

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Формування експлуатаційних властивостей поршня ДВЗ на  
основі вибору матеріалу та термічної обробки»

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

Шифр КвРМТВА. 22095.01.17.00

Виконав студент 4 курсу група МТВА-22-1



Підпис

Павло МОНДРИЧ

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ



Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

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



Підпис

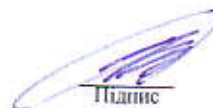
Олег БАБАК

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри ТАМ

11.06.2026р

Дата



Підпис


Олександр ДИХА

Хмельницький, 2026

# 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 Духа О.В.  
2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Мондричу Павлу Юрійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Формування експлуатаційних властивостей поршня ДВЗ на основі вибору матеріалу та термічної обробки.**

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент 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 конструктивних особливостей та умови роботи ЦПГ.

2) Основи вибору матеріалу та методи виготовлення поршня.

3) Аспекти термічної обробки автомобільних поршнів.

4 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

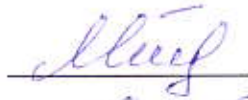
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 15.04 2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Аналіз конструктивних особливостей та умови роботи ЦПГ</i>	28.05.2026	вик
2	<i>Основи вибору матеріалу та методи виготовлення поршня</i>	8.06.2026	вик
3	<i>Аспекти термічної обробки автомобільних поршнів</i>	12.06.2026	вик
4	<i>Висновки.</i>	14.06.2026	вик
5	<i>Захист роботи</i>	16.06.2026	

Студент



Павло МОНДРИЧ

Керівник роботи



Сергій ПОСОНСЬКИЙ

## РЕФЕРАТ

Судент групи МТВА-22-1: Мондрич П.Ю.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему «**Формування експлуатаційних властивостей поршня ДВЗ на основі вибору матеріалу та термічної обробки**» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 13 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 14 сторінках. Роботу викладено на 61 сторінці, з них 57 сторінок основного тексту, на яких розміщено 17 рисунків і 11 таблиць.

Кваліфікаційна робота присвячена аналізу конструктивних, матеріалознавчих та технологічних аспектів виготовлення поршня двигуна внутрішнього згорання. У роботі розглянуто умови роботи поршня, проаналізовано основні навантаження, що діють на нього в процесі експлуатації, а також обґрунтовано вимоги до матеріалу та конструкції.

Проведено аналіз сучасних технологій виготовлення поршнів, зокрема лиття у кокіль та ізотермічного штампування, визначено їх переваги та недоліки. З урахуванням умов серійного виробництва обґрунтовано доцільність застосування лиття як основного способу отримання заготовок.

Особливу увагу приділено вибору матеріалу. На основі порівняльного аналізу сплавів АК4, АЛ2 (АК12) та СЧ24 за технологічними, експлуатаційними та економічними показниками встановлено, що найбільш раціональним є застосування сплаву АК4, який забезпечує оптимальне поєднання міцності, теплової стійкості та технологічності.





У роботі розроблено технологічний процес термічної обробки поршня, що включає гартування та штучне старіння. Визначено оптимальні температурні та часові параметри обробки, які забезпечують формування необхідної структури матеріалу та підвищення його механічних властивостей.

У результаті виконаної роботи обґрунтовано вибір матеріалу, технології виготовлення та обробки поршня, що дозволяє підвищити його експлуатаційні характеристики та надійність роботи двигуна.

*Ключові слова:* ПОРШЕНЬ, ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ, АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, АК4, ЛИТТЯ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ГАРТУВАННЯ, СТАРІННЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА УМОВИ РОБОТИ ЦПГ	8
1.1 Технічні вимоги до поршня та службове призначення.	8
1.2 Конструкції поршнів.	8
1.3 Вимоги, що висуваються до поршнів.	11
1.4 Динамічні процеси поршня.	13
2 ОСНОВИ ВИБІРУ МАТЕРІАЛУ ТА МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОРШНЯ	27
2.1 Характеристики матеріалів поршнів.	27
2.2 Технологічний процес виготовлення автомобільних поршнів.	37
3 АСПЕКТИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ПОРШНІВ	41
3.1 Гартування сплавів алюмінієвих.	41
3.2 Охолоджувальне середовище для гартування.	43
3.3 Прожарюваність матеріалу.	43
3.4 Старіння металу.	44
3.5 Обґрунтування та розрахунок режимів термічної обробки поршнів.	50
3.6 Створення спеціальних покриттів.	54
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	59
ДОДАТКИ	61

КвРМТВА. 22095.01.17.00				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Мондрич		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Формування експлуатаційних властивостей поршня ДВЗ на основі вибору матеріалу та термічної обробки			Літера	Арквш
			4	61
ХНУ, МТВА-22-1				

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку автомобільної промисловості характеризується підвищеними вимогами до ефективності, надійності та довговічності двигунів внутрішнього згорання. В умовах зростання вартості енергоресурсів і посилення екологічних норм особливої актуальності набуває підвищення економічності двигунів, зменшення шкідливих викидів та збільшення їх ресурсу. У досягненні цих цілей важливу роль відіграє вдосконалення конструкції та технології виготовлення основних деталей двигуна, серед яких одним із найбільш відповідальних елементів є поршень.

