнути повторного забруднення або окиснення поверхні.

#### Операція 30 – Контрольні вимірювання.

На цьому етапі здійснюється перевірка розмірів шатунних і корінних шийок. Для шатунних шийок встановлено максимально допустимий діаметр  $79+0,1$  мм, а для корінних —  $94+0,1$  мм. Під час проведення вимірювань необхідно уникати контакту з обробленими поверхнями, щоб не допустити їх забруднення чи пошкодження. Після завершення вимірювань виконується повторне знежирення шийок шляхом поливу.

#### Операція 35 – Напилення покриття.

Колінчастий вал встановлюють і надійно закріплюють у спеціальному пристрої установки для напилення. Стовбур детонаційної гармати розміщують на відстані 100 мм від поверхні першої шийки, що підлягає

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

обробці, при цьому кут між поверхнею та напрямком напилення має становити  $90^\circ$ . Осі стовбура гармати та шийки повинні перетинатися, що забезпечує правильність розташування обладнання під час роботи.

Товщину шару напиленого покриття визначають з урахуванням ступеня зносу деталі та передбаченого припуску на подальшу механічну обробку.

$$\delta_n = \delta_z + \delta_o, \quad (3.4)$$

Де  $\delta_z$  — розмір зносу, мм;  $\delta_o$  — величина припуску на подальшу механічну обробку, мм.

Оцінюючи технічний стан корінних і шатунних шийок, орієнтуються на граничні значення діаметрів: для шатунних шийок — 79,6 мм, для корінних — 94,6 мм. Якщо фактичний розмір менший за ці значення, колінчастий вал підлягає відновленню.

У цій роботі розглядається ситуація з максимальним рівнем зношення, коли фактичні діаметри виявляються нижчими від допустимих розмірів останнього ремонтного допуску. Тому для розрахунків технологічного часу беруть такі діаметри зношених шийок:

- для корінних — 94,5 мм,
- для шатунних — 79,5 мм.

Після попередньої шліфовки діаметри зменшують до 94,0 мм для корінних та 79,0 мм для шатунних шийок. Величина зносу при цьому становить  $\delta_z = 0,5$  мм.

На наступну механічну обробку закладається припуск у розмірі  $\delta_o = 0,5$  мм. Таким чином, загальна товщина шару, який потрібно напилити, дорівнює:  $\delta_n = 0,5 + 0,5 = 1$  мм.

Відповідно, необхідно виконати напилення покриття товщиною 1 мм на поверхню шийок колінчастого валу.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Розрахунок кількості проходів (обертів шийки), необхідних для нанесення покриття заданої товщини, виконується за формулою, наведеною у джерелі [10].

$$X = \frac{P_H - P_F + 2Z}{h}, \quad (3.5)$$

Де:  $P_N$  — номінальний діаметр колінчастого валу, мм;  $P_F$  — фактичний діаметр після обробки, мм;  $h$  — товщина шару, що наноситься за один оберт валу, мм ( $h = 0,020$  мм);  $Z$  — припуск на шліфування, мм.

Вибір припуску на шліфування має важливе значення, оскільки нанесений шар відрізняється високою твердістю і зносостійкістю, що ускладнює обробку. У даному випадку встановлюється оптимальне значення припуску — 0,5 мм.

Кількість проходів (обертів валу) для напилення шару необхідної товщини розраховується за відповідною формулою.

Для корінної шийки приймаються такі параметри:

$$P_N = 91,0 \text{ мм}, P_F = 89,0 \text{ мм}, X = \frac{91 - 89 + 2 \cdot 0,05}{0,02} = 105,$$

кількість проходів — 105.

Для шатунної шийки:

$$P_N = \underline{81,0 \text{ мм}}, P_F = 79,0 \text{ мм}, X = \frac{81 - 79 + 2 \cdot 0,05}{0,02} = 105,$$

кількість проходів також приймається рівною 105.

Операція 40 – Термічна обробка.

					КВРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Для проведення оплавлення нанесеного покриття колінчастий вал встановлюють у спеціальну відпускну піч. Процес виконується при температурі 300 °С з витримкою протягом 60 хвилин. Для цієї операції використовується піч, зазначена у джерелі [10], із розмірами піддону 600x1000x500 мм, що призначена для термічної обробки металевих деталей.

Операція 45 – Контроль якості.

Після термообробки проводиться перевірка стану покриття. Візуально оглядають поверхню на предмет наявності дефектів, таких як тріщини, відшарування або нерівності. Для визначення товщини нанесеного шару використовується товщиномір моделі «СЕМ ДТ-156».

Операція 50 – Фінішне шліфування.

Завершальна обробка проводиться на шліфувальному верстаті моделі 3Д4230, призначеному для обробки шийок колінчастих валів. Під час цієї операції виконується остаточне шліфування корінних і шатунних шийок колінчастого валу двигуна, при цьому забезпечуються номінальні розміри:

- для шатунних шийок — 80-0,013 мм,
- для корінних шийок — 95-0,015 мм.

При цьому дотримуються всіх технічних вимог, зазначених у ремонтному кресленні. Розрахунок параметрів режимів різання виконується відповідно до рекомендацій із джерела [10]. Підсумкові дані розрахунків наведено у таблиці 3.6.

Загальна тривалість основного часу, необхідного для шліфування всіх шийок колінчастого валу, становить 13,2 хвилини.

Операція 60 – Заключний контроль.

На цьому етапі проводиться перевірка відповідності покриття встановленим вимогам. Оцінюється товщина шару, шорсткість поверхонь шийок, а також відхилення розмірів у межах допусків, зазначених у ремонтному кресленні. Поверхня повинна бути рівномірною, без дефектів у

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вигляді тріщин, здуттів, відшарувань чи включень нерозплавленого металу. Шорсткість покриття допускається в межах 80–100 мкм.

Окремо перевіряється адгезія покриття до металу основи. Для цього використовується метод нанесення сітки подряпин, при якому не допускається відшарування або відрив частин покриття.

Таблиця 3.6 – Режими різання під час обробки однієї шийки

Зміст переходу	t, мм	S, мм/хв	n, об/хв	V, м/хв	T <sub>0</sub> , хв
Шліфування шатунної шийки діаметром 80 <sub>-0,013</sub> мм	0,5	15	100	30	1,8
Шліфування корінної шийки діаметром 94 <sub>-0,1</sub> мм	0,5	15	100	30	1,2

#### Операція 65 – Консервація.

Щоб захистити колінчастий вал від утворення корозії під час зберігання, на його внутрішні та зовнішні поверхні наносять захисний шар спеціального складу. Для цієї мети використовується індустріальне масло марки I-20, яке створює на поверхні тонку антикорозійну плівку, що запобігає контакту металу з вологою та іншими агресивними середовищами.

### 3.2 Розрахунок норм часу для технологічного процесу.

Розрахунок норм часу для технологічного процесу здійснюється з урахуванням параметрів режимів обробки та встановлених нормативів тривалості для кожного виду робіт. Визначення основного та допоміжного часу ґрунтується на відповідних нормативних документах, а також на рекомендованих значеннях тривалості для окремих операцій у межах технологічного процесу.

									КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						62

1. Розрахунок часу, необхідного для проведення газополум'яного напилення:

$$t = \frac{b\pi D}{v} n_{pr}, \quad (3.6)$$

$$v = \frac{\pi D n}{1000}, \text{ м/хв}, \quad (3.7)$$

Час напилення визначається за формулою, в якій враховуються такі параметри: ширина шийки колінчастого валу, мм; діаметр шийки, що підлягає обробці, мм; кількість проходів (обертів); швидкість нанесення покриття, мм/хв.

Також у розрахунку використовується значення частоти обертання шпинделя установки, що дорівнює 100 об/хв.

