

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Дослідження можливості виготовлення елементів  
колінчастого вала методами порошкової металургії»

Рівень вищої освіти перший бакалаврський

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Спеціальність 132 Матеріалознавство

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр КвРМТВА. 23106.02.01.00

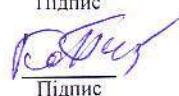
Виконав студент 4 курсу група МТВАс-23-2



Денис ГРИГОР'ЄВ

Підпис

Керівник д-р.техн.наук, проф. каф. ТАМ



Павло КАПЛУН

Підпис

Нормоконтролер канд.техн.наук,  
доц. каф. ТАМ



Олег БАБАК

Підпис

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри ТАМ

10.06.2026

Дата



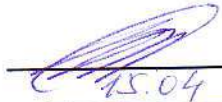
Олександр ДИХА

Підпис

# 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

  
15.04 Диха О.В.  
2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Григор'єву Денису Володимировичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Дослідження можливості виготовлення елементів колінчастого вала методами порошкової металургії.*

Керівник роботи: Каплун Павло Віталійович, д-р.техн.наук, проф. каф. ТАМ.

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

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7 (Д 14)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів, робіт, практики.*

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

1) *Аналіз сучасного стану та перспектив виготовлення колінчастих валів.*

2) *Аналіз конструкції колінчастих валів*

3) *Дослідження навантажень та врівноваження колінчастого вала.*

4) *Практичні рекомендації з перепроєктування колінчастого вала під технології порошкової металургії.*

4. *Висновки.*

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 15.04 2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Аналіз сучасного стану та перспектив виготовлення колінчастих валів	28.05.2026	вик
2	Аналіз конструкції колінчастих валів	4.06.2026	вик
3	Дослідження навантажень та врівноваження колінчастого вала	8.06.2026	вик
4	Практичні рекомендації з перепроєктування колінчастого вала під технології порошкової металургії	12.06.2026	вик
5	Висновки	14.06.2026	вик
6	Захист роботи	16.06.2026	

Студент

Денис ГРИГОР'ЄВ

Керівник роботи

Павло КАПЛУН

## РЕФЕРАТ

Студент групи МТВАс-23-2: Григор'єв Д.В.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему «Дослідження можливості виготовлення елементів колінчастого вала методами порошкової металургії» складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що налічує 25 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 13 сторінках. Роботу викладено на 62 сторінках, з них 58 сторінок основного тексту, на яких розміщено 18 рисунків, 17 формул та 6 таблиць.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню конструктивних та технологічних особливостей колінчастого вала двигуна внутрішнього згоряння, обґрунтуванню шляхів його перепроектування для виготовлення методом порошкової металургії на основі аналізу навантажень, умов роботи, матеріалів і сучасних виробничих технологій.

У першому розділі розглянуто загальні положення роботи двигунів внутрішнього згоряння, функції колінчастого вала та умови його навантаження. Складний характер змінних сил і моментів визначає підвищені вимоги до міцності, жорсткості та довговічності конструкції.

У другому розділі проаналізовано конструкцію колінчастого вала, системи мащення, технології виготовлення та сучасні матеріали. Обґрунтовано переваги порошкової металургії та визначено її обмеження, що впливають на проектування виробу.

У третьому розділі виконано аналіз навантажень, крутного моменту, умов врівноваження та масово-інерційних характеристик. Встановлено, що оптимальний розподіл маси і зменшення концентрацій напружень є ключовими факторами підвищення надійності вала.

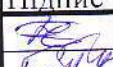
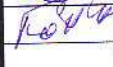


У четвертому розділі розроблено варіанти конструкції колінчастого вала, виконано їх порівняння та обґрунтовано вибір модульного варіанту. Адаптація конструкції до вимог порошкової металургії дозволяє підвищити технологічність, зменшити масу та покращити експлуатаційні характеристики.

Отримані результати підтверджують ефективність комплексного підходу до проектування колінчастого вала з урахуванням навантажень і технологій виготовлення та забезпечення його надійної роботи.

Ключові слова: КОЛІНЧАСТИЙ ВАЛ, ПОРОШКОВА МЕТАЛУРГІЯ, НАВАНТАЖЕННЯ, ВРІВНОВАЖЕННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ.

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИГОТОВЛЕННЯ	7
1.1. Роль та значення колінчастого вала в сучасних машинах	7
1.2. Конструктивні особливості та умови роботи	8
1.3. Сучасні технології виготовлення колінчастих валів	9
1.4. Перспективи застосування порошкової металургії	9
1.5. Актуальність дослідження та напрямки розвитку	10
2. КОНСТРУКЦІЯ ТА АНАЛІЗ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА	13
2.1. Конструкція колінчастого вала та система його мащення	13
2.2. Виготовлення та механічна обробка колінчастих валів	16
2.3. Матеріали колінчастих валів та їх властивості	19
2.4. Перепроєктування колінчастого вала під технології ПМ	27
3. НАВАНТАЖЕННЯ ТА ВРІВНОВАЖЕННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА	37
3.1. Аналіз навантажень у колінчастому валу	37
3.2. Крутний момент та нерівномірність роботи колінчастого вала	39
3.3. Врівноваження колінчастого вала	41
3.4. Аналіз мас та конструкції колінчастого вала	43
4. ПЕРЕПРОЄКТУВАННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА ПІД ТЕХНОЛОГІЇ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ	48
4.1. Вимоги до конструкції	48
4.2. Розробка варіантів конструкції колінчастого вала	50
4.3. Обґрунтування вибраної конструкції колінчастого вала	55
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60
ДОДАТКИ	62

КвРМТВА. 23106.02.01.00				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Григор'єв		
Перевір.		Каплун		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Дослідження можливості виготовлення елементів колінчастого вала методами порошкової металургії			Літера	Арквш
			4	62
ХНУ, МТВАс-23-2				

## ВСТУП

Промислова революція, що тривала у період з 1760 по 1840 роки, стала визначальним етапом розвитку машинобудування та сприяла появі нових технологій виготовлення, які й сьогодні лежать в основі сучасного виробництва. Одним із ключових досягнень цього періоду стало створення двигунів внутрішнього згоряння, які забезпечили стрімкий розвиток транспортних засобів, енергетичних установок та промислового обладнання. Незважаючи на активний розвиток альтернативних джерел енергії, двигуни внутрішнього згоряння залишаються важливим елементом сучасної техніки, зокрема в автомобільній, аграрній та енергетичній галузях України [1].

Сучасні тенденції розвитку машинобудування спрямовані на підвищення ефективності, зниження матеріаломісткості та забезпечення надійності роботи вузлів і агрегатів. У цьому контексті особлива увага приділяється вдосконаленню конструкцій відповідальних деталей, серед яких важливе місце займає колінчастий вал. Цей елемент є однією з найбільш навантажених деталей двигуна, оскільки забезпечує перетворення зворотно-поступального руху поршня у обертальний рух вала. Його працездатність безпосередньо визначає довговічність і ефективність двигуна [2].

Конструкція колінчастого вала характеризується складною геометрією, наявністю концентраторів напружень, а також роботою в умовах змінних навантажень, що включають згинальні та крутні моменти. Основними критеріями при його проектуванні є міцність, жорсткість, балансування та стійкість до втомного руйнування. Для забезпечення цих вимог необхідно виконувати комплексний кінематико-силовий аналіз, досліджувати напружено-деформований стан і враховувати вплив технології виготовлення на експлуатаційні характеристики виробу [3].

В умовах сучасного розвитку промисловості України особливої актуальності набуває впровадження ресурсоефективних технологій

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виготовлення деталей машин. Однією з таких технологій є порошкова металургія, яка дозволяє отримувати заготовки складної форми з мінімальними витратами матеріалу та зменшенням обсягу механічної обробки. Застосування цього підходу відкриває можливості для перепроєктування традиційних суцільних конструкцій у модульні, що сприяє підвищенню технологічності та зниженню собівартості виробництва [4].

Разом із тим, використання порошкової металургії для виготовлення відповідальних деталей, таких як колінчастий вал, потребує вирішення низки складних інженерних задач. До них належать забезпечення необхідної міцності та жорсткості, оптимізація масо-інерційних характеристик, а також розробка ефективних способів з'єднання окремих елементів конструкції. У зв'язку з цим актуальним є проведення досліджень, спрямованих на оцінку можливості виготовлення елементів колінчастого вала методами порошкової металургії з урахуванням сучасних вимог до надійності та довговічності [5].

Дана робота присвячена дослідженню конструкції колінчастого вала та аналізу можливості виготовлення його елементів із застосуванням порошкової металургії, що відповідає сучасним тенденціям розвитку машинобудування та є актуальним завданням для промисловості України.

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИГОТОВЛЕННЯ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ

## 1.1. Роль та значення колінчастого вала в сучасних машинах

Колінчастий вал є однією з ключових деталей кривошипно-шатунного механізму, що забезпечує перетворення зворотно-поступального руху поршня у обертальний рух, який передається на трансмісію або інші робочі органи машини. Його функціональне призначення визначає виняткову важливість для забезпечення стабільності роботи двигуна, рівномірності обертання та мінімізації вібраційних навантажень. У сучасних умовах експлуатації, зокрема в автомобільній, сільськогосподарській та енергетичній техніці України, колінчасті вали працюють у складних режимах змінних навантажень, що включають циклічні згинальні та крутні напруження [6].

Особливістю роботи колінчастого вала є наявність високих концентрацій напружень у зонах галтелей, шатунних та корінних шийок, що значною мірою визначає його довговічність. Враховуючи циклічний характер навантаження, основним видом руйнування є втомне, що потребує особливої уваги до вибору матеріалів та технологій виготовлення. Водночас важливим аспектом є балансування, оскільки нерівномірний розподіл мас може призводити до підвищених динамічних навантажень і зниження ресурсу як самого вала, так і суміжних вузлів [7].

У контексті сучасного машинобудування України роль колінчастого вала виходить за межі класичних двигунів внутрішнього згорання. Він широко застосовується у компресорах, генераторах, насосах та інших механізмах, де необхідне перетворення виду руху. Це обумовлює необхідність розробки універсальних підходів до його проектування та виготовлення з урахуванням специфіки різних галузей.

Колінчастий вал є складною інженерною системою, що потребує комплексного підходу до аналізу, включаючи кінематичні, силові та

									Арк.
									7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u>				

триботехнічні аспекти, що визначають його ефективність і надійність у сучасних умовах експлуатації [8].

## 1.2. Конструктивні особливості та умови роботи

Конструкція колінчастого вала характеризується складною просторовою геометрією, що включає корінні та шатунні шийки, щоки, противаги, а також систему масляних каналів. Така структура забезпечує не лише передачу навантаження, але й створює умови для ефективного мащення та охолодження робочих поверхонь. Основним завданням конструкції є забезпечення достатньої жорсткості при мінімальній масі, що особливо актуально для сучасних двигунів, орієнтованих на енергоефективність [6].

Під час роботи колінчастий вал зазнає складного напруженого стану, який формується внаслідок дії газових сил, інерційних навантажень та реакцій опор. Найбільш небезпечними є зони переходу між елементами конструкції, де виникають концентрації напружень. Для їх зменшення застосовуються радіуси заокруглення, поверхневе зміцнення та оптимізація геометрії. Важливим фактором є також точність виготовлення, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до дисбалансу та підвищеного зносу [7].

Особливу роль відіграє система мащення, яка забезпечує формування гідродинамічної плівки між шийками вала та підшипниками ковзання. Це дозволяє значно зменшити коефіцієнт тертя та запобігти безпосередньому контакту поверхонь. Водночас порушення умов мащення може призвести до інтенсивного зношування або заклинювання вузла.

Сьогодні, особлива увага приділяється зниженню маси конструкції без втрати міцності. Це досягається за рахунок використання високоякісних матеріалів, оптимізації форми противаг та застосування сучасних методів розрахунку. Таким чином, конструктивні особливості колінчастого вала визначаються необхідністю забезпечення надійності, довговічності та ефективності роботи в умовах складних експлуатаційних навантажень [8].

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

### 1.3. Сучасні технології виготовлення колінчастих валів

На сьогодні існує кілька основних технологій виготовлення колінчастих валів, серед яких найбільш поширеними є кування, лиття та механічна обробка із суцільної заготовки. Кування забезпечує високі механічні властивості завдяки спрямованій структурі металу, що сприяє підвищенню втомної міцності. Саме тому ковані вали широко застосовуються в умовах високих навантажень [6].

Лиття, зокрема із високоміцного чавуну, дозволяє отримувати деталі складної форми з мінімальними витратами матеріалу. Однак такі вали мають дещо нижчі показники міцності порівняно з кованими. Водночас розвиток технологій лиття, зокрема використання ADI-матеріалів, дозволяє значно покращити їх характеристики [9].

Механічна обробка з прокату або поковок застосовується для виготовлення високоточних валів, зокрема у спеціальних або малосерійних виробництвах. Вона забезпечує високу точність, але супроводжується значними витратами матеріалу та часу.

Сучасні тенденції розвитку технологій спрямовані на зменшення матеріаломісткості та підвищення ефективності виробництва. На зараз активно розвиваються адитивні технології та порошкова металургія, що дозволяють виготовляти деталі складної форми з мінімальними відходами [10].

Вибір технології виготовлення колінчастого вала визначається балансом між механічними властивостями, економічною доцільністю та вимогами до експлуатаційних характеристик виробу.

### 1.4. Перспективи застосування порошкової металургії

Порошкова металургія є перспективним напрямом розвитку сучасного машинобудування, який дозволяє отримувати деталі складної форми з високою точністю та мінімальними витратами матеріалу. Основною

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перевагою цього методу є можливість формування заготовок, близьких до кінцевої форми, що значно зменшує обсяг механічної обробки [4].

Застосування порошкової металургії для виготовлення елементів колінчастого вала відкриває нові можливості щодо оптимізації конструкції. Зокрема, стає можливим створення модульних конструкцій, де окремі елементи виготовляються незалежно, а потім з'єднуються в єдиний вузол. Це дозволяє підвищити технологічність виробництва та знизити його собівартість.