Поршень є ключовою деталлю циліндро-поршневої групи, яка безпосередньо сприймає тиск газів, що утворюються в процесі згорання паливоповітряної суміші, і передає зусилля на кривошипно-шатунний механізм. У процесі роботи він піддається складному поєднанню механічних, теплових і трибологічних навантажень. Високі температури, що досягають сотень градусів, значні інерційні сили при високих частотах обертання, а також інтенсивне тертя об поверхню циліндра створюють екстремальні умови експлуатації. За таких умов навіть незначні недоліки у конструкції, матеріалі або технології виготовлення можуть призвести до передчасного зносу, деформацій або руйнування деталі.

Однією з основних задач при проектуванні поршня є забезпечення оптимального теплового і механічного балансу. З одного боку, необхідно забезпечити достатню міцність і жорсткість конструкції, з іншого – мінімізувати масу поршня для зниження інерційних навантажень. Важливим фактором є також контроль теплового розширення матеріалу, оскільки неправильний підбір зазору між поршнем і циліндром може призвести до заклинювання або, навпаки, до збільшених втрат на тертя та прориву газів.

У сучасному автомобілебудуванні для виготовлення поршнів широко застосовуються алюмінієві сплави, які поєднують малу густину, високу

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теплопровідність і достатню міцність. Особливе місце серед них займають силуміни та деформівні алюмінієві сплави, які дозволяють отримати оптимальне поєднання технологічних і експлуатаційних властивостей. Проте вибір конкретного матеріалу потребує комплексного аналізу, що враховує не лише механічні характеристики, але й технологічність, стійкість до термічних навантажень та економічні показники.

Не менш важливим є вибір технології виготовлення поршнів. Найбільш поширеним методом у серійному виробництві є лиття, яке забезпечує отримання виробів складної форми з відносно невисокими витратами. Водночас альтернативні методи, такі як штампування або кування, дозволяють досягти кращих механічних властивостей, але потребують більших затрат. Додатково підвищення експлуатаційних характеристик поршнів досягається шляхом застосування термічної обробки, яка дозволяє змінювати структуру матеріалу та покращувати його міцність, а також шляхом нанесення спеціальних покриттів, що зменшують тертя і підвищують зносостійкість.

Термічна обробка алюмінієвих сплавів, зокрема процеси гартування та старіння, відіграє важливу роль у формуванні необхідних властивостей поршня. Завдяки цим процесам досягається оптимальне поєднання міцності та пластичності матеріалу. Водночас правильний вибір режимів обробки є складним завданням, що потребує врахування хімічного складу сплаву, геометрії деталі та умов її експлуатації.

Додатковим напрямом підвищення ефективності роботи поршнів є застосування захисних і функціональних покриттів. Використання таких покриттів дозволяє зменшити коефіцієнт тертя, покращити умови змащування, підвищити корозійну стійкість і зменшити інтенсивність зносу. Вибір оптимального способу нанесення покриття також є важливим етапом у технології виготовлення.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Практична цінність роботи полягає у можливості використання отриманих результатів при проектуванні та виготовленні поршнів для двигунів внутрішнього згоряння, що дозволить підвищити їх надійність, ресурс і ефективність роботи в умовах сучасної експлуатації.

Метою даної роботи є обґрунтування вибору матеріалу поршня, а також розробка раціонального технологічного процесу термічної обробки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

- 1) Виконати аналіз умов роботи поршня.
- 2) Виконати вибір оптимального матеріалу з врахуванням фізико-механічних властивостей.
- 3) Розробити режими термічної обробки обраного матеріалу.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА УМОВИ РОБОТИ ЦПГ

## 1.1 Технічні вимоги до поршня та службове призначення.

Поршень є деталлю циліндричної форми, яка виконує зворотно-поступальний рух у межах циліндра та забезпечує перетворення енергії тиску газів, пари або рідини в механічну роботу, або навпаки — механічного руху у зміну тиску робочого середовища. У двигунах внутрішнього згоряння поршень сприймає тиск продуктів згоряння, передає зусилля через поршневий палець на шатун і формує змінний об'єм камери згоряння.

Крім цього, поршень забезпечує герметизацію надпоршневого простору, обмежуючи прорив газів у картер і потрапляння масла в камеру згоряння. Він також передає бічні навантаження на стінки циліндра та бере участь у відведенні тепла через контакт із циліндром і мастильним матеріалом.

Поршень входить до складу поршневої групи, до якої належать також компресійні та маслоснімні кільця, поршневий палець і елементи його фіксації. Надійність цієї групи безпосередньо впливає на загальну працездатність і довговічність двигуна.

## 1.2 Конструкції поршнів.

Конструкція поршня є складною через дію змінних механічних і теплових навантажень, що викликають нерівномірний розподіл температури по його об'єму. Це, у свою чергу, призводить до виникнення локальних термічних напружень і деформацій, які змінюються в процесі роботи двигуна.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основними елементами поршня є головка (12) та спідниця (13), рис. 1.1. Головка включає днище (18) та зони розташування канавок (1, 2, 4) під поршневі кільця. Днище разом із головкою циліндра формує камеру згоряння і сприймає основне навантаження від тиску газів. Канавки на бічній поверхні головки призначені для встановлення компресійних і маслоснімного кілець, які забезпечують герметичність і регулювання мастила.