Розраховані швидкості напилення складають:

- для шатунних шийок:

$$v = \frac{3,14 \cdot 80 \cdot 100}{1000} = 25 \text{ м/хв.};$$

- для корінних шийок:

$$v = \frac{3,14 \cdot 95 \cdot 100}{1000} = 30 \text{ м/хв.}$$

Для напилення шатунної шийки приймаються такі параметри:

- ширина шийки  $B = 80$  мм,

- діаметр оброблюваної шийки  $D = 67$  мм.

$$t_n = \frac{D \cdot \pi \cdot b}{V} X, \quad (3.8)$$

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відповідно:

$$t_h = \frac{80 \cdot 3,14 \cdot 67}{25 \cdot 10^3} = 1,7 \text{ хв.}$$

Для корінної шийки параметри складають:

- діаметр  $D = 95$  мм,
- ширина обробки  $B = 36,2$  мм.

$$t_h = \frac{95 \cdot 3,14 \cdot 36,2}{25 \cdot 10^3} = 1,1 \text{ хв.}$$

Час, необхідний для виконання напилення, розраховується таким чином:

$$T_0 = (1,7 \times 4) + (1,1 \times 5) = 12,3 \text{ хв.}$$

Для визначення допоміжного часу при наплавленні враховуються такі витрати часу:

- встановлення та зняття деталі у центрувальному пристрої — 3,6 хв,
- додаткові маніпуляції із закріпленням деталі — 0,35 хв,
- витрати часу, пов'язані з переходами між операціями — 0,27 хв,
- встановлення заглушок для отворів — 6,5 хв,
- нагрівання деталі перед напиленням — 4 хв,
- підведення до обробки шатунної шийки — 0,6 хв.

$$T_B = t_0 + t_1 + t_2 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8, \quad (3.9)$$

Загальний результат нормування операцій узагальнено в таблиці 3.7.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

У результаті розрахунків встановлено, що загальний штучний час, необхідний для відновлення поверхонь шийок колінчастого валу, дорівнює 191,3 хвилини.

Таблиця 3.7 – Підсумки нормування технологічного процесу.

Операція	$T_h$ , хв	$T_0$ , хв	$T_B$ , хв
05 Очищення	27	25	2
10 Дефектація	8	6	2
15 Шліфувальна	11,50	6	5,50
20 Слюсарна	14	12	2
25 Струменево-абразивна	5	3	2
30 Контрольна	3,80	1,80	2
35 Напилення	22,85	12,30	17,10
40 Термообробка	62	60	2
45 Контрольна	4,40	2,20	2
50 Шліфувальна	18,70	13,20	5,5
55 Контрольна	5,60	3,60	2
60 Консервація	1,90	0,80	1,10
Всього	191,30 хвилин		

### 3.3 Визначення трудомісткості та чисельності персоналу.

Трудомісткість процесу відновлення одного колінчастого валу становить:

$$T = \frac{T_h}{60}, \quad (3.10)$$

$$T = \frac{191,3}{60} = 3,1 \text{ людино/годин.}$$

Загальна трудомісткість на рік розраховується за формулою:

$$T_{ZAG} = T \cdot P, \quad (3.11)$$

де  $P$  — річний обсяг відновлення колінчастих валів, який складає 1000 штук. Отже, загальна річна трудомісткість дорівнює:

$$T_{ZAG} = 3,1 \cdot 1000 = 3100 \text{ людино/годин.}$$

При фактичному річному фонді робочого часу в 2025 році, який становить 1946 годин, розраховується необхідна чисельність персоналу:

$$N_p = \frac{T_{ZAG}}{F_D}, \quad (3.12)$$

$$N_p = \frac{3100}{1946} = 1,6.$$

Розрахунком встановлено, що для виконання робіт на ділянці потрібно 2 працівники, які працюють в одну зміну.

Виходячи з отриманих результатів, для організації технологічного процесу відновлення колінчастих валів двигуна Mercedes OM442 передбачається використання відповідного обладнання та оснащення.

Перелік необхідних верстатів та пристроїв представлений у таблиці 3.8.

					КВРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.8 – Перелік обладнання для ділянки з відновлення колінчастих валів.

№	Найменування	Розміри габаритні, мм	Площа, м <sup>2</sup>
4	Верстат шліфувальний «ЗД4230»	5200x1500x2300	9
1	Стелаж	1200 x600x700	0,84
3	Верстак	1600 x600x800	1,28
2	Мийна машина «АМ900AV»	1050 x1600x1200	1,1
6	Абразивно-пневматична установка	2200 x1700x1600	2,46
9	Верстат з тумбою	1600 x600x700	1,11
5	Верстат з полицею	1600 x650x700	1,13
8	Електропіч з піддоном	1400 x1200x800	1,11
7	Установка для напилення	2100 x1500x600	1,3
16	Шафа з обладнанням газовим	1600 x1500x600	0,96
12	Стелаж № 2	1200 x1800x400	0,5
10	Верстат з полицею	1600x700x650	1,14
15	Камера шумоізоляційна	5000 x3200x3200	16
11	Шафа сушильна	1000x1000x1500	1
	Верстак №2	1600 x600x700	0,96
13	Шафа захисна з обладнанням	1200x700x800	0,85
18	Стелаж №3 з оснасткою	1600 x1000x700	1,28
19	Кран гідравлічний пересувний	1500 x1500x1200	2,4
17	Щит із засобами пожежегасіння	1200 x50x1500	0,6
Всього			44,80

					КВРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

### 3.4 Загальна площа для виробничого приміщення.

Загальну площу, необхідну для виробничого приміщення, можемо визначити за наступною формулою:

$$F = F_{OB}K_{OB}, \quad (3.13)$$

Враховуючи, що сумарна площа  $F_{OB}$ , зайнята обладнанням складає 30 м<sup>2</sup> то ще необхідно відняти площу шумоізоляційної камери; коефіцієнт щільності розміщення устаткування приймаємо:

$$K_{OB} = (4.0 \dots 4.5),$$

і тоді загальна площа:

$$F = 30 \cdot 4,5 = 135 \text{ м}^2.$$

Тобто, площа ділянки для відновлення колінчастих валів Mercedes OM442 приймається 135 м<sup>2</sup>.

Технологічну карту процесу відновлення корінних і шатунних шийок колінчастих валів двигуна Mercedes OM442 наведено в додатку А.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз конструкції і умов роботи колінчастого валу двигуна автомобіля Mercedes OM442. В результаті аналізу експлуатаційних дефектів колінчастих валів Mercedes OM442 було встановлено, що найпоширенішими дефектами є: деформація колінчастого валу (69%); провертання, задир або аварійний знос корінних та (або) шатунних шийок (22%).

Середня величина відхилення від номінального діаметра в зоні найбільшого зношування (при нормальному зносі) корінних шийок становить 0,027 мм, а шатунних 0,029 мм. Аналіз напружено-деформованого стану при таких параметрах показав важливість забезпечення відповідних умов підтримки, що усувають прогини, та, тим самим, пружні деформації колінчастого вала під впливом власної ваги, а також викликані його геометричними відхиленнями. Ці відхилення можна усунути лише за умови, що між опорами і корінними шийками вала є постійний контакт.

2. Виконано аналіз способів відновлення працездатності зношених колінчастих валів, з яких запропоновано метод детонаційного напилення сталюого колінчастого валу зносостійким порошком марки ПР-Н65Х25СЗРЗ. Детонаційне напилення запропоновано виконувати на комплексі ССДС2000.

3. Розроблений технологічний процес відновлення опорних та корінних шийок сталюого колінчастого валу, що включає 12 операцій. Розраховано нормування технологічного процесу відновлення, трудомісткість та площу виробничого приміщення для відновлення, призначено обладнання.