Водночас існують і певні обмеження, пов'язані з пористістю матеріалу, складністю з'єднання елементів та необхідністю забезпечення високих механічних властивостей. Тому застосування порошкової металургії потребує ретельного інженерного обґрунтування, зокрема проведення розрахунків міцності та аналізу напружено-деформованого стану [10].

У сучасних умовах України розвиток порошкової металургії є перспективним напрямом, що дозволяє зменшити залежність від імпорتنих матеріалів та підвищити конкурентоспроможність вітчизняного виробництва.

### 1.5. Актуальність дослідження та напрямки розвитку

Актуальність дослідження колінчастих валів обумовлена необхідністю підвищення ефективності та надійності машин в умовах сучасної економіки України. Зростання вимог до енергоефективності, екологічності та ресурсоощадності виробництва стимулює пошук нових конструктивних і технологічних рішень [8].

Одним із перспективних напрямів є перепроєктування традиційних конструкцій із урахуванням можливостей сучасних технологій, таких як порошкова металургія. Це дозволяє не лише знизити витрати на виробництво, але й підвищити експлуатаційні характеристики виробів.

Важливим напрямом розвитку є також використання комп'ютерного моделювання та числових методів аналізу, які дозволяють прогнозувати

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поведінку конструкції на етапі проєктування. Це значно скорочує час розробки та підвищує точність інженерних рішень [10].

Дослідження можливості виготовлення елементів колінчастого вала методами порошкової металургії є актуальним завданням, що відповідає сучасним тенденціям розвитку машинобудування.

#### Висновки до розділу 1

У розділі 1 було розглянуто загальні принципи роботи двигунів внутрішнього згоряння та роль колінчастого вала як одного з ключових елементів силової установки.

Встановлено, що колінчастий вал забезпечує перетворення зворотно-поступального руху поршня в обертальний рух, який передається на трансмісію. Ефективність цього процесу безпосередньо впливає на загальні показники двигуна, зокрема його потужність, економічність та надійність.

Показано, що умови роботи колінчастого вала характеризуються складним поєднанням змінних навантажень, високих контактних напружень і динамічних впливів, що обумовлює підвищені вимоги до матеріалів, конструкції та технології виготовлення. Особливої уваги потребує забезпечення втомної міцності та довговічності, оскільки вал працює в умовах циклічного навантаження.

Проаналізовано сучасні тенденції розвитку двигунобудування, які спрямовані на підвищення ефективності, зменшення маси та зниження вартості виробництва. У цьому контексті вдосконалення конструкції колінчастого вала є одним із пріоритетних напрямів, що потребує комплексного підходу з урахуванням як експлуатаційних, так і технологічних факторів.

Встановлено, що вибір конструктивних рішень для колінчастого вала повинен базуватися на поєднанні вимог до міцності, жорсткості, врівноваження та технологічності виготовлення. Це особливо актуально в

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

умовах переходу до сучасних методів виробництва, зокрема порошкової металургії.

Таким чином, результати аналізу, проведеного у розділі 1, дозволяють сформулювати загальні вимоги до колінчастого вала та визначити основні напрями його вдосконалення. Отримані положення є теоретичною основою для подальшого дослідження конструкції, матеріалів і технологій виготовлення, що детально розглянуті у розділі 2.

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						12
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## 2. КОНСТРУКЦІЯ ТА АНАЛІЗ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА

### 2.1. Конструкція колінчастого вала та система його мащення

У даному розділі розглядаються конструктивні особливості колінчастого вала, принципи його роботи, а також система мащення, яка забезпечує надійну експлуатацію вузла в умовах значних механічних і теплових навантажень. Аналіз морфології та умов роботи колінчастого вала є необхідним етапом для подальшого дослідження можливостей його виготовлення із застосуванням сучасних технологій, зокрема порошкової металургії.

Колінчастий вал є складним просторовим механічним елементом, призначеним для перетворення зворотно-поступального руху поршня у обертальний рух вала [1]. Він широко застосовується в бензинових і дизельних двигунах внутрішнього згорання, компресорах, насосах та інших машинах, де необхідна трансформація виду руху. Конструкція колінчастого вала формується з урахуванням кінематичних і силових параметрів двигуна, а також вимог до міцності, жорсткості та балансування.



Рис. 1 – Загальний вигляд колінчастого вала

Основними елементами колінчастого вала є корінні шийки, шатунні шийки, щоки (web), противаги та система мастильних каналів [3]. Корінні шийки забезпечують опору вала в підшипниках ковзання, тоді як шатунні

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

КвРМТВА. 23106.02.01.00

шийки слугують для кріплення шатунів. Передача навантаження від поршня через шатун на вал супроводжується виникненням складного напруженого стану, який включає згин, кручення та контактні напруження [7].

Противаги виконують важливу функцію балансування, компенсуючи інерційні сили та моменти, що виникають під час обертання. Їх правильне розташування і маса є критичними для зменшення вібрацій і підвищення довговічності вузла. Відсутність або некоректне балансування призводить до зростання динамічних навантажень, що негативно впливає на підшипники та інші елементи двигуна [3].

Щоки колінчастого вала з'єднують корінні та шатунні шийки, забезпечуючи передачу зусиль між ними. У місцях переходу між елементами конструкції виконуються радіуси заокруглення (галтели), які зменшують концентрацію напружень і підвищують втомну міцність деталі [7]. Саме ці зони є найбільш критичними з точки зору зародження тріщин і подальшого руйнування.

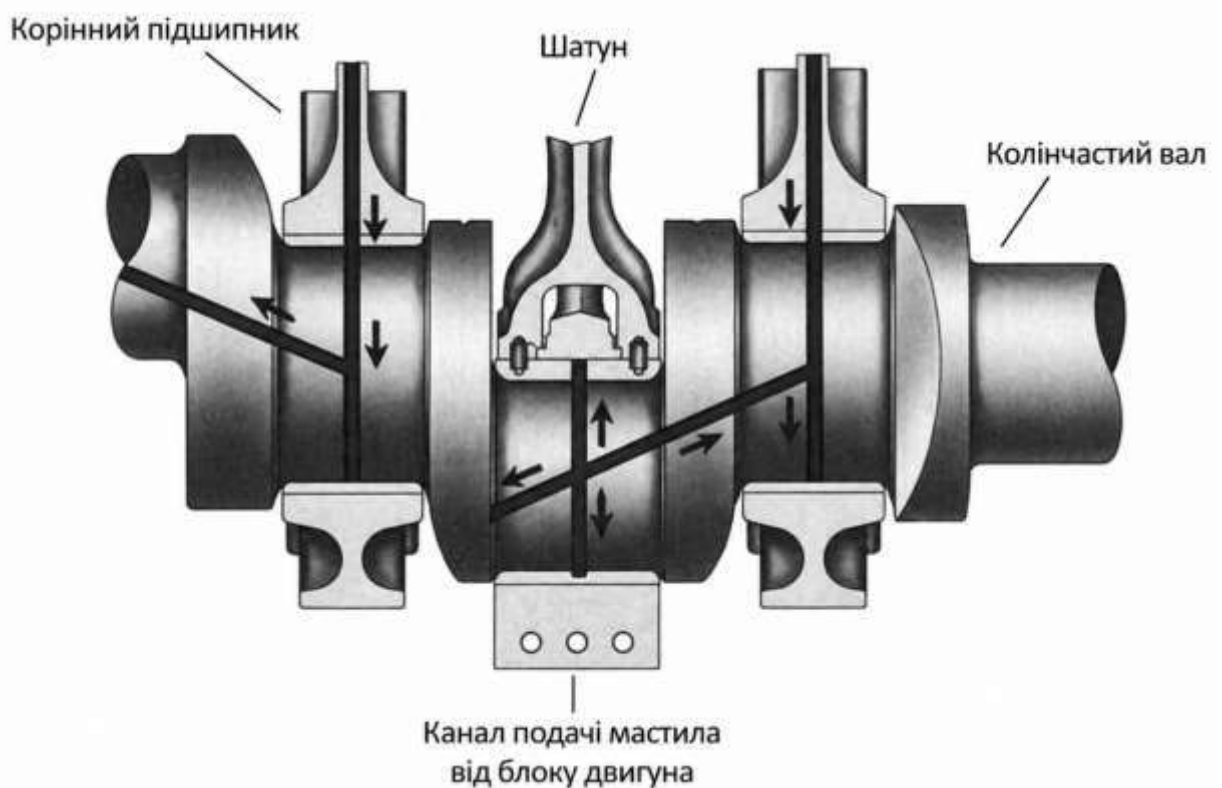


Рис. 2 – Схема системи мащення колінчастого вала

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

*КвРМТВА. 23106.02.01.00*

Арк.

14

Важливою складовою конструкції є система мастильних каналів, виконаних у вигляді свердлінь, які забезпечують подачу мастила до робочих поверхонь підшипників. Ці канали з'єднують корінні та шатунні шийки, утворюючи замкнену систему циркуляції мастила.

Система мащення колінчастого вала є невід'ємною частиною загальної системи мащення двигуна і відіграє ключову роль у забезпеченні його надійної роботи. У сучасних двигунах застосовується примусова система мащення, в якій мастило подається під тиском за допомогою масляного насоса. Потік мастила проходить через канали в блоці двигуна до корінних підшипників, а звідти через внутрішні канали колінчастого вала надходить до шатунних шийок.

У зоні контакту шийки вала з підшипником формується гідродинамічний масляний клин, який створює тонку плівку мастила між поверхнями [2]. Це дозволяє уникнути прямого металевого контакту, зменшити коефіцієнт тертя та суттєво знизити зношування. Ефективність цього процесу залежить від тиску мастила, його в'язкості, температури та швидкості обертання вала [8].

Окрім мащення підшипників, система забезпечує також охолодження елементів двигуна. Через спеціальні форсунки мастило подається до нижньої частини поршня та стінок циліндра, що сприяє відведенню тепла та стабілізації температурного режиму [2]. Таким чином, мастило виконує не лише трибологічну, а й тепловідвідну функцію.

Умови роботи колінчастого вала характеризуються високими швидкостями обертання, значними навантаженнями та змінними температурними режимами. Це обумовлює необхідність комплексного підходу до його проектування, що включає оптимізацію геометрії, вибір матеріалу та забезпечення ефективної системи мащення [6]. Саме поєднання конструктивних і триботехнічних рішень визначає ресурс і надійність роботи колінчастого вала в сучасних умовах експлуатації.

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15



витрати матеріалу. Крім того, застосування мікролегованих сталей дозволяє відмовитися від окремих операцій термічної обробки, що також позитивно впливає на економічні показники виробництва.

Альтернативним методом є лиття, зокрема із високоміцного чавуну. Такий підхід забезпечує можливість виготовлення складних за формою деталей із високою точністю та мінімальними витратами матеріалу. Особливого поширення набуло лиття з використанням ADI (austempered ductile iron), яке забезпечує покращені механічні властивості порівняно зі звичайним чавуном [9]. Однак литі колінчасті вали поступаються кованим за показниками втомної міцності, що обмежує їх використання в умовах високих навантажень.

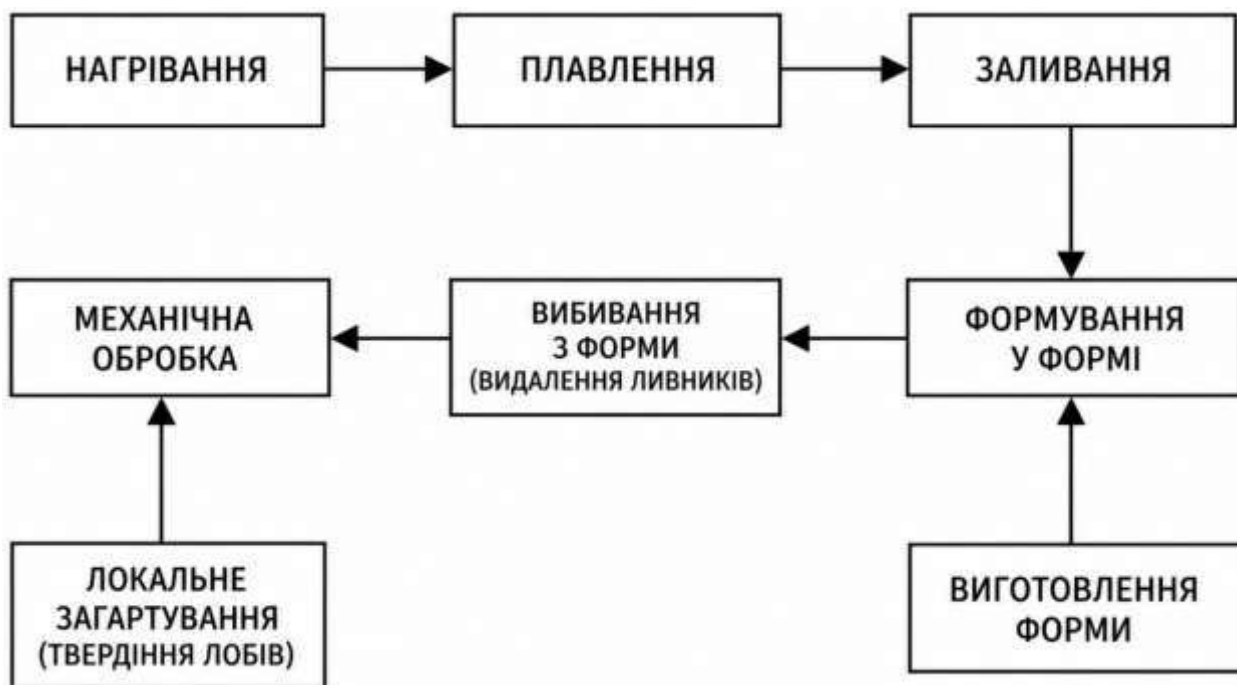


Рис. 4 – Технологічна схема лиття колінчастого вала

Механічна обробка є обов'язковим етапом виготовлення колінчастих валів незалежно від способу отримання заготовки. У сучасному виробництві широко застосовуються високоточні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), що дозволяють виконувати комплекс операцій, таких як токарна обробка, фрезерування, свердління, шліфування та полірування [8]. Використання комбінованих технологій, наприклад turn-milling, забезпечує підвищення точності та продуктивності обробки.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Особливу увагу приділяють обробці отворів для подачі мастила, які мають складну просторову конфігурацію. Для їх виготовлення застосовується глибоке свердління з використанням спеціалізованих інструментів, таких як гарматні свердла. Точність виконання цих каналів є критичною для забезпечення ефективної системи мащення.