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Транспортна статистика : навч. посіб. / В. А. Познаховський, О. Г. Кірічок. – Рівне : НУВГП, 2016. – 196 с
2. 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.
3. Кисликов В. Ф., Луцик В. В. Будова й експлуатація автомобілів: Підручник. — 6-те вид. - К.: Либідь, 2006. — 400 с.
4. Корж В. М. Нанесення покриття : навчальний посібник / В. М.Корж. — К. : Арістей, 2005. — 204 с.
5. Ремонт машин та обладнання: Підручник / О.І. Сідашенко, О.А. Науменко, Т.С. Скобло та ін. Київ. "Агроосвіта", 2014 – 665 с.
6. Fonseca, L.G.; de Faria, A.R. A deep rolling finite element analysis procedure for automotive crankshafts. J. Strain Anal. Eng. Des. 2018, 53. – p.p. 178–188.
7. Sun, J.; Wang, J.; Gui, C. Whole crankshaft beam-element finite-element method for calculating crankshaft deformation and bearing load of an engine. Proc. Instit. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol. 2010, 224, 299–303.
8. Shen, N.Y.; Li, J.; Wang, X.D.; Ye, J.; Yu, Z.X. Analysis and detection of elastic deformation of the large-scale crankshaft in non-circular grinding. In Proceedings of the Mechatronics and Applied Mechanics III; Trans Tech Publications Ltd.: Baech, Switzerland, 2014; Volume 532, pp. 285–290.
9. Okuyama, E.; Goho, K.; Mitsui, K. New analytical method for V-block three-point method. Precis. Eng. 2003, 27, pp. 234–244
10. Відновлення деталей автомобілів: Навчальний посібник / укладачі: В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, В.І. Венжега.– Чернігів:ЧНТУ, 2013. – 192с.; іл.

					КВРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

11. Астахов Є. А., Артемчук В. В. Особливості застосування газотермічного нанесення відновлювальних покриттів / ВосточноЕвропейский журнал передовых технологий. - № 3/5 (57). - 2012. - С. 4-10.

12. Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques / [edited] by Krishna Seshan. - 2nd edition. - Norwich, NY 13815. – 656 P.

13. Сологуб М.А. Технологія конструкційних матеріалів / М.А. Сологуб, І.О. Рожнецький, О.І. Некоз та ін.; За ред. М.А. Сологуба.– 2-ге вид., перероб. і допов. – К: Виша школа, 2002. – 374 с.

14. Електронний ресурс: <http://www.hydro.nsc.uф/technology/techn3.php>

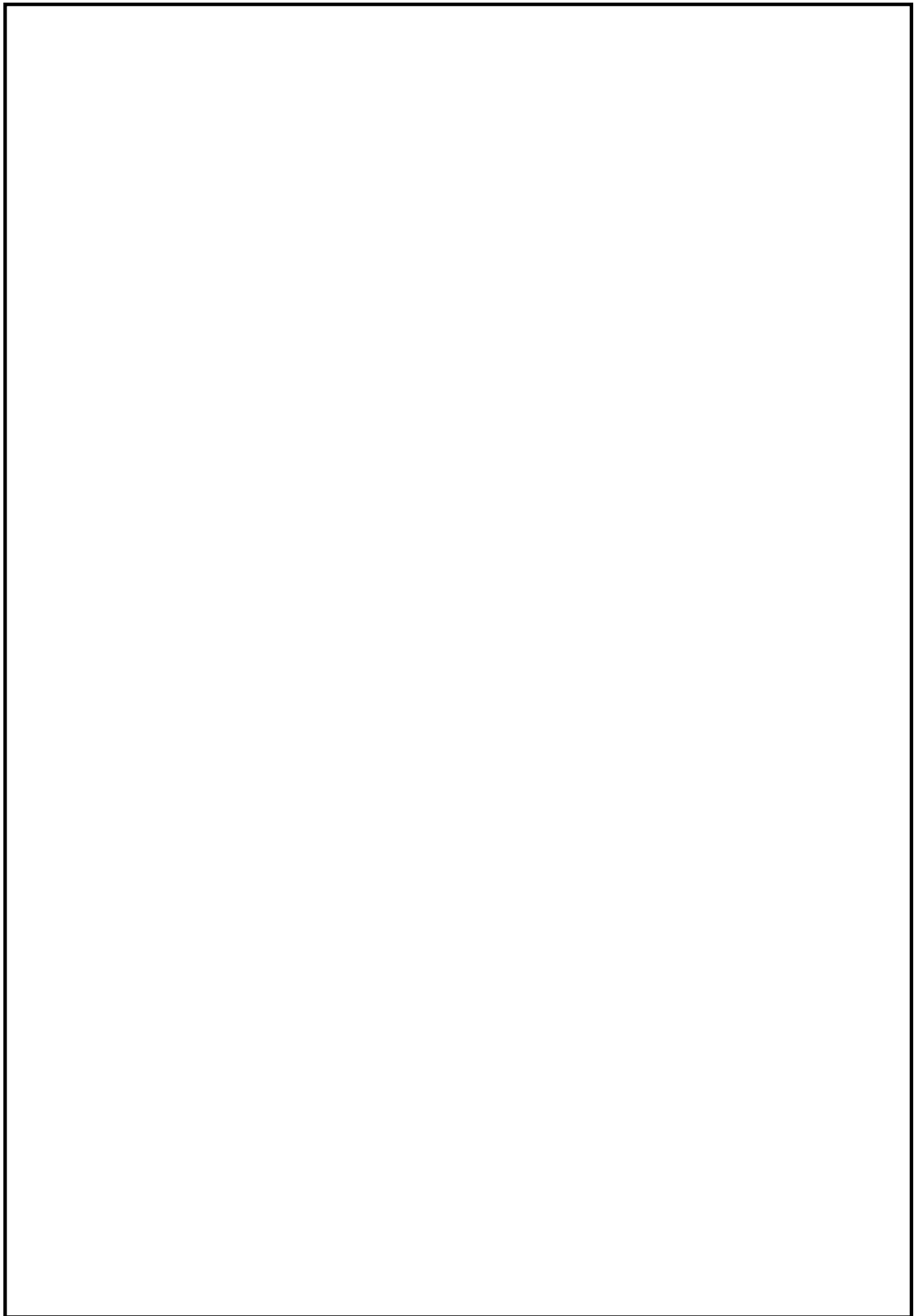
15. Електронний ресурс: <https://www.sant-tech.pl/product/peskostrujnye-abrazivostrujnye-ustanovki-ustanovki-dlya-ochistki-drobemetny>

16. Assembly Practice in Machine Building A Handbook / V.S. Korsakov, V.K. Zamatin. – NY ,Technology Series, 2018. – 456 p.

					КВРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

ДОДАТКИ

					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72



					КвРМТВА. 21155.01.08.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

**КАФЕДРА ТРИБОЛОГІЇ, АВТОМОБІЛІВ  
ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА**

***Відновлення колінчастого валу  
двигуна Mercedes OM442 шляхом  
детонаційного напилення.***

*Виконав ст. гр. МТВА-21-1:*

***Владислав НІЩУН***

*наук. керівник: доц. каф. ТАМ*

*Сергій ПОСОНСЬКИЙ*

## **Мета та завдання роботи.**

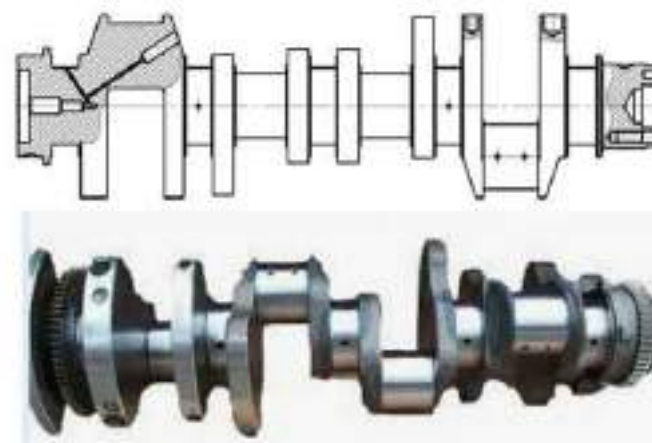
*Колінчастий вал - одна з найбільш відповідальних, дорогих, а також складних у ремонті деталей, що працює при знакозмінних навантаженнях, абразивному зношуванні та при впливі високих температур у двигунах внутрішнього згоряння.*



*Метою даної випускної кваліфікаційної роботи є розробка технологічного процесу відновлення сталевого колінчастого валу двигуна Mercedes OM442 із застосуванням методу детонаційного напилення.  
Завданнями даної випускної кваліфікаційної роботи є:*

- 1. Провести аналіз конструктивних особливостей та умов експлуатації колінчастих валів, а також дослідити існуючі методи їх відновлення.*
- 2. Розробити технологічний процес відновлення сталевого колінчастого валу для двигуна Mercedes OM442.*
- 3. Виконати необхідні технологічні розрахунки для обґрунтування процесу відновлення шийок колінчастого валу за допомогою детонаційного напилення.*

для розробки технології відновлення колінчастого валу розглядається колінчастий вал двигуна MERCEDES OM442



Технічні характеристики Mercedes OM442.

Вид двигуна	Дизель
Торгова назва	OM 442 LA
Початок випуску	1987
Закінчення випуску	1996
Потужність	191 - 370 кВт
Потужність	260 - 503 к.с.
Об'єм	14618 куб.см
Циліндри	8
Клапана	16
Степінь стиску	16,9:1
Діаметр циліндра	128 мм
Хід поршня	120 мм
Форма двигуна	V
Вид пального	дизельне паливо
Подача горючої суміші	рядний насос упорскування
Турбіна	турбо / охолодження примусове.
Головка циліндра	ОНV
ГРМ	циліндричне зубчасте колесо
Газорозподіл	коромисло
Охолодження	з водяним охолодженням

**Азотований колінчастий вал двигуна MERCEDES OM442 виготовлений з високоякісної сталі 42ХМФА**

C	S	P	Mn	Cr	Si	Ni	Fe	Cu	V
0,4-0,45	0,007-0,025	≤0,025	0,5-0,8	1-1,3	0,17-0,37	≤0,3	Залишок	≤0,3	0,08-0,12

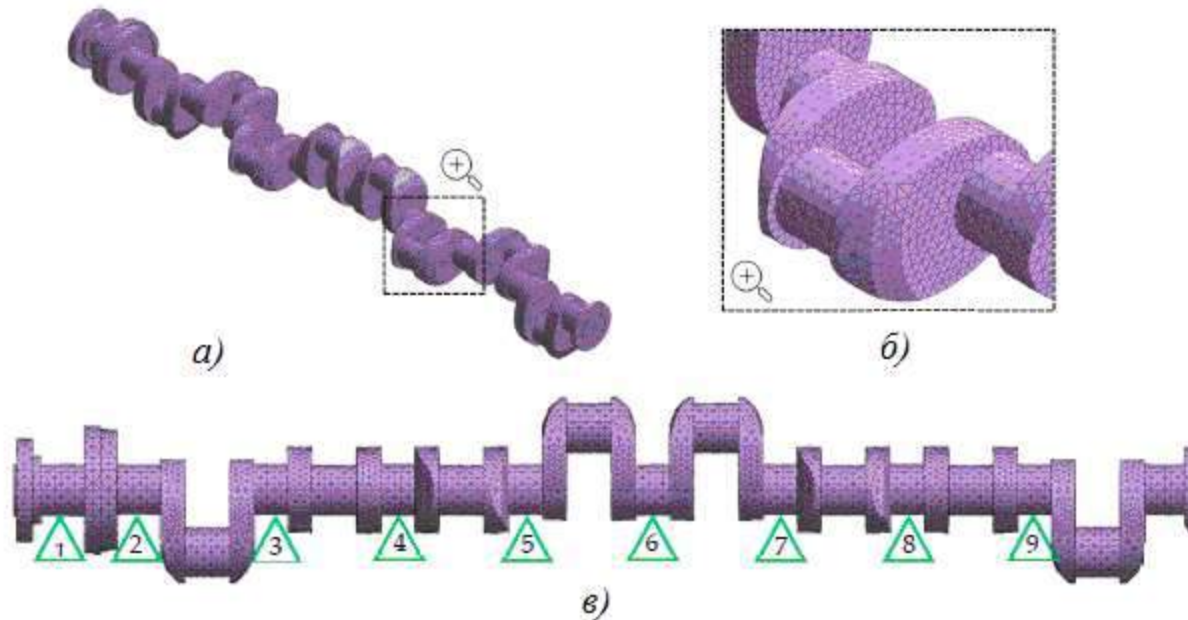
## Основні дефекти колінчастих валів

Провідним процесом руйнування є механічне зношування, в яке входить абразивний та втомний знос. Супутніми видами зносу є молекулярно-механічний та корозійно-механічні зноси з усіма своїми різновидами, які в залежності від умов роботи впливають на знос і за певних умов можуть стати провідними процесами зносу.



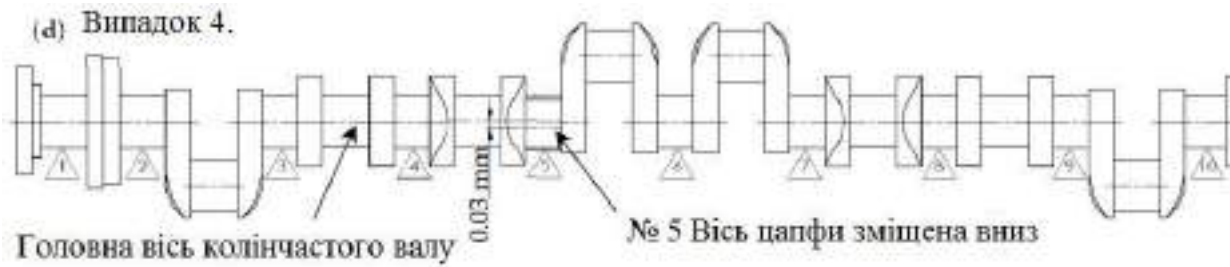
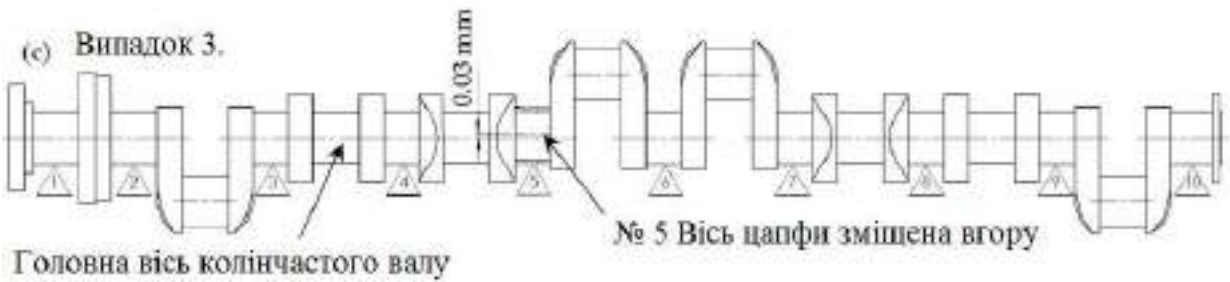
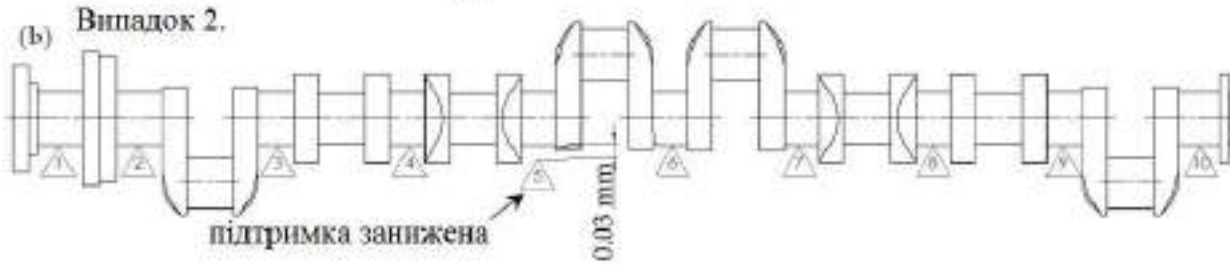
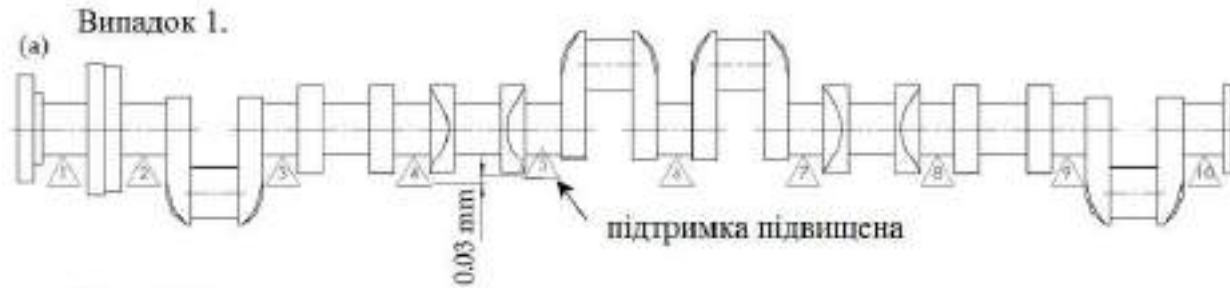
## Напружено-деформований стан колінчастого валу