Формування галтелей та канавок у зонах переходу між шийками виконується з метою зниження концентрації напружень. Ці операції зазвичай включають чорнову та чистову обробку, після чого можуть застосовуватися додаткові методи зміцнення. Одним із таких методів є накочування галтелей, яке дозволяє створити залишкові стискаючі напруження та підвищити втомну міцність виробу [7].

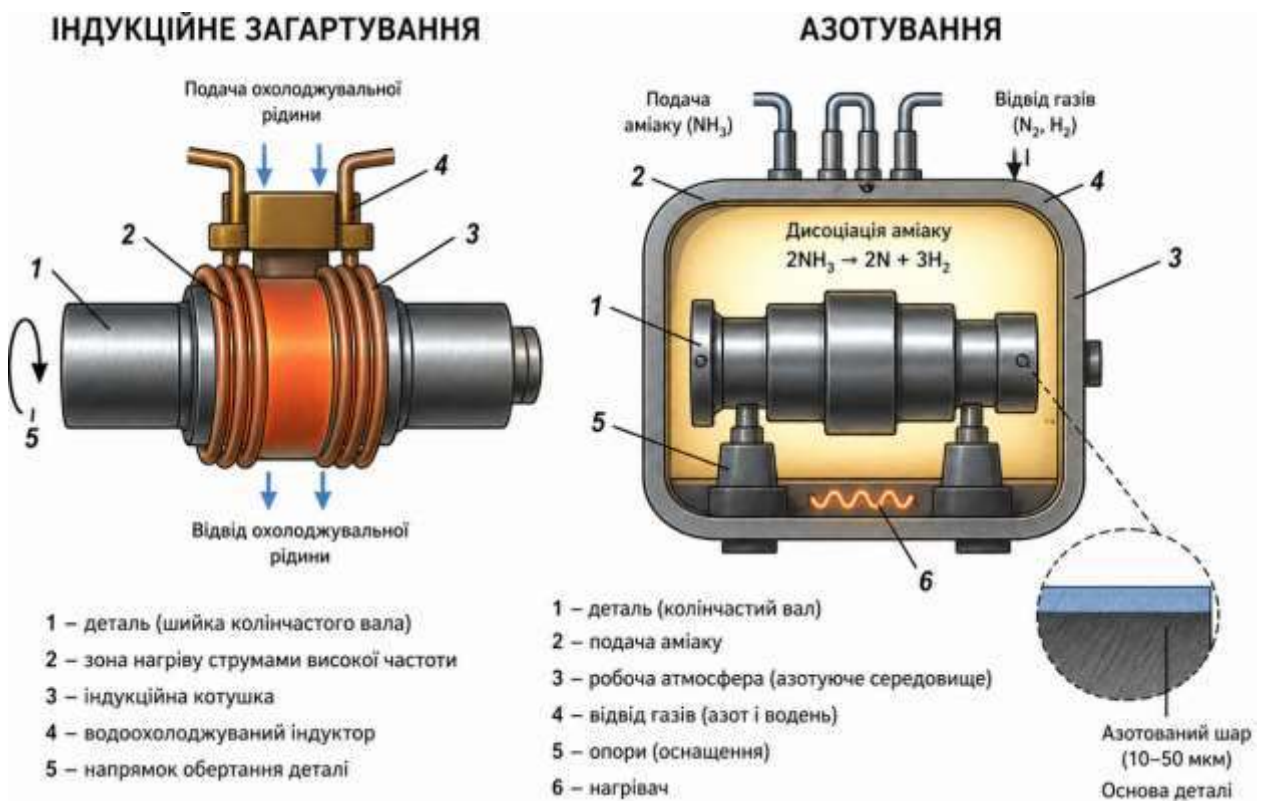


Рис. 5 – Схема індукційного загартування або азотування

Для підвищення зносостійкості та довговічності колінчастих валів широко застосовуються методи термічної та хіміко-термічної обробки. Зокрема, індукційне загартування шийок забезпечує зміцнення поверхневого шару, що працює в умовах тертя. Іншим ефективним методом є азотування,

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА. 23106.02.01.00

Арк.

18

при якому відбувається насичення поверхні азотом з утворенням твердого зносостійкого шару [10]. Це дозволяє підвищити межу витривалості та зменшити інтенсивність зношування.

Фінішна обробка є завершальним етапом технологічного процесу та включає шліфування і полірування робочих поверхонь. Якість обробки шийок має вирішальне значення для забезпечення нормальної роботи підшипників ковзання. Наявність мікронерівностей або задирок може призвести до порушення гідродинамічного режиму мащення і, як наслідок, до прискореного зношування.

У сучасному машинобудуванні все більшого значення набуває інтеграція цифрових технологій у виробничий процес. Використання CAD/CAM/CAE систем дозволяє оптимізувати конструкцію колінчастого вала ще на етапі проектування, а також забезпечити високу точність виготовлення. Це сприяє зниженню виробничих витрат, підвищенню якості продукції та скороченню термінів розробки [12].

Крім того, сучасні дослідження спрямовані на впровадження ресурсоефективних технологій виготовлення, що дозволяють мінімізувати відходи матеріалу та енергоспоживання. Зокрема, використання гібридних виробничих процесів та цифрових двійників відкриває нові можливості для підвищення ефективності виробництва [13].

Технології виготовлення та механічної обробки колінчастих валів постійно вдосконалюються, що зумовлено необхідністю підвищення ефективності виробництва та забезпечення високих експлуатаційних характеристик виробів.

### 2.3. Матеріали колінчастих валів та їх властивості

Матеріали колінчастих валів та їх властивості Вибір матеріалу для виготовлення колінчастого вала є одним із ключових факторів, що визначає його експлуатаційні характеристики, зокрема міцність, втомну довговічність,

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зносостійкість та стійкість до динамічних навантажень. У сучасному машинобудуванні застосовуються як сталі, так і високоміцні чавуни, причому вибір конкретного матеріалу залежить від умов експлуатації, рівня навантаження та вимог до ресурсу виробу.

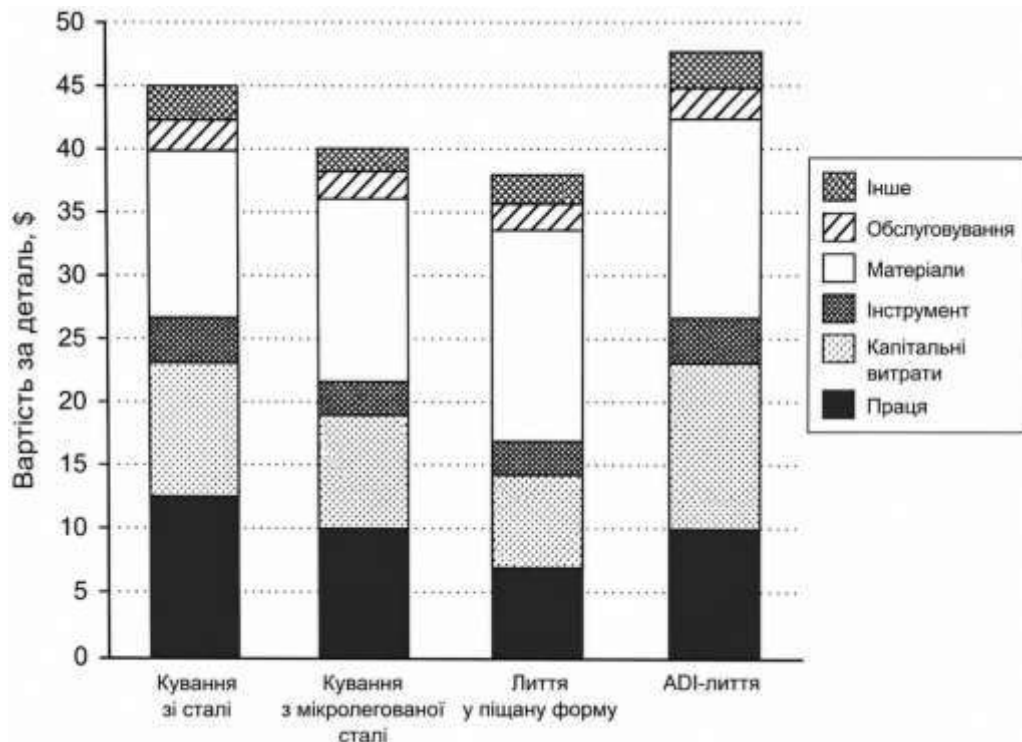


Рис. 6 – Розподіл вартості колінчастих валів для альтернативних технологічних процесів

Найбільш поширеними матеріалами для виготовлення колінчастих валів є леговані конструкційні сталі, такі як 42CrMo4, 40X, 38X2MЮА та інші їх аналоги. Ці сталі характеризуються високою міцністю, хорошою прокаліюваністю та здатністю до термічного зміцнення. Завдяки легуванню хромом, молібденом та іншими елементами забезпечується підвищена стійкість до втомного руйнування, що є критично важливим для деталей, які працюють в умовах циклічних навантажень [10].

Таблиця 2.1. Хімічний склад типових сталей для колінчастих валів

Марка сталі	C, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	Mn, %	Si, %
40ХН2МА	0,36–0,44	0,5–0,8	1,3–1,7	0,15–0,30	0,5–0,8	0,17–0,37
40Х	0,36–0,44	0,8–1,1	–	–	0,5–0,8	0,17–0,37
38Х2МЮА	0,35–0,42	1,3–1,7	–	0,15–0,25	0,3–0,6	0,17–0,37

Ковані сталеві колінчасті вали мають спрямовану волокнисту структуру, яка формується в процесі пластичної деформації. Така структура дозволяє ефективно протидіяти розвитку тріщин, оскільки волокна орієнтовані вздовж напрямку основних навантажень. Це забезпечує значно вищу втомну міцність порівняно з литими аналогами, що робить їх переважним вибором для високонавантажених двигунів [11].

Альтернативою сталям є високоміцні чавуни з кулястим графітом (nodular cast iron), зокрема матеріали типу ADI (austempered ductile iron). Вони поєднують достатню міцність із хорошими литтєвими властивостями, що дозволяє виготовляти складні за формою деталі з мінімальними витратами. Важливою перевагою таких матеріалів є їх здатність демпфувати вібрації, що позитивно впливає на роботу двигуна. Однак у порівнянні зі сталями вони мають нижчу втомну міцність, що обмежує їх використання в умовах високих навантажень [9].

Таблиця 2.2. Порівняння властивостей сталей і чавунів

Матеріал	Границя міцності, МПа	Твердість, НВ	Втомна міцність	Демпфування
40ХН2МА	950–1200	260–340	Дуже висока	Низьке
40Х	800–1000	230–300	Середня	Низьке
ВЧ60 + аустемперінг*	800–10000	250–350	Середня	Високе

\* Аустемперінг – ізотермічна термообробка, в результаті якої формується бейнітна або аусферитна структура, що забезпечує поєднання високої міцності, зносостійкості та підвищеної в’язкості за рахунок наявності стабілізованого залишкового аустеніту.

Суттєвий вплив на властивості матеріалу має термічна обробка, яка дозволяє формувати необхідну структуру і механічні характеристики. Зокрема, загартування з подальшим відпуском забезпечує оптимальне поєднання міцності та в’язкості. Індукційне загартування застосовується для локального зміцнення поверхні шийок, що працюють в умовах інтенсивного тертя. Це дозволяє підвищити твердість поверхневого шару без значного зниження пластичності серцевини [10].



невеликі добавки ванадію, ніобію або титану, що сприяє формуванню дрібнозернистої структури та підвищенню міцності [15].

Крім того, у сучасному машинобудуванні активно досліджуються можливості застосування порошкових матеріалів для виготовлення окремих елементів колінчастих валів. Порошкова металургія дозволяє отримувати матеріали з керованою пористістю та складом, що відкриває нові можливості для оптимізації властивостей. Однак такі матеріали потребують додаткового дослідження щодо їх втомної міцності та надійності в умовах реальної експлуатації [4].

Таблиця 2.3. Матеріали порошкової металургії для виготовлення елементів колінчастого вала

Марка порошку	Основа	Легування	Особливості
Fe–C	Залізо	Вуглець	Базовий матеріал, дешевий
Fe–Cu–C	Залізо	Мідь, C	Підвищена міцність
Fe–Ni–Mo	Залізо	Нікель, Мо	Висока втомна міцність
Distaloy AE **	Залізо	Ni, Cu, Mo	Високі механічні властивості
Astaloy CrM **	Залізо	Cr, Mo	Добра прокалюваність

\*\* Порошкові матеріали типу Distaloy AE та Astaloy CrM не мають прямих аналогів за номенклатурою в Україні, однак їх функціональні властивості можуть бути відтворені шляхом використання відповідно дифузійно-легованих та попередньо легованих порошкових систем на основі Fe–Cu–Ni–Mo та Fe–Cr–Mo.

Серед таких матеріалів широко використовуються порошкові системи типу Distaloy AE та Astaloy CrM, розроблені компанією Höganäs. Вони відносяться до різних класів порошків за способом легування, що визначає їх структуру та експлуатаційні характеристики.

Distaloy AE є дифузійно-легованим порошком на основі заліза, що містить нікель, мідь та молібден. Його особливістю є те, що легувальні елементи частково дифузійно закріплені на поверхні частинок, що забезпечує добру ущільнюваність при пресуванні та достатню пластичність матеріалу. Типовий склад включає близько 4% Ni, 1.5% Cu та 0.5% Mo [17]. Такі порошки

дозволяють отримувати матеріали із середнім рівнем міцності та хорошими технологічними властивостями.