Для оцінки прогину та розподілу зусиль реакцій на контактні опори V подібного блоку з головними шийками колінчастого валу була створена кінцево-елементна модель (а,б,в)



До моделі прикладалося гравітаційне навантаження. Аналіз, що полягає у визначенні прогинів валу і сил реакції, що діють на опорний вал.

План дослідження вимірювань колінчастого валу включає в себе аналіз сил прогину та реакції на контактні опори V-блоку. В аналіз включено чотири найбільш репрезентативні випадки, а саме :



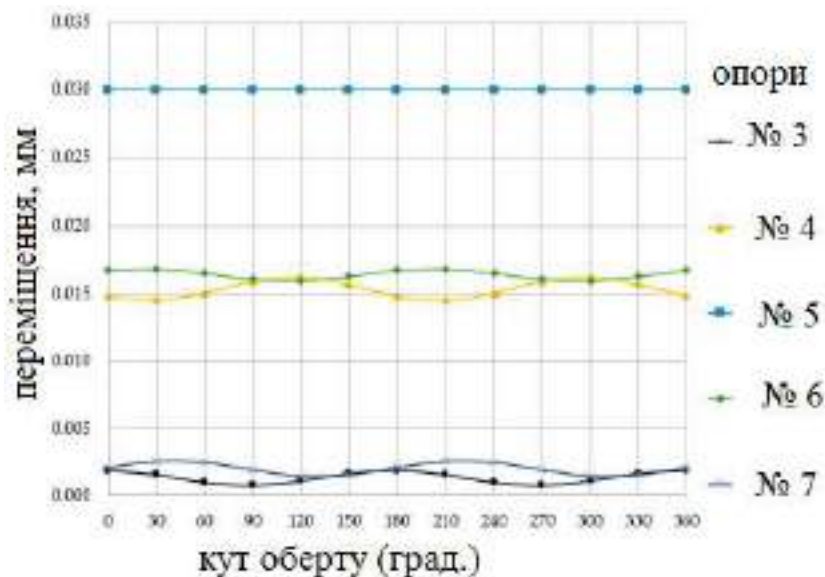
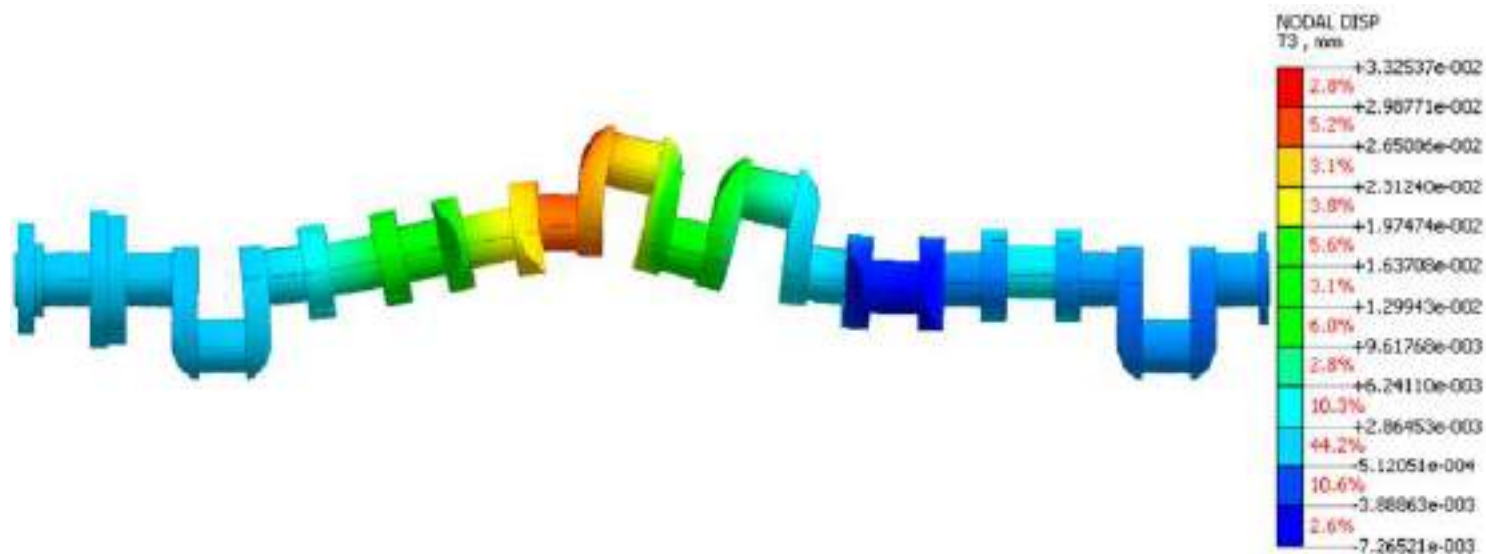
**Випадок 1:** окремі головні цапфи ідеально коаксіальні, а одна з опор (цапфа №5) встановлюється вгору на 0,03 мм відносно інших;

**Випадок 2:** Опускання опори відносно інших призводить до виведення опори з-під вала з її місцезнаходження. Передбачалося, що підтримка № 5 була опущена на 0,03 мм відносно інших.

**Випадок 3:** опори розташовані на одній висоті, а вісь цапфи № 5 встановлено ексцентрично вгору на +0,03 мм відносно інших цапф.

**Випадок 4:** Зміна кута повороту вала на 1800 призводить до того, що ексцентрично розташована вісь цапфи зміщується на крайнє місце навпроти базового кута, використаного в попередньому випадку .

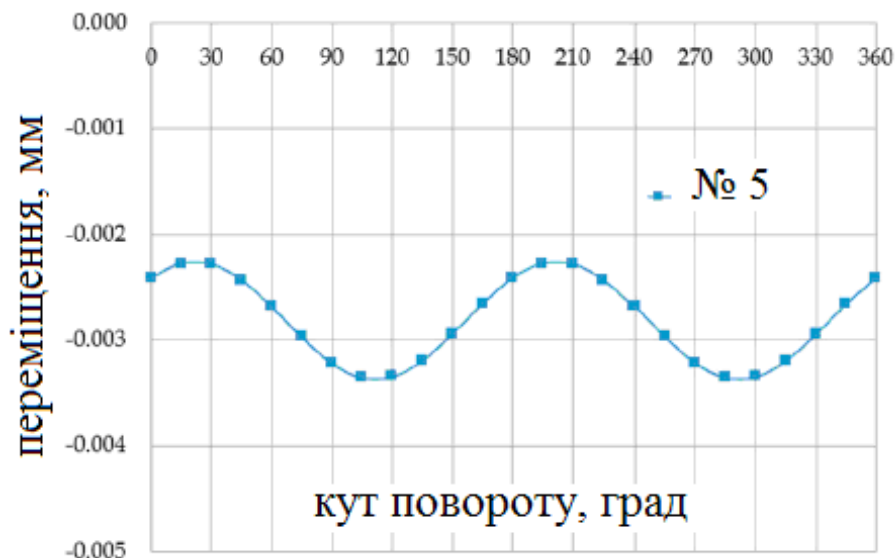
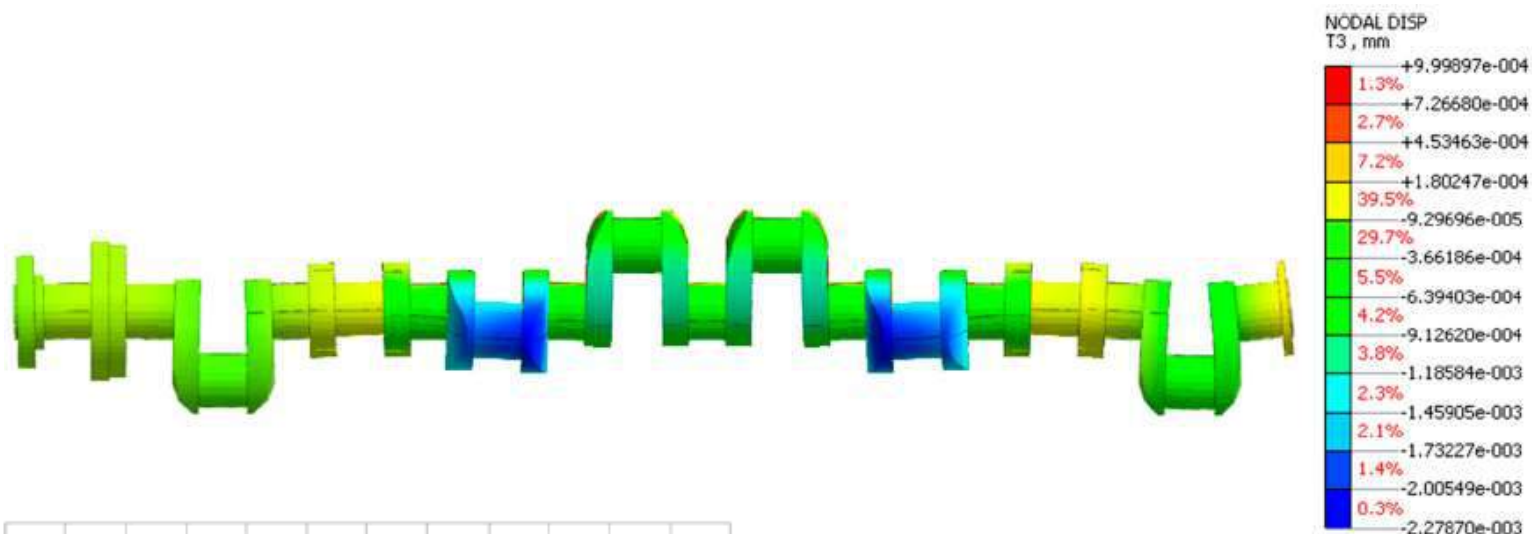
## Результати аналізу кінцевих елементів (випадок 1)



Кут повороту	Значення реакції сили (Н) на опорах №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0°	681,2	1545,4	0	0	3891,3	0	0	1441,7	1157,6	566,5
90°	878,8	1302,2	0	0	3928,8	0	0	1470,9	1162,4	540,7
180°	681,2	1545,4	0	0	3891,3	0	0	1441,7	1157,6	566,5
270°	878,8	1302,2	0	0	3928,8	0	0	1470,9	1162,4	540,7

У цьому випадку вал циклічно загинається вгору і опора № 5 сприймає дуже високі навантаження, повністю розвантажені опори № 3, 4, 6, 7. Як підтримка діє опора № 5, вал піднято, тому вищезгадані опори втратять контакт із цапфами

## Результати аналізу кінцевих елементів (випадок 2)

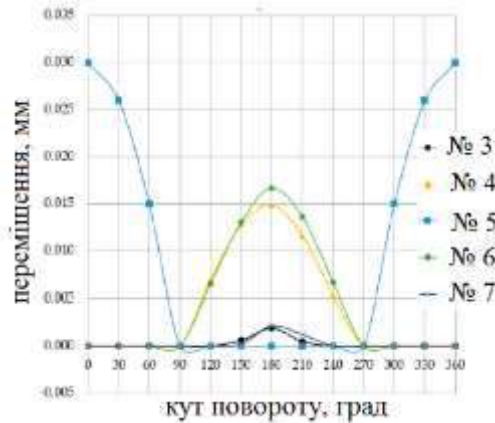


Кут повороту	Значення реакції сили (Н) на опорах №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0°	725,4	996,9	729,4	1714,0	0	1750,0	584,3	1183,4	1025,2	572,3
90°	817,3	844,7	775,5	1773,6	0	1541,2	914,9	907,9	1168,4	540,3
180°	725,4	996,9	729,4	1714,0	0	1750,0	584,3	1183,4	1025,2	572,3
270°	817,3	844,7	775,5	1773,6	0	1541,2	914,9	907,9	1168,4	540,3

У місцях без підтримки вал прогинається під власною вагою. Прогини при непідтримуваній шийки незначні (від 0,00228 мм до 0,00335 мм), тоді як сили реакції значно збільшуються, досягаючи від 1713 Н до 1773 Н в опорі № 4 та від 1541 Н до 1749,9 Н в опорі № 6.

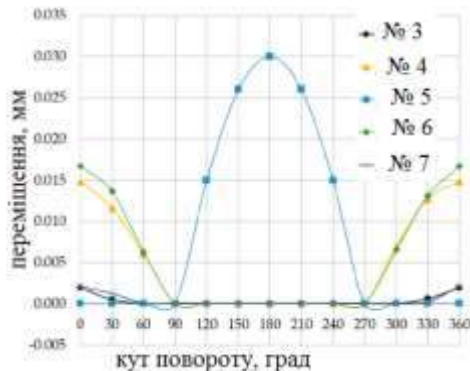
## Результати аналізу кінцевих елементів (випадок 3,4)

У третьому випадку опори розташовані на одній висоті, а вісь цапфи № 5 встановлено ексцентрично вгору на +0,03 мм відносно інших цапф. Форма деформації вала аналогічна представлений у випадку 1.