На відміну від нього, Astaloy CrM є попередньо легованим порошком, у якому легувальні елементи (хром і молібден) введені на стадії плавки. Це забезпечує більш однорідну структуру та підвищену втомну міцність. Типовий склад становить приблизно 3% Cr та 0.5% Mo [17]. Завдяки цьому такі матеріали широко застосовуються для виготовлення відповідальних деталей, що працюють під дією змінних навантажень.

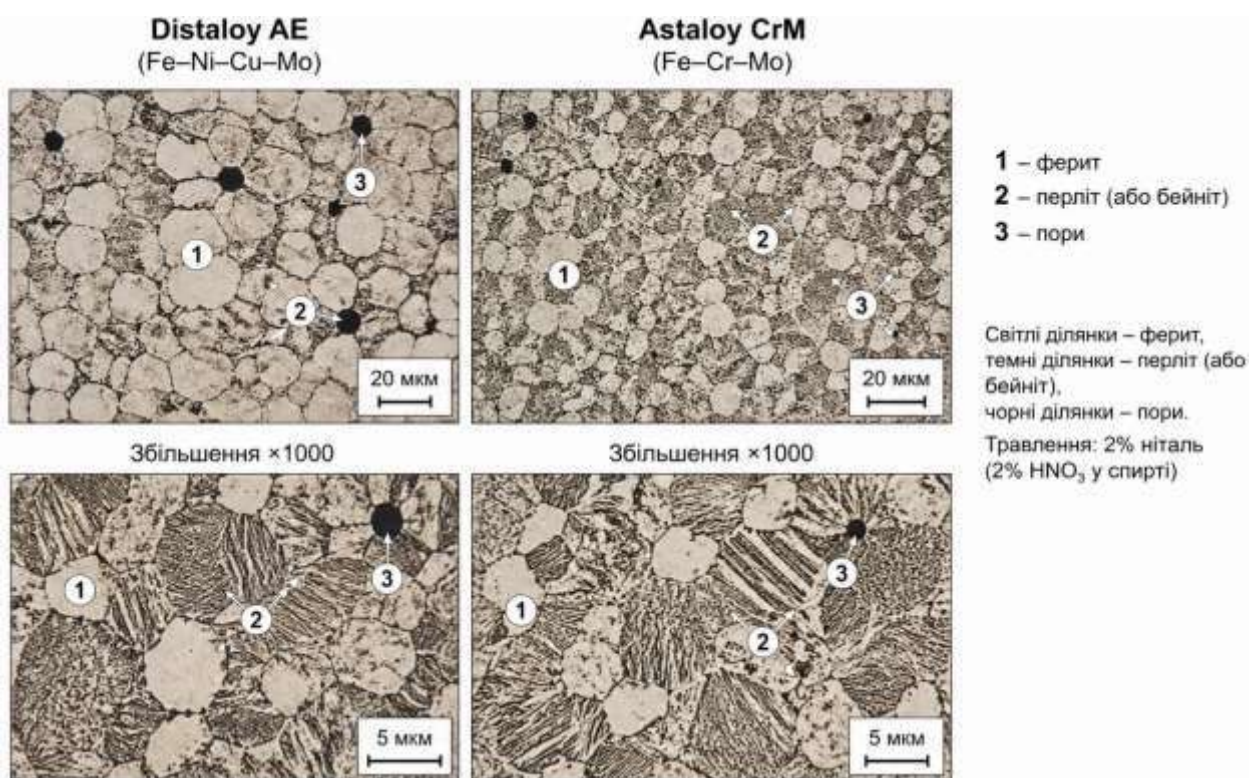


Рис. 8 – Мікроструктура порошкових матеріалів після спікання при 1120 °C

Важливо зазначити, що зазначені матеріали є комерційними продуктами і не мають прямих аналогів за номенклатурою в Україні. Однак їх функціональні властивості можуть бути відтворені шляхом використання відповідних порошкових композицій на основі заліза з легуванням необхідними елементами. Зокрема, для відтворення властивостей Distaloy AE можуть використовуватись суміші порошоків Fe-Cu-Ni-Mo, тоді як для Astaloy CrM – попередньо леговані системи Fe-Cr-Mo.

						<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
							24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Використання таких матеріалів у виробництві елементів колінчастих валів дозволяє значно знизити витрати матеріалу, підвищити коефіцієнт використання металу та забезпечити стабільність властивостей. Крім того, можливість керування структурою та складом відкриває перспективи для оптимізації триботехнічних характеристик, зокрема зносостійкості та втомної довговічності.

Таблиця 2.4. Механічні властивості матеріалів з порошкової металургії

Матеріал	Щільність, г/см <sup>3</sup>	Границя міцності, МПа	Твердість, НВ	Втомна міцність
Fe–C (спечений)	6,8–7,2	400–600	120–180	Низька
Fe–Cu–C	7,0–7,3	500–700	150–220	Середня
Fe–Ni–Mo	7,2–7,5	700–900	200–280	Висока
НІР-матеріали	~7,8	900–1200	250–350	Дуже висока

Для виготовлення колінчастих валів застосовуються як традиційні технології пластичної деформації (кування), так і інноваційні методи порошкової металургії (РМ). Кожен із цих підходів має свої переваги та обмеження, що визначають область їх ефективного застосування.

Таблиця 2.5. Порівняння технологій виготовлення колінчастих валів

Критерій	Кування	Порошкова металургія (РМ)
Структура	Волокниста, орієнтована	Пориста або щільна (залежно від процесу)
Втомна міцність	Дуже висока	Середня – висока (залежить від щільності)
Щільність	≈100%	85–98% (до 100% при НІР)
Точність форми	Середня (потрібна обробка)	Висока (near-net-shape)
Витрати матеріалу	Високі (відходи)	Низькі
Механічна обробка	Значна	Мінімальна
Склад матеріалу	Обмежений	Гнучкий (легування)
Собівартість	Вища при малих серіях	Ефективна при масовому виробництві
Дефекти	Мінімальні	Пористість
Застосування	Високонавантажені вали	Середньонавантажені, модульні конструкції

Кування забезпечує формування спрямованої волокнистої структури матеріалу, що значно підвищує втомну міцність та надійність деталей. Саме тому ця технологія є основною для виготовлення високонавантажених колінчастих валів, зокрема для двигунів внутрішнього згорання великої потужності.

Водночас порошкова металургія дозволяє отримувати деталі складної геометрії з мінімальними відходами матеріалу. Завдяки можливості формування виробів, близьких до кінцевої форми, значно зменшується обсяг механічної обробки. Крім того, порошкові матеріали забезпечують гнучкість у керуванні хімічним складом і структурою.

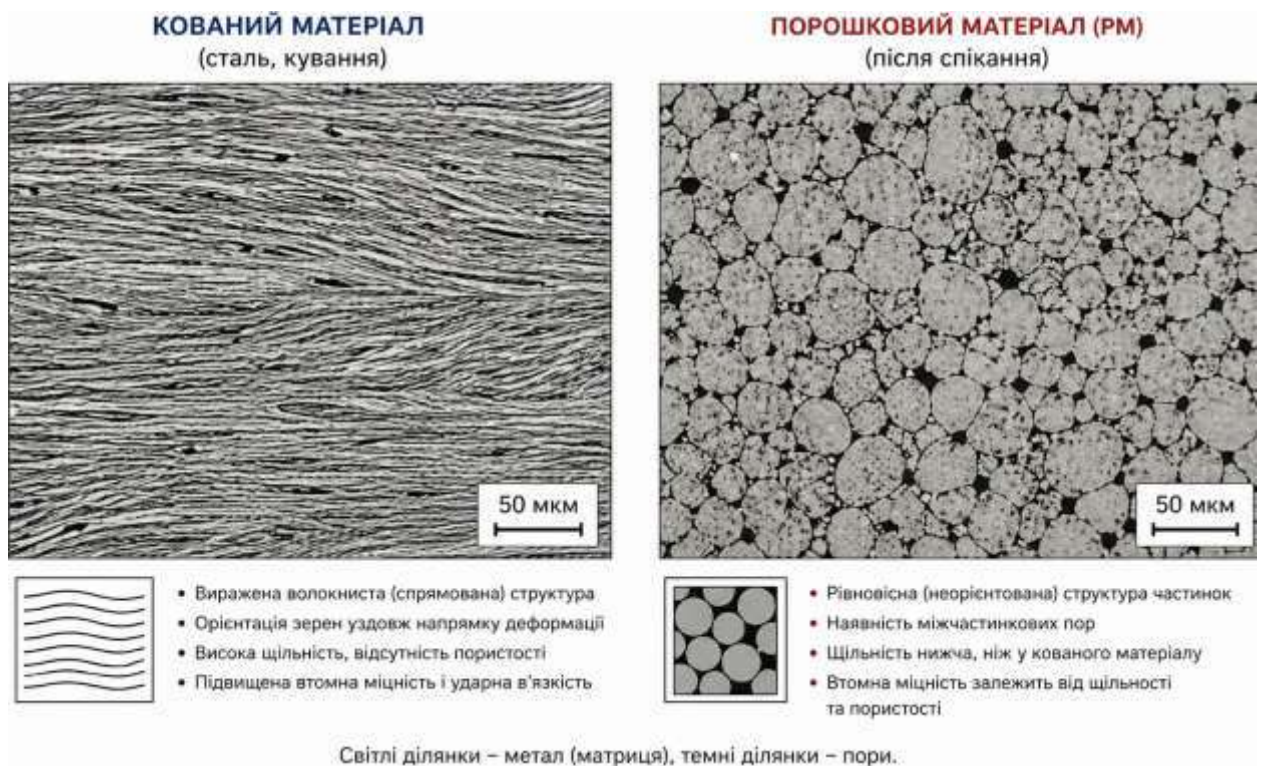


Рис. 9 – Порівняння структури кованого та порошкового матеріалу

Ключовою перевагою кування є забезпечення максимальної щільності матеріалу та сприятливої волокнистої структури, що суттєво підвищує опір втомному руйнуванню. Це робить ковані колінчасті вали незамінними у відповідальних конструкціях, де критичним є ресурс роботи.

Порошкова металургія, у свою чергу, забезпечує значну економію матеріалу та високу точність геометрії, що особливо важливо в умовах

масового виробництва. Однак наявність залишкової пористості може негативно впливати на втомну довговічність, що обмежує застосування таких валів у високонавантажених вузлах.

Сучасні технології, такі як гаряче ізостатичне пресування (HIP), дозволяють усунути пористість і підвищити щільність матеріалу до рівня, близького до кованих виробів. Це відкриває перспективи для використання порошкової металургії у виготовленні відповідальних елементів колінчастих валів.

Вибір матеріалу для колінчастого вала є комплексним завданням, яке потребує врахування механічних, технологічних та економічних факторів. Поєднання сучасних матеріалів із ефективними методами їх обробки дозволяє значно підвищити ресурс і надійність роботи колінчастих валів у сучасних машинах.

#### 2.4. Перепроєктування колінчастого вала під технології порошкової металургії

Сучасні тенденції розвитку машинобудування передбачають не лише вдосконалення технологій виготовлення, але й перегляд конструктивних рішень деталей з урахуванням нових виробничих можливостей. У цьому контексті перепроєктування колінчастого вала під технології порошкової металургії є перспективним напрямом, що дозволяє поєднати високі експлуатаційні характеристики з економічною ефективністю виробництва.

Традиційна конструкція колінчастого вала орієнтована на виготовлення методом кування, що обумовлює наявність суцільної геометрії з урахуванням технологічних припусків на механічну обробку. У випадку застосування порошкової металургії виникає можливість переходу до модульної або сегментованої конструкції, де окремі елементи (щоки, шатунні шийки, противаги) виготовляються незалежно з подальшим складанням у єдиний вузол [18].

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Сучасні CAD/CAE системи відіграють важливу роль у процесі перепроєктування, дозволяючи моделювати напружено-деформований стан конструкції та оптимізувати її параметри ще на етапі розробки. Це дає змогу врахувати вплив пористості, неоднорідності матеріалу та умов навантаження, що є критично важливим для деталей, які працюють у складних умовах.

Застосування порошкової металургії також відкриває можливість інтеграції додаткових функціональних елементів безпосередньо у конструкцію вала, наприклад, внутрішніх каналів складної форми або зон локального зміцнення. Це дозволяє підвищити ефективність роботи вузла та зменшити кількість додаткових операцій обробки.

Порошкова металургія (PM, від англ. Powder Metallurgy) — це технологічний процес, призначений для виготовлення великих серій однакових металевих виробів. Порошкова металургія є промисловим методом серійного виробництва середніх і великих партій металевих деталей заданої форми з такими фізико-механічними властивостями, які в більшості випадків дозволяють використовувати їх без подальшої механічної обробки.

Технологічний процес розпочинається зі змішування легувальних компонентів у порошкоподібному стані з метою досягнення максимальної однорідності суміші. Ця операція здійснюється у спеціальних змішувачах. До складу порошкової суміші обов'язково вводиться мастильна добавка, яка виконує дві основні функції під час пресування: зменшує тертя між порошком і інструментом, а також сприяє зв'язуванню частинок порошку між собою.

Після змішування порошок подається у завантажувальні бункери преса, де відбувається формування заготовки шляхом ущільнення. Процес пресування забезпечується синхронізованим переміщенням елементів прес-інструменту. Пуансон здійснює задані переміщення відносно матриці, у результаті чого формується деталь необхідної форми. Після завершення ущільнення готова заготовка автоматично виштовхується з прес-форми.