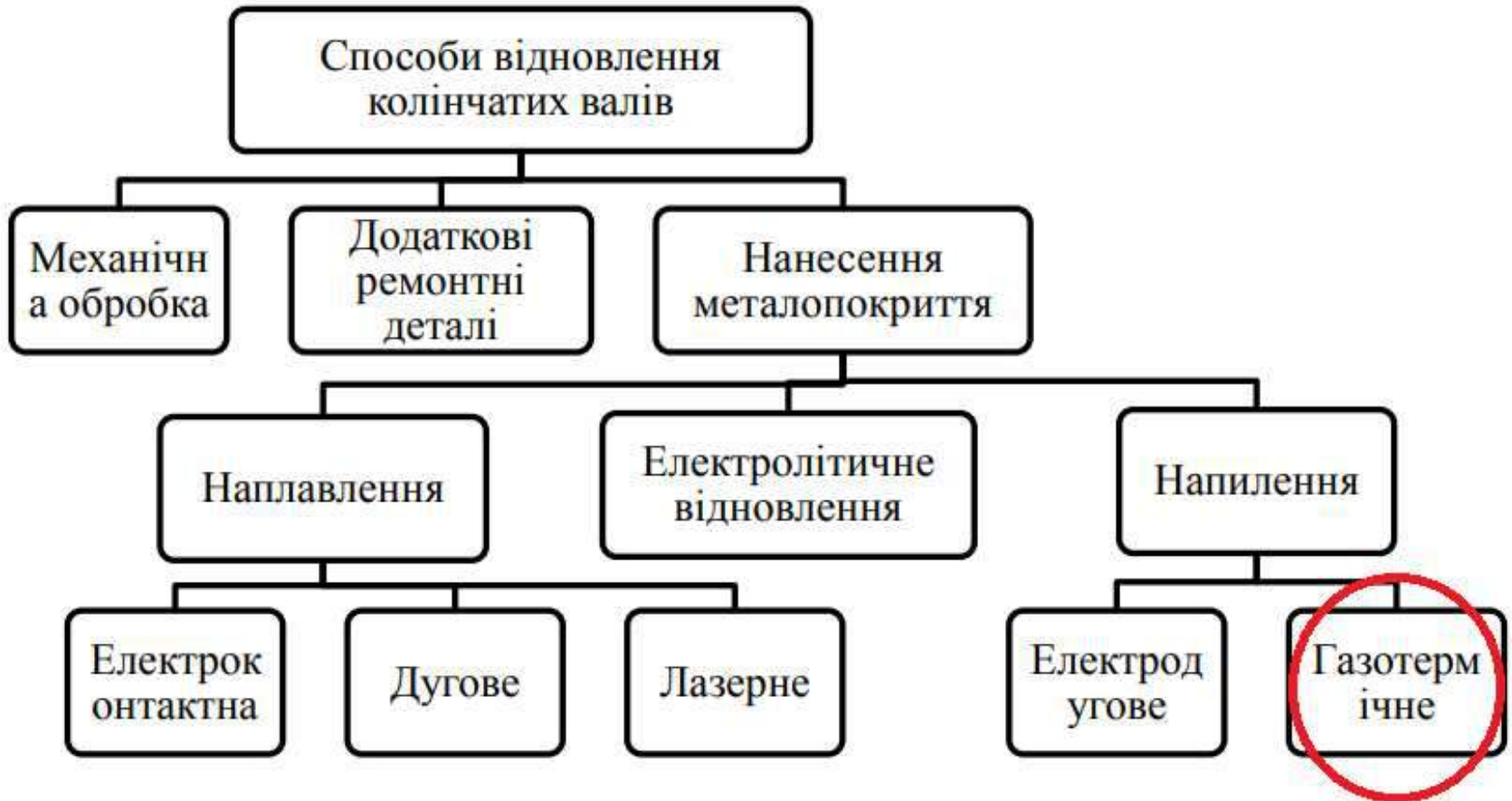
Кут повороту	Значення реакції сили (Н) на опорах №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0°	725,4	996,9	729,4	1714,0	0	1750,0	584,3	1183,4	1025,2	572,3
90°	833,3	763,1	1134,1	891,3	1126,1	809,9	1127,1	886,2	1173,4	539,5
180°	725,4	996,9	0	0	3891,3	0	0	1441,7	1157,6	566,5
270°	833,3	763,1	1134,0	891,3	1126,1	809,9	1127,1	886,2	1173,4	539,5

Випадок четвертий. Зміна кута повороту вала на 180° призводить до того, що ексцентрично розташована вісь цапфи зміщується на крайнє місце навпроти базового кута, використаного в попередньому випадку. Значення прогинів і сил реакції для кутів повороту валу від 0 до 360°, прийматимуть ті самі значення, що й у випадку 3.



Результати цього аналізу показують важливість забезпечення відповідних умов підтримки, що усувають прогини, та, тим самим, пружні деформації колінчастого вала під впливом власної ваги, а також викликані його геометричними відхиленнями. Ці відхилення можна усунути лише за умови, що між опорами і корінними шийками вала є постійний контакт

## Класифікація способів відновлення колінчастих валів



## Технологічна карта процесу відновлення шийок колінчатого валу двигуна MERCEDES OM442

№	Найменування операції	Зміст операції	Устаткування	Засоби технологічного обладнання	Норми часу, хв.	Технічні вимоги та вказівки на виконання робіт
1	2	3	4	5	6	7
005	Очищення	Встановити вал у кошик. Автоматичне миття. Дістати вал із кошика.	Мийна машина АМ 900 АV.	Миючий та очищувальний засіб МЗ-6	27	Роботи виконувати у хімічно стійких рукавичках, фартуху, черевиках.
010	Дефектація	Встановити вал на призми. Провести вимірювання та контроль придатності валу.	Верстак.	Ультразвуковий дефектоскоп УЗД-7Н. Набір вимірювального інструменту.	8	Необхідно виявити дефекти, що підлягають усуненню.
015	Шліфувальна	Встановити вал, вивірити, закріпити. Шліфувати шийки валу. Зняти вал.	Верстат для шліфування шийок колінчастих валів 3Д4230.	Коло шліфувальне. Центрозмішувач. Стіяка та індикатором.	11,5	Рекомендовані режими: $t = 0,25 \text{ мм};$ $S = 15 \text{ мм/хв};$ $v = 30 \text{ м/хв}.$
020	Слюсарна	Встановити захисні екрани на поверхні, що не напилюються. Підготувати порошок та газ. Знежирити шийки валу.	Верстак. Шафа сушильна	Захисні екрани. Дріт в'язальний. Сито 15-50 мкм. Уайт-спірит.	14	Закрити не напилюванні поверхні металевими екранами.
025	Струменево-абразивна	Встановити вал у бункер. Провести обробку шийок. Дістати вал.	Абразивно-пневматична установка.	Електрокорунд 12Л, зернистістю 53Н	5	Забезпечити рівномірну шорсткість поверхні.
030	Контрольна	Контролювати діаметри шийок. Знежирити	Верстак.	Призми. Мікрометр МК 75-100. Уайт-спірит.	3,8	Контролювати діаметри шийок під напилення

## Закінчення технологічної карти процесу відновлення шийок колінчатого валу двигуна MERCEDES OM442

1	2	3	4	5	6	7
035	Газотермічна	Встановити вал, вивірити, закріпити. Нанести покриття на шийки. Зняти вал.	Детонаційна установка.	Порошок для напилення.	22,85	Нанести покриття необхідної товщини.  Режими: t = 0,5 мм;  X = 105; v = 25 ... 30 м / хв.  L=100 мм.
040	Термообробка	Встановити вал на піддон. Оплавити покриття. Вийняти деталь.	Пічка для відпуску металів.	-	62	Витримати в печі вал за температурі 300°C
045	Контрольна	Контролювати товщину покриття.	Верстак.	Товщиномір СЕМ DT-156	4,4	Роботи виконувати відповідно до інструкції.
050	Шліфувальна	Встановити вал, вивірити, закріпити. Шліфувати шийки валу. Зняти вал.	Верстат для шліфування шийок колінчастих валів 3Д4230	Коло шліфувальне. Центрозміщувач. Стойка з індикатором.	18,7	Рекомендовані режими:  t = 0,5 мм; S = 15 мм/хв;  v = 30 м/хв.
055	Контрольна	Контролювати товщину покриття, шорсткість поверхонь, діаметри шийок, технічні вимоги згідно з ремонтним кресленням.	Верстак.	Товщиномір СЕМ DT-156. Мікрометр МК 75-100. Стойка індикаторна. Індикатор годинникового типу. Призми. Центри.	5,6	Перевірити розміри на відповідність ремонтного креслення.
060	Консервація	Покрити поверхню валу тонким шаром мастила. Обернути обгортковим папером.	Верстак.	Масло індустріальне 20. Пензель. Папір обгортковий	1,9	Покрити поверхню валу тонким шаром масла.
<b>Всього по технологічному процесу</b>					<b>191,3</b>	

## Струменево-абразивна обробка

Струменево-абразивна обробка є одним із найбільш поширених способів підготовки поверхні металевих матеріалів для газотермічного напilenня покриттів. Її застосовують з метою активації та надання потрібної шорсткості напилюваної поверхні.