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

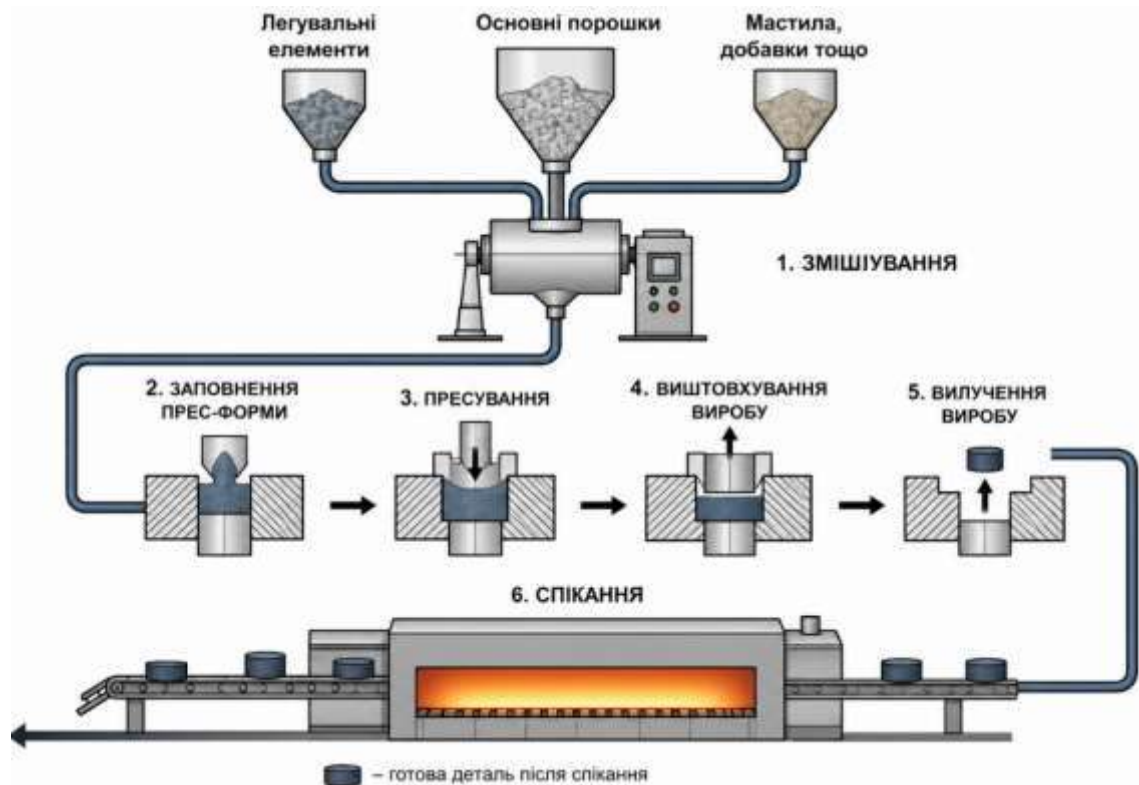


Рис. 11 – Повний цикл виготовлення виробу порошкової металургії

Рисунок 11 ілюструє типовий повний цикл технологічного процесу порошкової металургії. Під час пресування порошкової суміші в матриці за допомогою пуансонів відбувається зменшення міжчастинкового простору. У результаті дії контактних і тертювих сил між частинками виникає їх часткова пластична деформація, а також локальне мікрозварювання. Саме ці міжчастинкові зв'язки формують так звану «зелену міцність» (green strength) заготовки – початкову механічну міцність після ущільнення. Хоча ця міцність є відносно невисокою, вона достатня для транспортування та подальшого спікання без руйнування деталі.

Для забезпечення повноцінного ущільнення необхідно витримувати максимальний тиск пресування протягом часу, достатнього для завершення пластичної деформації частинок. У процесі пресування порошок взаємодіє зі стінками матриці, створюючи радіальний тиск, який становить приблизно 50–70 % від осевого. Це призводить до інтенсивного зношування прес-інструменту, однак введення мастильних добавок на стадії змішування дозволяє значно зменшити тертя та запобігти передчасному зносу.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КвРМТВА. 23106.02.01.00

Арк.

30

Суттєвим фактором є також пружна деформація елементів прес-інструменту (матриці, пуансонів) та самої заготовки. Ці деформації необхідно враховувати на етапі проєктування, оскільки вони впливають на точність геометрії та ускладнюють процес виштовхування деталі з прес-форми.

Після формування заготовка піддається спіканню з метою отримання необхідних механічних властивостей. Спікання є процесом термічної обробки, що полягає у нагріванні деталі до заданої температури в контрольованому середовищі з подальшим охолодженням. Швидкість охолодження істотно впливає на структуру та властивості матеріалу. У процесі спікання мастильні добавки випаровуються, проходячи крізь порову систему, що сформувалась між частинками.

Після базових операцій порошкової металургії (пресування та спікання) отримані вироби не завжди повністю відповідають вимогам щодо точності розмірів і механічних характеристик. Тому у виробничий процес вводяться вторинні операції, які дозволяють покращити якість продукції.

Однією з таких операцій є калібрування (sizing), що забезпечує досягнення заданих розмірів і допусків. Деталь повторно поміщається у прецизійну матрицю та піддається додатковому пластичному деформуванню, що супроводжується зменшенням пористості. Цей процес дозволяє компенсувати деформації після спікання та зменшити розкид розмірів. Водночас калібрування не дозволяє усунути ексцентриситет або змінити положення отворів.

Повторне пресування (repressing) застосовується для підвищення механічних властивостей виробу. Після спікання деталь знову пресується у матриці при певних навантаженнях, що призводить до збільшення щільності матеріалу. Важливою умовою ефективності цього процесу є відсутність мастила після спікання, що забезпечує кращу взаємодію частинок. Після повторного пресування необхідне відновлення структури матеріалу шляхом нагрівання до температури рекристалізації з подальшим повільним

									Арк.
									31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u>				

охолодженням. Інфільтрація є процесом заповнення пор спеченого матеріалу розплавленим легувальним компонентом. У результаті підвищується щільність, міцність і зносостійкість виробу. Цей метод є ефективним для покращення експлуатаційних характеристик деталей, що працюють під навантаженням.

Видалення задирок (deburring) виконується після спікання і полягає у механічній обробці поверхні (шліфування, токарна обробка) для усунення дефектів, що виникли під час пресування. Процеси з'єднання деталей у порошкній металургії застосовуються обмежено через наявність пористості, яка ускладнює отримання надійних з'єднань. Найбільш поширеним методом є паяння, однак загалом з'єднання РМ-деталей залишається складним технологічним завданням.

Термічна обробка широко використовується для покращення властивостей порошкових матеріалів. При цьому наявність пор вимагає коригування температурних режимів і тривалості обробки. Зокрема, застосовуються процеси загартування, відпуску, цементації та азотування з урахуванням специфіки структури порошкових матеріалів.

Однією з ключових переваг порошкової металургії є можливість виготовлення деталей складної геометричної форми з високою точністю та мінімальними відходами матеріалу. Технологія дозволяє отримувати вироби, близькі до кінцевої форми (near-net-shape), що особливо важливо для серійного виробництва. Водночас існує ряд конструктивно-технологічних обмежень, які необхідно враховувати при проектуванні деталей.

Зокрема, геометрія виробу повинна забезпечувати можливість його формування та виштовхування з прес-форми без руйнування. Кут фасок (скосів) зазвичай не повинен перевищувати  $45^\circ$ , при цьому обов'язковою є наявність опорних плоских поверхонь, які контактують із елементами прес-інструменту [20]. Це забезпечує стабільність процесу ущільнення та рівномірний розподіл тиску.

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32



На рисунку 12 представлені типові приклади допустимих і недопустимих геометричних рішень, зокрема: варіанти виконання фасок, радіусів заокруглень, мінімальних товщин стінок та розташування отворів відносно напрямку пресування.

Проектування деталей для порошкової металургії здійснюється відповідно до концепції DFPM (Design for Powder Metallurgy), яка передбачає врахування технологічних можливостей і обмежень процесу ще на етапі розробки конструкції [20]. Цей підхід базується як на теоретичних положеннях, так і на практичному досвіді інженера, що дозволяє оптимізувати форму деталі, зменшити витрати на виготовлення та підвищити її надійність.

Таким чином, ефективне використання порошкової металургії вимагає комплексного підходу до проектування, що враховує як переваги технології, так і її обмеження. Дотримання принципів DFPM дозволяє забезпечити високу якість виробів, їх технологічність та конкурентоспроможність у серійному виробництві.

## 2.5. Висновки до розділу 2

У розділі 2 було проведено комплексний аналіз конструкції колінчастого вала, особливостей його роботи, технологій виготовлення та матеріалів, що застосовуються у сучасному машинобудуванні.

Встановлено, що колінчастий вал є складним за геометрією елементом, який забезпечує перетворення зворотно-поступального руху поршня в обертальний рух і працює в умовах змінних навантажень, високих контактних напружень та гідродинамічного мащення. Конструкція вала включає корінні та шатунні шийки, щоки, противаги та систему мастильних каналів, що забезпечують надійну роботу вузла.

Показано, що ефективність функціонування колінчастого вала значною мірою визначається умовами мащення, геометрією контактних поверхонь і точністю виготовлення. Гідродинамічний режим мащення дозволяє зменшити

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зношування, однак потребує забезпечення стабільних параметрів мастильного середовища.

Проаналізовано основні технології виготовлення колінчастих валів, серед яких найбільш поширеними є кування, лиття та порошкова металургія. Встановлено, що кування забезпечує високу міцність завдяки волокнистій структурі матеріалу, проте супроводжується значними витратами матеріалу та необхідністю подальшої механічної обробки. Лиття дозволяє отримувати складні форми, однак має обмеження щодо механічних властивостей.

Особливу увагу приділено порошковій металургії як перспективній технології виготовлення колінчастих валів. Встановлено, що її основними перевагами є можливість отримання виробів складної форми з мінімальними відходами матеріалу, висока точність та зменшення обсягу механічної обробки. Водночас до обмежень відноситься наявність залишкової пористості та підвищена чутливість до концентрацій напружень.

Розглянуто технологічні особливості процесу порошкової металургії, включаючи змішування порошків, пресування, спікання та вторинні операції. Встановлено, що механічні властивості виробів значною мірою залежать від щільності матеріалу, режимів спікання та подальших операцій обробки.

Проаналізовано сучасні матеріали для виготовлення колінчастих валів, зокрема леговані сталі та порошкові композиції. Показано, що застосування порошкових матеріалів дозволяє гнучко керувати складом і структурою, забезпечуючи необхідні експлуатаційні характеристики.

Окремо розглянуто принципи проектування деталей для порошкової металургії (DFPM), які передбачають врахування технологічних обмежень на етапі розробки конструкції. Встановлено, що дотримання цих принципів дозволяє підвищити технологічність виробів, зменшити витрати та забезпечити необхідний рівень міцності.

Таким чином, результати аналізу, отримані у розділі 2, свідчать про доцільність застосування технологій порошкової металургії для виготовлення

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

колінчастих валів за умови відповідного перепроєктування конструкції.  
Отримані висновки є основою для подальшого аналізу навантажень та обґрунтування конструктивних рішень, що розглянуті у наступному розділі.

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
						36
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

### 3. НАВАНТАЖЕННЯ ТА ВРІВНОВАЖЕННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛА

#### 3.1. Аналіз навантажень у колінчастому валу

Колінчастий вал є одним із найбільш навантажених елементів двигуна внутрішнього згоряння, оскільки він сприймає та передає змінні сили і моменти, що виникають у кривошипно-шатунному механізмі.

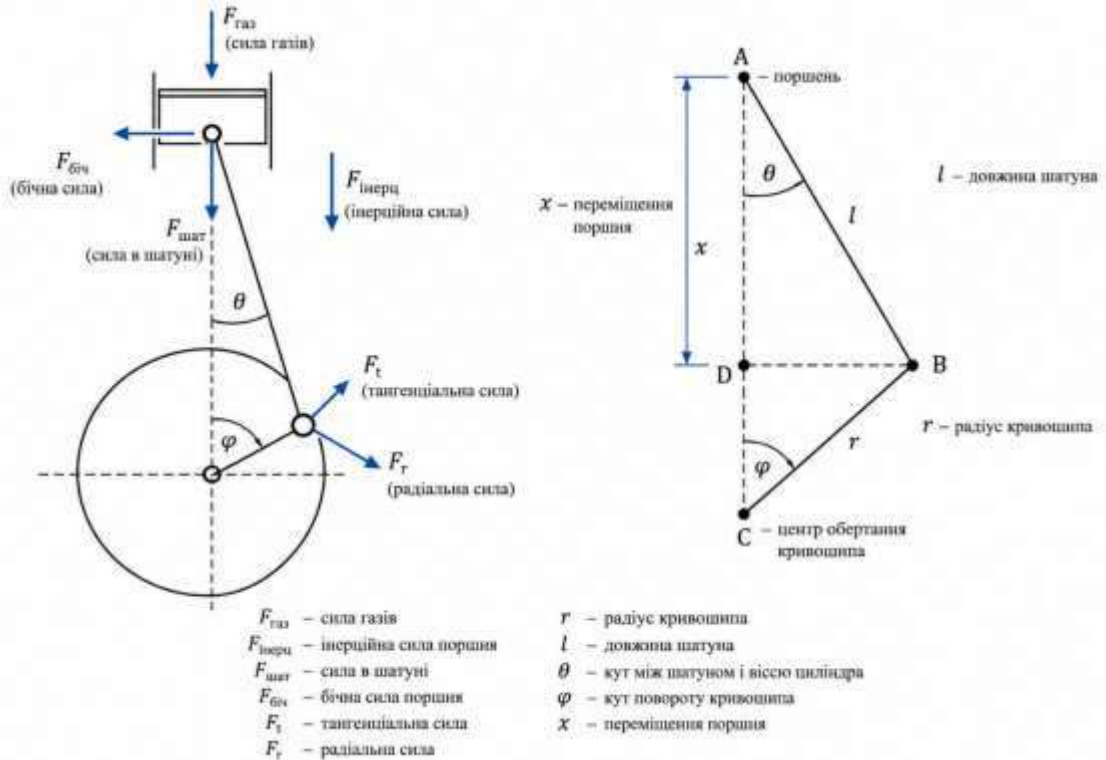


Рис. 13 – Сили та геометрія кривошипно-шатунного механізму

Основними джерелами навантажень є сили тиску газів у циліндрі та сили інерції рухомих мас [1], [3].

Сила газового тиску, що діє на поршень, визначається як:

$$F_g = p \cdot A, \quad (3.1)$$

де:  $p$  – нормальна сила взаємодії;

$A$  – приведений радіус кривизни контактуючих поверхонь.

Ця сила передається через шатун на шатунну шийку колінчастого вала та створює як осьові, так і радіальні компоненти навантаження. Величина та напрямок цієї сили змінюються протягом робочого циклу двигуна, що обумовлює змінний характер напруженого стану вала [21].

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Інерційні сили виникають внаслідок прискореного руху поршня та шатуна і можуть бути визначені за виразом:

$$F_i = m \cdot a, \quad (3.2)$$

де:  $m$  – приведена маса рухомих елементів;

$a$  – прискорення поршня.

Прискорення поршня змінюється залежно від кута повороту колінчастого вала та визначається як:

$$a = r \cdot \omega^2 \left( \cos\theta + \left(\frac{r}{l}\right) \cdot \cos 2\theta \right) \quad (3.3)$$

де:  $r$  – радіус кривошипа,

$l$  – довжина шатуна,

$\omega$  – кутова швидкість,

$\theta$  – кут повороту колінчастого вала.

Сумарне навантаження, що діє на шатунну шийку, формується як сума газових та інерційних сил:

$$F_\Sigma = F_g + F_i, \quad (3.4)$$

Ця сила розкладається на складові, що діють у площині обертання та перпендикулярно до неї, формуючи складний напружено-деформований стан. Внаслідок цього у колінчастому валу виникають згинальні та крутні напруження, які мають змінний характер і є основною причиною втомного руйнування [7].

Особливістю навантаження колінчастого вала є його циклічність, що визначається частотою обертання двигуна. При збільшенні швидкості обертання зростає вплив інерційних сил, які можуть перевищувати сили газового тиску, особливо на високих обертах. Це необхідно враховувати при проектуванні конструкції вала та виборі матеріалу [21].

Крутний момент, що передається валом, визначається як:

$$M = F_t \cdot r, \quad (3.5)$$

де  $F_t$  – тангенціальна складова сили, що діє на шатунну шийку.

					<u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Нерівномірність зміни крутного моменту протягом циклу призводить до виникнення крутильних коливань, що негативно впливають на довговічність вала та пов'язаних елементів. Саме тому конструкція колінчастого вала повинна забезпечувати достатню жорсткість та рівномірний розподіл навантажень.

З точки зору адаптації конструкції під технології порошкової металургії, особливу увагу слід приділяти зонам концентрації напружень – галтелям, переходам перерізів та шийкам. Саме ці ділянки є критичними з точки зору втомної міцності та потребують конструктивної оптимізації з урахуванням можливостей і обмежень РМ-технологій.

Таким чином, аналіз навантажень дозволяє визначити найбільш відповідальні ділянки колінчастого вала та сформулювати вимоги до його конструкції і матеріалу, що є необхідною передумовою для подальшого перепроектування під сучасні технології виготовлення.

### 3.2. Крутний момент та нерівномірність роботи колінчастого вала

Крутний момент колінчастого вала є результатом дії сил, що виникають у кривошипно-шатунному механізмі, і визначає ефективність перетворення зворотно-поступального руху поршня у обертальний рух вала. Його величина змінюється протягом робочого циклу двигуна, що обумовлює нерівномірність обертання та появу крутильних коливань [1], [21].

Основним джерелом крутного моменту є тангенціальна складова сили, що діє на шатунну шийку:

$$M = F_t \cdot r, \quad (3.6)$$

де:  $F_t$  – тангенціальна складова сили,

$r$  – радіус кривошипа.

Тангенціальна сила формується внаслідок розкладання сумарної сили, що передається через шатун:

$$F_\Sigma = F_g + F_i, \quad (3.7)$$

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де:  $F_g$  – сила газового тиску,

$F_i$  – інерційна сила.

З урахуванням геометрії механізму тангенціальна складова дорівнює:

$$F_t = F_\Sigma \cdot \sin(\theta + \varphi), \quad (3.8)$$

де:  $\theta$  – кут нахилу шатуна,

$\varphi$  – кут повороту кривошипа.

Таким чином, крутний момент змінюється залежно від кута повороту колінчастого вала:

$$M(\varphi) = F_\Sigma \cdot r \cdot \sin(\theta + \varphi), \quad (3.9)$$

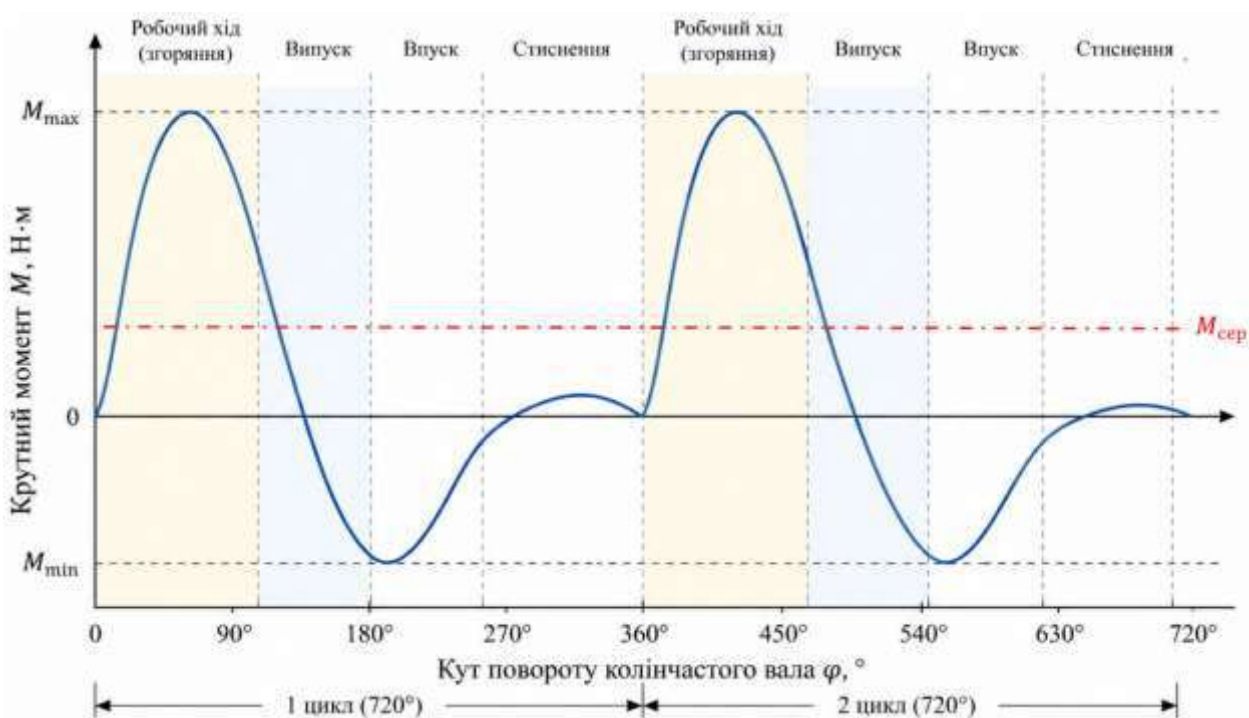


Рис. 14 – Залежність крутного моменту від кута повороту колінчастого вала

Характер зміни крутного моменту є нерівномірним: протягом одного циклу він досягає максимуму в робочому ході та зменшується або навіть змінює знак на інших тактах. Це призводить до виникнення крутильних коливань, які негативно впливають на довговічність деталей і стабільність роботи двигуна [21].

Нерівномірність обертання частково компенсується використанням маховика, який акумулює енергію у періоди надлишкового моменту та віддає

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

її при його зменшенні. Однак навіть за наявності маховика залишаються коливання, які необхідно враховувати при проектуванні колінчастого вала.

Особливо важливим є врахування впливу змінного крутного моменту на втомну міцність. Повторювані цикли навантаження викликають накопичення пошкоджень у матеріалі, що може призводити до утворення тріщин у критичних зонах — галтелях та шийках [7].

З точки зору адаптації конструкції під порошкову металургію, нерівномірність крутного моменту має особливе значення, оскільки пориста структура матеріалу є більш чутливою до циклічних навантажень. Це вимагає оптимізації геометрії вала, рівномірного розподілу маси та мінімізації концентрацій напружень.

### 3.3. Врівноваження колінчастого вала

Врівноваження колінчастого вала є необхідною умовою забезпечення надійної та довговічної роботи двигуна, оскільки наявність неврівноважених мас призводить до виникнення інерційних сил і моментів, що спричиняють вібрації та додаткові навантаження на опори і корпус двигуна [22]. Основною метою врівноваження є зменшення або повна компенсація цих сил і моментів.

У кривошипно-шатунному механізмі маси умовно поділяють на обертові та зворотно-поступальні. Обертові маси (частина шатуна, кривошип, противаги) створюють відцентрові сили, які визначаються за виразом:

$$F_c = m_r \cdot \omega^2 \cdot r, \quad (3.10)$$

де:  $\theta$  – маса, що обертається,

$\omega$  – кутова швидкість,

$r$  – радіус обертання.

Ці сили можуть бути повністю врівноважені шляхом правильного розміщення противаг на колінчастому валу. Умовою статичного врівноваження є рівність нулю результуючої сили:

$$\Sigma F = 0, \quad (3.11)$$

									Арк.
									41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u>				

Динамічне врівноваження передбачає також компенсацію моментів відносно осі обертання:

$$\Sigma M = 0, \quad (3.12)$$

Зворотно-поступальні маси (поршень, частина шатуна) створюють інерційні сили, які змінюються за гармонійним законом і не можуть бути повністю врівноважені конструктивними засобами. Для таких мас визначається сила інерції першого порядку:

$$F^1 = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos\varphi, \quad (3.13)$$

та другого порядку:

$$F^2 = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \left(\frac{r}{l}\right) \cdot \cos 2\varphi, \quad (3.14)$$

де  $m_p$  – маса зворотно-поступальних частин,

$l$  – довжина шатуна,

$\varphi$  – кут повороту колінчастого вала.

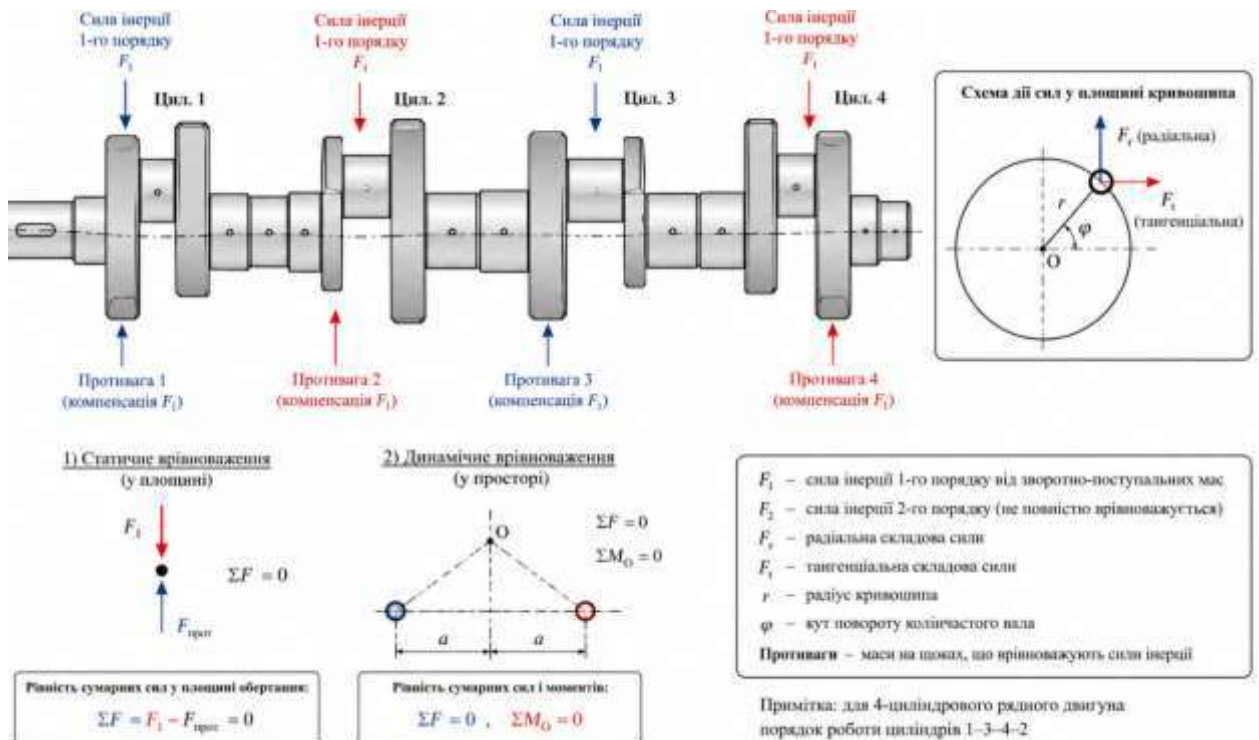


Рис. 15 – Схема врівноваження колінчастого вала

Сили першого порядку можуть бути частково компенсовані противагами, тоді як сили другого порядку зазвичай залишаються неврівноваженими і є джерелом додаткових вібрацій [3].

Для багатоциліндрових двигунів ефективність врівноваження значною мірою залежить від схеми розташування циліндрів і фазового зсуву між кривошипами. У рядних двигунах часткова компенсація інерційних сил досягається за рахунок симетричного розташування циліндрів, однак повне врівноваження можливе лише для окремих конфігурацій.

Практичне врівноваження колінчастого вала здійснюється шляхом підбору мас і геометрії противаг. Коефіцієнт врівноваження визначається як:

$$k = \frac{m_c}{m_p}, \quad (3.15)$$

де  $m_c$  – маса противаг,

$m_p$  – приведена маса зворотно-поступальних частин.