Обробка виконується на абразивно-пневматичній установці серії РЕКО 140



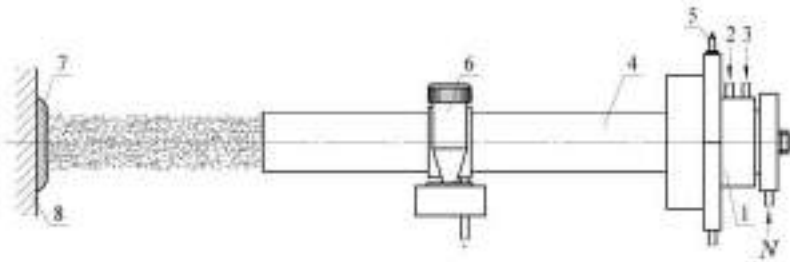
Режими струменево-абразивної обробки

Режими обробки	Значення
Тиск стисненого повітря, МПа	0,5
Кут атаки струменя абразиву, град	90
Відстань від зрізу сопла до поверхні, мм	150
Витрата абразиву, кг/год	3
Число проходів	2
Абразивний матеріал	Електрокорунд
Зернистість абразивного матеріалу	100-125

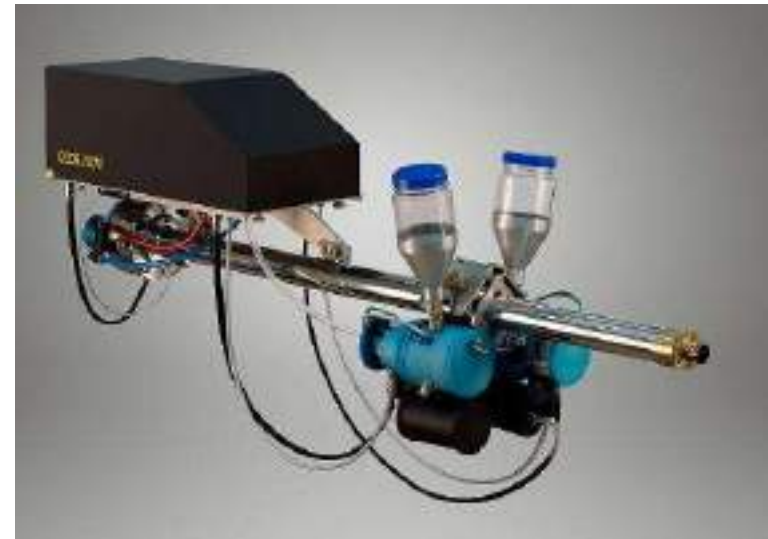


Поверхня після струминно-абразивної обробки

Детонаційні покриття одержують за допомогою пристроїв, принципова схема яких наведена на рисунку. У загальному вигляді детонаційні установки напылення складаються з водоохолоджуваного ствола 1, камери змішувача 3, електричної свічки запалювання 2, порошкового живильника 4 і допоміжного обладнання.



Детонаційний комплекс ССДС2000 складається з гармати, комп'ютеризованої системи управління, автономної системи охолодження та допоміжного обладнання



Для відновлення зношених поверхонь корінних і шатунних шийок із застосуванням детонаційного напылення рекомендується використовувати порошок, що самофлюсується, ситеми Ni-Cr-B-Si, марки ПР-Н65Х25С3Р3

Хімічний склад порошку марки ПР-Н65Х25С3Р3

Марка порошку	Хімічний склад, %						
	Fe	Cu	Cr	Ni	Mo	Si	B
ПР-Н65Х25С3Р3	≥ 5,0	1,5	26,0	залишок	-	2,3	3,0
Характеристика покриттів				Галузь застосування			
Зносостійке, корозійностійке покриття з високою адгезією.				Для відновлення деталей типу «вал», що працюють при знакозмінних навантаженнях, абразивному зношуванні та при впливі високі температури.			

Основними перевагами детонаційного напылення є: низька пористість покриття (трохи більше 1%); відсутність перегріву напылюваної деталі; висока адгезія покриття (понад 80 МПа); високий коефіцієнт використання матеріалу.

Технічні характеристики детонаційної установки

Характеристики установки	Значення
Швидкість частинок порошку, м/с	1500
Швидкострільність, пострілів за секунду	6-20
Продуктивність, кг/год	до 2
Коефіцієнт використання порошку, %	до 75
Товщина покриття за 1 постріл, мкм	до 20
Пористість покриттів, %	менше 1,0
Адгезія, МПа	до 150
Електрична потужність, кВт	1
Паливо	ацетилен, пропан, бутан та ін.
Окислювач	кисень

## Нормування технологічного процесу

### Режими різання під час обробки однієї шийки

Зміст переходу	l, мм	S, мм/хв	n, об/хв	V, м/хв	T <sub>0</sub> , хв
Шліфування шатунної шийки діаметром 80 <sub>-0,013</sub> мм	0,5	15	100	30	1,8
Шліфування корінної шийки діаметром 94 <sub>-0,1</sub> мм	0,5	15	100	30	1,2

### Час необхідний для детонаційного наплення

$$T_0 = t_{Ш} \cdot 4 + t_{К} \cdot 3 + t_{1.К} + t_{5.К}$$

### Допоміжний час наплення

$$T_B = t_0 + t_1 + t_2 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8$$

Найменування операції	T <sub>0</sub> , хв	T <sub>B</sub> , хв	T <sub>с</sub> , хв
005 Очищення	25	2	27
010 Дефектація	6	2	8
015 Шліфувальна	6	5,5	11,5
020 Слюсарна	12	2	14
025 Струменево-абразивна	3	2	5
030 Контрольна	1,8	2	3,8
035 Наплення	12,3	17,1	22,85
040 Термообробка	60	2	62
045 Контрольна	2,2	2	4,4
050 Шліфувальна	13,2	5,5	18,7
055 Контрольна	3,6	2	5,6
060 Консервація	0,8	1,1	1,9
РАЗОМ		191,3 хв	

### Обладнання ділянки відновлення колінчастих валів

Поз.	Найменування обладнання	Габаритні розміри, мм	Кіл-ть	Займана площа, м <sup>2</sup>
1	Стелаж для валів, що підлягають відновленню	1200x700x600	1	0,84
2	Мийна машина АМ 900 АV	1050x1200x1600	1	1,1
3	Верстат	1600x800x600		1,28
4	Верстат шліфувальний ЗД4230	5200x2300x1500	1	9,0
5	Верстат з полицею	1600x700x650	1	1,12
6	Абразивно-пневматична установка	2200x1600x1700	1	2,45
7	Установка для наплення валів	2100x600x1500	1	1,19
8	Пічка для відпуску металів з піддоном	1400x800x1200	1	1,12
9	Верстат з тумбою	1600x700x600	1	1,12
10	Верстат з полицею	1600x700x650	1	1,12
11	Шафа сушильна	1000x1000x1500	1	1,0
12	Стелаж	1200x400x1800	1	0,48
13	Шафа захисна з обладнанням	1200x700x800	1	0,84
14	Верстат	1600x700x600	1	0,96
15	Шумаізоляційна камера	5000x3200x3200	1	16,0
16	Шафа з газовим обладнанням	1600x600x1500	1	0,96
17	Щит із засобами пожежегасіння	1200x1500x50	2	0,6
18	Стелаж з оснасткою	1600x700x1000	1	1,28
19	Кран пересувний гідравлічний	1500x1200x1500	1	2,3
РАЗОМ				44,76

## ВИСНОВКИ

- **1. Виконано аналіз конструкції і умов роботи колінчастого валу двигуна автомобіля MERCEDES OM442 . В результаті аналізу експлуатаційних дефектів колінчастих валів MERCEDES OM442 було встановлено, що найпоширенішими дефектами є: деформація колінчастого валу (69%); провертання, задир або аварійний знос корінних та (або) шатунних шийок (22%);**
- **Середня величина відхилення від номінального діаметра в зоні найбільшого зношування (при нормальному зносі) корінних шийок становить 0,027 мм, а шатунних 0,029 мм. Аналіз напружено-деформованого стану при таких параметрах показав важливість забезпечення відповідних умов підтримки, що усувають прогини, та, тим самим, пружні деформації колінчастого вала під впливом власної ваги, а також викликані його геометричними відхиленнями. Ці відхилення можна усунути лише за умови, що між опорами і корінними шийками вала є постійний контакт.**
- **2. Виконано аналіз способів відновлення працездатності зношених колінчастих валів, з яких запропоновано метод детонаційного напилення сталюого колінчастого валу зносостійким порошком марки ПР-Н65Х25С3Р3. Детонаційне напилення запропоновано виконувати на комплексі ССДС2000.**
- **3. Розроблений технологічний процес відновлення опорних та корінних шийок сталюого колінчастого валу, що включає 12 операцій. Розраховано нормування технологічного процесу відновлення, трудомісткість та площу виробничого приміщення для відновлення, призначено обладнання.**

**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!**