Оптимальне значення коефіцієнта врівноваження залежить від типу двигуна і зазвичай становить 0,5–0,7, що дозволяє досягти компромісу між зменшенням вертикальних і горизонтальних коливань.

З точки зору перепроєктування колінчастого вала під технології порошкової металургії, питання врівноваження набуває особливого значення. Можливість формування складних геометричних форм дозволяє більш гнучко розподіляти масу противаг, однак необхідно враховувати вплив пористості матеріалу на інерційні характеристики та жорсткість конструкції. Тому при проєктуванні необхідно забезпечити оптимальне співвідношення маси, міцності та технологічності.

Таким чином, врівноваження колінчастого вала є комплексним завданням, що включає аналіз мас, геометрії та динамічних навантажень і має вирішальне значення для забезпечення стабільної роботи двигуна та підвищення ресурсу його елементів.

### 3.4. Аналіз мас та конструкції колінчастого вала

Конструкція колінчастого вала визначається умовами навантаження, вимогами до міцності та жорсткості, а також необхідністю забезпечення

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

врівноваження. Ключовим фактором є розподіл мас між окремими елементами вала – корінними та шатунними шийками, щоками і противагами [3].

З точки зору динаміки, маси елементів кривошипно-шатунного механізму доцільно поділяти на обертові та зворотно-поступальні. Обертові маси включають частину шатуна, кривошип та противаги, тоді як зворотно-поступальні — поршень і частину шатуна. Такий поділ дозволяє коректно оцінювати інерційні сили та визначати параметри врівноваження [22].

Загальна маса колінчастого вала може бути представлена як:

$$m = m_{ш} + m_{кш} + m_{пр}, \quad (3.16)$$

де  $m_{ш}$  – маса шийок,

$m_{кш}$  – маса щік,

$m_{пр}$  – противаг.

Важливою характеристикою є розподіл маси відносно осі обертання, що визначає момент інерції:

$$J = \Sigma(m_i \cdot r_i^2), \quad (3.17)$$

де:  $m_i$  – маса елемента,

$r_i$  – відстань до осі обертання.

Збільшення моменту інерції сприяє зменшенню нерівномірності обертання, однак водночас призводить до підвищення інерційних навантажень. Тому при проектуванні необхідно забезпечити оптимальний баланс між масою та динамічними характеристиками.

Конструктивно колінчастий вал складається з наступних основних елементів:

- корінні шийки – забезпечують опору вала в підшипниках;
- шатунні шийки – передають навантаження від шатуна;
- щоки (кривошипи) – з'єднують шийки між собою;
- противаги – компенсують інерційні сили.

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

КвРМТВА. 23106.02.01.00

Найбільш відповідальними зонами є переходи між шийками і щоками, де виникають значні концентрації напружень. Для їх зменшення застосовуються радіуси галтелей, що суттєво підвищує втомну міцність вала [7].

З позиції матеріалознавства, конструкція повинна забезпечувати рівномірний розподіл напружень і мінімізацію локальних перевантажень. Це особливо важливо для матеріалів порошкової металургії, які мають певну залишкову пористість і є більш чутливими до концентрацій напружень [14].

При адаптації конструкції колінчастого вала під технології порошкової металургії доцільно враховувати наступні особливості:

- зменшення маси за рахунок оптимізації геометрії;
- рівномірний розподіл матеріалу;
- збільшення радіусів переходів;
- можливість формування складних внутрішніх порожнин;
- інтеграція противаг у загальну форму деталі.

На відміну від кованих валів, де форма обмежена технологією деформації, порошкова металургія дозволяє отримувати більш складні геометричні рішення, що відкриває можливості для підвищення ефективності конструкції.

Таким чином, аналіз мас та конструкції колінчастого вала дозволяє визначити ключові параметри, що впливають на його динамічні та міцнісні характеристики, і є основою для подальшого перепроектування з урахуванням сучасних технологій виготовлення.

### 3.5 Висновки до розділу 3

У розділі 3 було виконано узагальнений аналіз навантажень, крутного моменту, умов врівноваження та конструктивних особливостей колінчастого вала як ключового елемента кривошипно-шатунного механізму двигуна внутрішнього згоряння.

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Встановлено, що на колінчастий вал діють змінні за величиною та напрямком сили газового тиску та інерційні сили, які формують складний напружено-деформований стан. Їх циклічний характер є основною причиною втомного руйнування, що визначає підвищені вимоги до міцності та геометрії конструкції.

Показано, що крутний момент колінчастого вала змінюється протягом робочого циклу двигуна, що обумовлює нерівномірність обертання та виникнення крутильних коливань. Це потребує врахування динамічних навантажень при проектуванні вала та виборі його масово-інерційних характеристик.

Встановлено, що ефективне врівноваження колінчастого вала досягається шляхом компенсації інерційних сил обертових мас за допомогою противаг, тоді як сили інерції зворотно-поступальних мас можуть бути врівноважені лише частково. Оптимальний вибір коефіцієнта врівноваження дозволяє зменшити рівень вібрацій і підвищити ресурс роботи вузла.

Проведений аналіз мас і конструкції колінчастого вала показав, що розподіл маси, геометрія елементів та наявність концентрацій напружень у перехідних зонах суттєво впливають на його працездатність. Найбільш відповідальними є ділянки галтелей і з'єднань шийок із щоками, які потребують конструктивної оптимізації.

З урахуванням отриманих результатів встановлено, що для підвищення ефективності конструкції доцільно забезпечити:

- рівномірний розподіл маси;
- зменшення концентрацій напружень;
- оптимізацію геометрії противаг;
- підвищення жорсткості конструкції.

Особливу увагу приділено адаптації конструкції колінчастого вала до технологій порошкової металургії. Встановлено, що такі технології відкривають можливості для більш гнучкого формування геометрії та

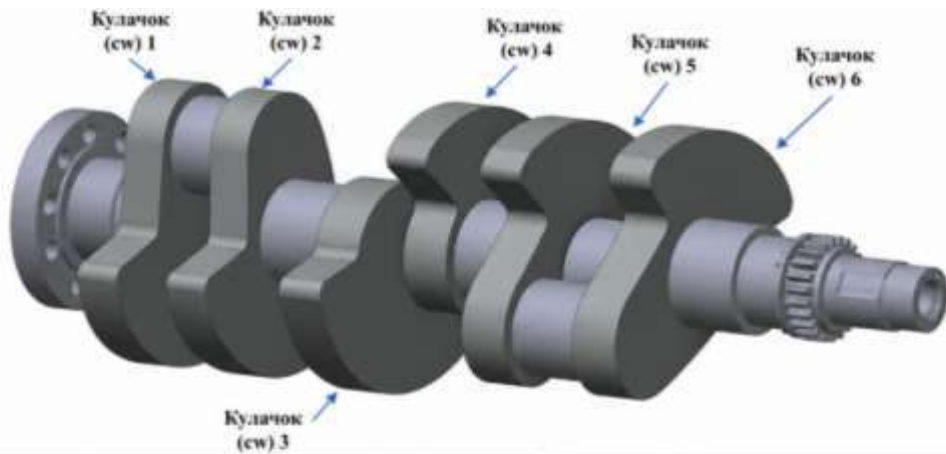
					<u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

розподілу маси, однак вимагають врахування особливостей матеріалу, зокрема його пористості та чутливості до циклічних навантажень.

Таким чином, результати аналізу, отримані у розділі 3, є необхідною теоретичною та інженерною основою для подальшого перепроєктування колінчастого вала з урахуванням сучасних технологій виготовлення, що буде розглянуто у наступному розділі.

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47





**Пояснення щодо кулачків**  
**Кулачки (sw – cam web)** – це елементи колінчастого вала, що з'єднують корінні та шпунтові шийки між собою. Кожен кулачок передає зусилля від шпунтової шийки до корінної, створюючи згинальні та крутільні навантаження. Кількість кулачків відповідає кількості шпунтових шийок (циліндрів двигуна).

- Кулачок 1 (sw 1) – передній кулачок, розташований біля носка вала.
- Кулачок 2 (sw 2) – наступний кулачок у послідовності роботи циліндрів.
- Кулачок 3 (sw 3) – противага, що компенсує інерційні сили вперто-поступальних мас.
- Кулачок 4 (sw 4) – кулачок для наступного циліндра.
- Кулачок 5 (sw 5) – черговий кулачок, що забезпечує передачу зусилля.
- Кулачок 6 (sw 6) – задній кулачок, розташований біля маховикового кінця вала.

Параметр кулачка	Функціональне призначення
Форма кулачка	Забезпечує оптимальну жорсткість при мінімальній масі та технологічності виготовлення.
Товщина ніс	Визначає міцність і жорсткість кулачка при згині та крученні.
Радіуси переходів	Знижують концентрацію напружень і підвищують втомну довговічність.
Противага (sw 3)	Компенсують інерційні сили та забезпечують привоження вала.
Послідовність розташування	Відповідає порядку роботи циліндрів та фазовому зсуву кривоштанів.

Рис. 16 – Колінчастий вал з кулачками (конструктивні елементи)

Важливою вимогою є також оптимізація розподілу маси колінчастого вала. Для забезпечення ефективного врівноваження необхідно раціонально розміщувати противаги, враховуючи як інерційні сили, так і технологічні можливості їх виготовлення. Порошкова металургія дозволяє формувати складні геометричні форми, що відкриває додаткові можливості для інтеграції противаг у конструкцію, зменшення маси та підвищення ефективності роботи вала [23].

**Контршока типу 6**  
(вузька, зменшеної маси)



**Контршока типу 2**  
(широка, збільшеної маси)



Рис. 17 – Типи контрщок (кулачків) колінчастого вала

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Окремо слід враховувати вимоги до точності та якості поверхонь. Хоча порошкова металургія забезпечує високу точність формування, критичні поверхні (шийки, посадкові місця під підшипники) потребують додаткової обробки або калібрування для досягнення необхідних допусків.

Сучасні підходи до проектування передбачають використання CAD/CAE-інструментів для оптимізації конструкції з урахуванням як експлуатаційних навантажень, так і технологічних обмежень [24]. Це дозволяє оцінити напружено-деформований стан, визначити критичні зони та обґрунтувати вибір конструктивних рішень ще на етапі розробки.

Таким чином, вимоги до конструкції колінчастого вала при використанні порошкової металургії формуються на перетині двох підходів – механічного (міцність, жорсткість, врівноваження) та технологічного (DFPM). Їх узгодження є ключовою умовою створення ефективної, надійної та технологічної конструкції, що буде реалізована у подальших підрозділах.

#### 4.2. Розробка варіантів конструкції колінчастого вала

На основі вимог до конструкції, сформульованих у підрозділі 4.1, а також з урахуванням навантажень і умов врівноваження (розділ 3), було розроблено декілька варіантів конструктивного виконання колінчастого вала, орієнтованих на виготовлення методом порошкової металургії.

Процес розробки здійснювався із застосуванням принципів DFPM (Design for Powder Metallurgy), що передбачають адаптацію геометрії до умов пресування, забезпечення рівномірного ущільнення матеріалу та мінімізацію дефектів структури [20]. Додатково враховано сучасні підходи до проектування, зокрема використання CAD-моделювання та варіантного аналізу конструкцій [25].

Варіант 1 – Класична конструкція з адаптацією під РМ. Перший варіант базується на традиційній конструкції колінчастого вала, що використовується при куванні, але з частковою адаптацією до вимог порошкової металургії.

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Основною особливістю є збереження цілісної структури вала з мінімальними змінами геометрії.

До переваг цього варіанту належать:

- висока жорсткість конструкції;
- простота розрахункового обґрунтування;
- відповідність традиційним підходам до проектування.
- Разом з тим, такий підхід має суттєві обмеження:
- складність забезпечення рівномірного ущільнення порошку;
- наявність масивних ділянок, що ускладнюють спікання;
- обмежена технологічність для РМ-виробництва.

Таким чином, варіант 1 є найменш адаптованим до порошкової металургії і розглядається як базовий для порівняння.

Варіант 2 – Полегшена конструкція з оптимізованою геометрією. Другий варіант передбачає зміну геометрії вала з метою зменшення маси та покращення технологічності. Основними особливостями є:

- зменшення товщини щік;
- оптимізація форми противаг;
- збільшення радіусів переходів;
- усунення різких змін перерізів.

Такий підхід дозволяє:

- зменшити матеріаломісткість;
- покращити умови ущільнення порошку;
- знизити рівень концентрацій напружень.

Однак зменшення маси може негативно впливати на жорсткість конструкції та ефективність врівноваження, що потребує додаткового аналізу [23].

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Варіант 3 – Модульна конструкція колінчастого вала. Третій варіант є найбільш перспективним з точки зору використання порошкової металургії та передбачає застосування модульного підходу до побудови конструкції.

Суть підходу полягає у виготовленні окремих елементів (шийок, щік, противаг) як незалежних деталей з подальшим їх з'єднанням у єдину конструкцію.

Перевагами модульної конструкції є:

- висока технологічність виготовлення;
- можливість оптимізації кожного елемента окремо;
- покращення умов ущільнення порошку;
- зниження внутрішніх напружень після спікання;
- гнучкість у зміні конструкції.

Недоліками є:

- необхідність забезпечення надійності з'єднань;
- складність складання;
- потенційне зниження жорсткості вузла.



Рис. 18 –Варіанти конструктивного виготовлення колінчастого вала:

а – варіант 1; б – варіант 2, в – варіант 3.

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Модульний підхід відповідає сучасним тенденціям розвитку машинобудування та дозволяє ефективно інтегрувати переваги порошкової металургії у конструкцію складних деталей [24].

Порівняльна оцінка варіантів. Для вибору оптимального конструктивного рішення доцільно провести порівняльний аналіз розроблених варіантів за основними критеріями:

- технологічність виготовлення;
- маса конструкції;
- жорсткість;
- можливість врівноваження;
- відповідність вимогам DFPM.

Таблиця 4.1. Порівняльна характеристика варіантів конструкції

Критерій	Варіант 1 (6 контрваг)	Варіант 2 (4 контрваги)	Варіант 3 (модульний)
Технологічність (PM)	Низька	Середня	Висока
Відповідність DFPM	Часткова	Добра	Повна
Маса	Висока	Середня	Оптимізована
Жорсткість	Висока	Середня	Середня
Врівноваження	Високе	Задовільне	Регульоване
Концентрації напружень	Високі	Зменшені	Мінімізовані
Складність виготовлення	Висока	Середня	Низька (для PM)
Складність складання	Низька	Низька	Висока
Гнучкість конструкції	Низька	Середня	Висока

Попередній аналіз показує, що:

- варіант 1 є найпростішим, але найменш ефективним з точки зору PM;
- варіант 2 забезпечує компроміс між масою та міцністю;
- ✓ варіант 3 є найбільш перспективним з точки зору технологічності та оптимізації конструкції.

Отже, подальше обґрунтування доцільно виконувати для варіанту 3 як базового для перепроєктування колінчастого вала.

З метою обґрунтування вибору раціональної конструкції колінчастого вала було проведено порівняльний аналіз трьох розроблених варіантів з урахуванням вимог до міцності, жорсткості, врівноваження та технологічності виготовлення методом порошкової металургії.

Основними критеріями оцінки обрано:

- технологічність виготовлення (відповідність DFPM);
- маса конструкції;
- жорсткість і міцність;
- ефективність врівноваження;
- складність складання;
- можливість адаптації до серійного виробництва.

Перший варіант, що передбачає застосування шести контрваг, забезпечує найкращі умови врівноваження та високу жорсткість конструкції. Однак він характеризується значною масою та низькою технологічністю при виготовленні методом порошкової металургії через складність геометрії та нерівномірність ущільнення порошку.

Другий варіант із чотирма контрвагами дозволяє зменшити масу конструкції та покращити технологічність, проте це досягається за рахунок часткового погіршення умов врівноваження. Такий варіант можна розглядати як компромісне рішення, однак він не повністю реалізує потенціал порошкової металургії [23].

Третій варіант, що базується на модульному принципі побудови, є найбільш перспективним. Його ключовою особливістю є розділення конструкції на окремі елементи, що дозволяє:

- ✓ оптимізувати форму кожного елемента відповідно до вимог DFPM;
- ✓ забезпечити рівномірне ущільнення матеріалу;
- ✓ зменшити внутрішні напруження після спікання;
- ✓ підвищити гнучкість конструкції та можливість її модифікації.

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хоча модульна конструкція потребує додаткових операцій складання та забезпечення надійності з'єднань, її переваги з точки зору технологічності та адаптації до сучасних виробничих процесів є визначальними [24].

На основі проведеного аналізу встановлено, що найбільш доцільним є варіант 3 – модульна конструкція колінчастого вала.

Його вибір обумовлений наступними факторами:

- ✓ максимальна відповідність принципам DFPM;
- ✓ можливість реалізації складних геометричних форм;
- ✓ оптимальний розподіл маси;
- ✓ зниження концентрацій напружень;
- ✓ адаптивність до змін конструкції;
- ✓ перспективність для серійного виробництва з використанням сучасних технологій.

Таким чином, варіант 3 приймається як базовий для подальшого детального проектування та обґрунтування конструкції колінчастого вала.

#### 4.3. Обґрунтування вибраної конструкції колінчастого вала

На основі проведеного порівняльного аналізу варіантів конструктивного виконання колінчастого вала встановлено, що найбільш доцільним для подальшого проектування є модульний варіант, який у найбільшій мірі відповідає вимогам виготовлення методом порошкової металургії та сучасним тенденціям розвитку машинобудування. Вибір даного конструктивного рішення обумовлений необхідністю узгодження експлуатаційних характеристик, зокрема міцності, жорсткості та врівноваження, з технологічними можливостями процесів пресування та спікання порошкових матеріалів.

Модульна конструкція забезпечує більш повну відповідність принципам Design for Powder Metallurgy, оскільки дозволяє розділити складну геометрію колінчастого вала на окремі функціональні елементи, що формуються

					<i><u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u></i>	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

незалежно один від одного, що, у свою чергу, сприяє забезпеченню рівномірного ущільнення порошкової суміші, зменшенню ймовірності утворення внутрішніх дефектів та підвищенню стабільності процесу спікання. Такий підхід дозволяє оптимізувати форму кожного елемента з урахуванням напрямку пресування, уникнути підрізів та різких змін перерізів, що є критично важливим для забезпечення якості виробу.

З точки зору міцності та довговічності, модульна конструкція має суттєві переваги, оскільки дозволяє зменшити концентрації напружень у найбільш навантажених зонах, зокрема у переходах між шийками та щоками, а також у місцях розташування противаг. Враховуючи циклічний характер навантаження колінчастого вала, що супроводжується дією змінних згинальних і крутних напружень, зниження концентрацій напружень є визначальним фактором підвищення втомної довговічності. Додатково зменшується рівень залишкових напружень, що виникають у процесі спікання, що позитивно впливає на експлуатаційні характеристики виробу.

Важливою перевагою модульної конструкції є можливість більш гнучкого керування масово-інерційними параметрами колінчастого вала, оскільки окремі елементи можуть бути оптимізовані за масою та формою з урахуванням вимог до врівноваження. Це дозволяє досягти більш раціонального розподілу маси відносно осі обертання та оптимізувати момент інерції, який визначається залежністю  $J = \sum(m_i \cdot r_i^2)$ , що є важливим для зменшення нерівномірності обертання та крутильних коливань. Таким чином забезпечується покращення динамічних характеристик двигуна та зниження рівня вібрацій.

З технологічної точки зору застосування модульної конструкції дозволяє зменшити складність прес-форм, підвищити стабільність процесу виготовлення, скоротити витрати матеріалу та зменшити обсяг подальшої механічної обробки, що є важливим фактором при організації серійного виробництва. Можливість виготовлення окремих елементів як уніфікованих

					<u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

модулів сприяє підвищенню гнучкості виробництва та спрощує процес модернізації конструкції.

Разом з тим, модульна конструкція характеризується наявністю певних обмежень, пов'язаних із необхідністю забезпечення надійності з'єднань між окремими елементами та підвищеною складністю складання, що може впливати на загальну жорсткість конструкції. Однак зазначені недоліки можуть бути компенсовані шляхом застосування сучасних методів з'єднання, зокрема пресових посадок, дифузійного зварювання або спікання у зборі, що дозволяє забезпечити необхідний рівень міцності та жорсткості вузла.

Модульна конструкція колінчастого вала забезпечує оптимальне поєднання механічних та технологічних характеристик, дозволяє врахувати особливості порошкової металургії та створює передумови для підвищення ефективності, надійності та довговічності виробу, що обґрунтовує її вибір як базового варіанту для подальшого проєктування та впровадження.

#### 4.4. Висновки до розділу 4

У розділі 4 було виконано розробку та обґрунтування конструкції колінчастого вала з урахуванням вимог виготовлення методом порошкової металургії та сучасних підходів до проєктування машинобудівних виробів.

Сформульовано вимоги до конструкції, що базуються на поєднанні експлуатаційних і технологічних факторів, зокрема забезпечення міцності, жорсткості, ефективного врівноваження, а також відповідності принципам Design for Powder Metallurgy, що передбачають врахування обмежень процесів пресування та спікання на етапі розробки виробу.

Розроблено декілька варіантів конструктивного виконання колінчастого вала, які відрізняються геометрією, масою, рівнем врівноваження та ступенем технологічності. Проведений порівняльний аналіз дозволив встановити їх переваги та недоліки, а також визначити ступінь відповідності кожного варіанта умовам виготовлення методом порошкової металургії.

									Арк.
									57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u>				

Встановлено, що традиційні конструктивні рішення, орієнтовані на кування, не забезпечують необхідного рівня технологічності при використанні порошкових технологій, тоді як оптимізовані геометричні рішення дозволяють частково врахувати вимоги виробництва, але не забезпечують повної реалізації потенціалу даного методу.

Обґрунтовано доцільність застосування модульної конструкції колінчастого вала, яка забезпечує найбільш повну відповідність вимогам порошкової металургії, дозволяє оптимізувати геометрію окремих елементів, забезпечити рівномірність ущільнення матеріалу, зменшити концентрації напружень і покращити умови формування структури матеріалу.

Показано, що застосування модульного підходу створює передумови для зниження маси конструкції, покращення масово-інерційних характеристик і підвищення ефективності врівноваження, що позитивно впливає на динамічні показники роботи двигуна та довговічність його елементів.

Разом з тим встановлено, що реалізація модульної конструкції потребує врахування додаткових факторів, пов'язаних із забезпеченням надійності з'єднань між елементами та організацією процесу складання, що має бути враховано на етапі подальшого проєктування.

Таким чином, результати, отримані у розділі 4, підтверджують доцільність використання модульної конструкції колінчастого вала як базової для реалізації методом порошкової металургії та формують практичну основу для впровадження запропонованих рішень у виробництво.

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У рамках випускної кваліфікаційної роботи бакалавра досліджено конструктивні та технологічні особливості колінчастого вала двигуна внутрішнього згорання та обґрунтовано шляхи його перепроєктування для виготовлення методом порошкової металургії на основі аналізу навантажень, умов роботи, матеріалів і сучасних виробничих технологій.

Кваліфікаційна робота складається із чотирьох розділів.

У першому розділі розглянуто загальні положення роботи двигунів внутрішнього згорання, функції колінчастого вала та умови його навантаження. Складний характер змінних сил і моментів визначає підвищені вимоги до міцності, жорсткості та довговічності конструкції.

У другому розділі проаналізовано конструкцію колінчастого вала, системи мащення, технології виготовлення та сучасні матеріали. Обґрунтовано переваги порошкової металургії та визначено її обмеження, що впливають на проєктування виробу.

У третьому розділі виконано аналіз навантажень, крутного моменту, умов врівноваження та масово-інерційних характеристик. Встановлено, що оптимальний розподіл маси і зменшення концентрацій напружень є ключовими факторами підвищення надійності вала.

У четвертому розділі розроблено варіанти конструкції колінчастого вала, виконано їх порівняння та обґрунтовано вибір модульного варіанту. Показано, що адаптація конструкції до вимог порошкової металургії дозволяє підвищити технологічність, зменшити масу та покращити експлуатаційні характеристики.

Отримані результати підтверджують ефективність комплексного підходу до проєктування колінчастого вала з урахуванням навантажень і технологій виготовлення та забезпечення його надійної роботи.

Випускна кваліфікаційна робота складається з 62 сторінок, містить 18 ілюстрацій, 6 таблиць, 17 формул, 25 джерела та 1 додаток.

Ключові слова: КОЛІНЧАСТИЙ ВАЛ, ПОРОШКОВА МЕТАЛУРГІЯ, НАВАНТАЖЕННЯ, ВРІВНОВАЖЕННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ.

					<i>КвРМТВА. 23106.02.01.00</i>	Арк.
						59
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education. 2020.
2. Taylor C. F. *Engine Design and Performance*. Cambridge: Woodhead Publishing. 2021.
3. Budynas R. G., Nisbett J. K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 11th ed. New York: McGraw-Hill. 2020.
4. German R. M. *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing*. Princeton: Metal Powder Industries Federation. 2021.
5. Höganäs AB. *Handbook for Sintered Components Design*. Höganäs: Höganäs AB. 2022.
6. Kalpakjian S., Schmid S. *Manufacturing Engineering and Technology*. 8th ed. Pearson. 2020.
7. Stephens R. I., Fatemi A. *Metal Fatigue in Engineering*. 3rd ed. Wiley. 2021.
8. Groover M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. 7th ed. Wiley. 2020.
9. Davis J. R. *Cast Irons*. ASM International. 2020.
10. Totten G. E. *Steel Heat Treatment Handbook*. 3rd ed. CRC Press. 2022
11. Altan T., Ngaile G., Shen G. *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*. ASM International. 2020.
12. Denkena B., Grove T. *Process Planning for Milling and Turning*. CIRP Annals. 2020. Vol. 69(2). P. 651–674.
13. Mourtzis D., Vlachou E., Dimitrakopoulos G. *Cyber-Physical Systems and Digital Twins in Manufacturing*. Procedia CIRP. 2020. Vol. 97. P. 1–6.
14. Callister W. D., Rethwisch D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10th ed. Wiley. 2020.
15. Gladman T. *The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels*. Woodhead Publishing. 2021.

					<u>КвPMTBA. 23106.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

16. Bell T. *Surface Engineering of Steels*. Woodhead Publishing. 2020.
17. Danninger H., Weiss B., Stickler R. *Static and fatigue properties of high strength PM steels*. *Materials Science and Engineering A*. 2020. Vol. 789. Article 139656.
18. Neugebauer R., Denkena B., Wegener K. *New Developments in Manufacturing Technology*. *CIRP Annals*. 2020. Vol. 69(2). P. 543–566.
19. Beiss P., Danninger H. *Sintered Steels and Their Applications*. ASM International. 2021.
20. Mosca E. *Powder Metallurgy: Design Manual*. Höganäs AB. 2019.
21. Li Y., Zhao H., Chen L. *Dynamic analysis and optimization of crankshaft system in internal combustion engines*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 148. Article 107163.
22. Rao J. S. *Rotor Dynamics*. 2nd ed. New Delhi: New Age International. 2022.
23. Danninger H., Gierl C. *Powder metallurgy automotive applications: Present status and future prospects*. *Materials Science and Engineering A*. 2021. Vol. 805. Article 140805.
24. Neugebauer R., Denkena B., Wegener K. *Advanced manufacturing technologies for functional components*. *CIRP Annals*. 2021. Vol. 70(2). P. 543–566.
25. Mourtzis D., Doukas M., Bernidaki D. *Simulation in manufacturing: Review and challenges*. *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 97. P. 25–30.

					<u>КвPMTBA. 23106.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

ДОДАТКИ

					<u>КвРМТВА. 23106.02.01.00</u>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62