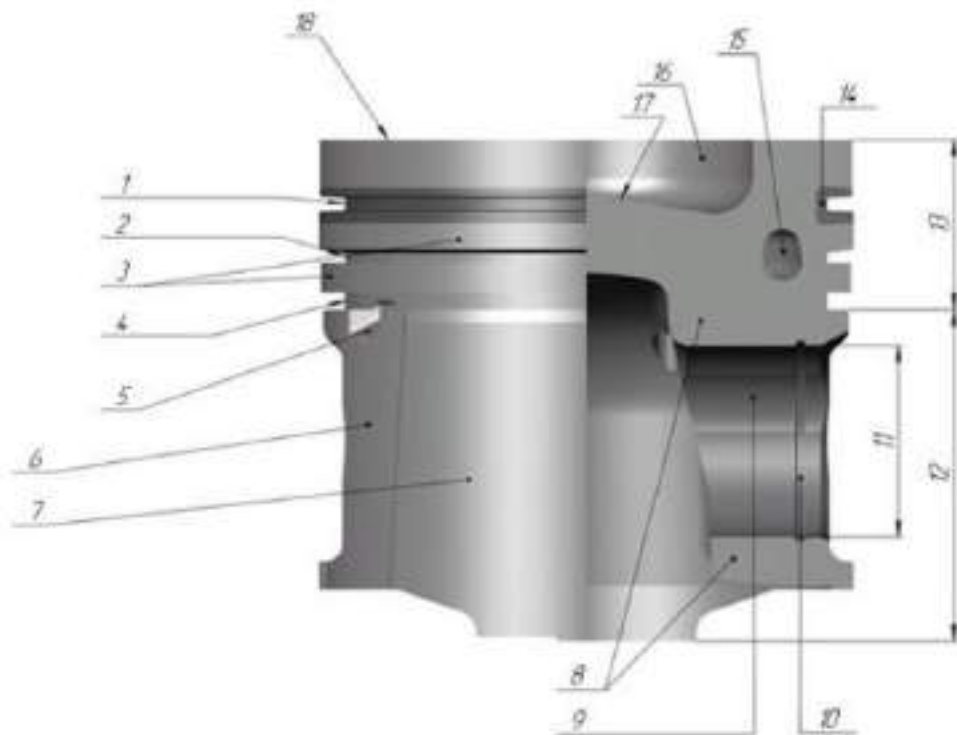


Рисунок 1.1 – Елементи поршня.

Особливо навантаженими є перемички між канавками кілець, через які відводиться значна частина тепла до стінок циліндра. Температура в зоні згоряння може досягати 1850–2650 °С, що значно перевищує температуру плавлення алюмінієвих сплавів. Тому ефективне охолодження є критично важливим для забезпечення працездатності поршня.

Тепловідведення здійснюється через поршневі кільця, спідницю, стінки циліндра, поршковий палець, а також за допомогою мастильного матеріалу та охолоджувальної рідини. При нагріванні зменшується міцність матеріалу,

									Арк.
									9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРМТВА. 22095.01.17.00				

а також виникають додаткові напруження через температурні градієнти, які поєднуються з механічними навантаженнями.

У зв'язку з цим до поршня висуваються суперечливі вимоги: він повинен бути легким для зменшення інерційних сил, але водночас міцним, зносостійким і мати високу теплопровідність. Досягнення такого поєднання властивостей є складним інженерним завданням.

Конструкція поршня також враховує його деформації під час роботи. Через різницю температур між днищем і спідницею виникає нерівномірне теплове розширення. Для запобігання заклинюванню в циліндрі поршень у холодному стані має бочкоподібну форму з меншим діаметром у верхній частині.

Під дією бічних сил поршень деформується і набуває овальної форми, рис. 1.2. Для компенсації цього ефекту його виготовляють із початковою овальністю (протиеліпсністю), причому більша вісь розташована перпендикулярно осі поршневого пальця. У процесі роботи та прогріву форма наближається до правильної циліндричної.

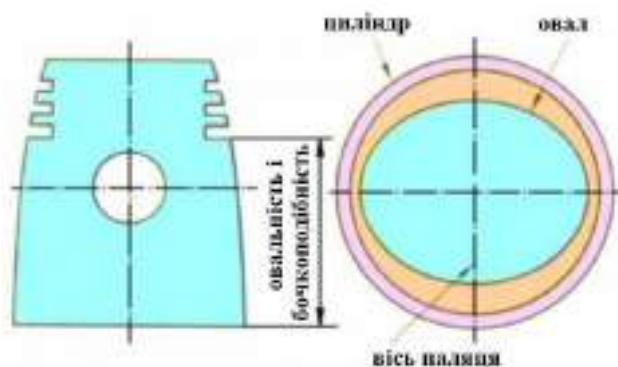


Рисунок 1.2 – Овальність поршня.

Зазор між поршнем і циліндром підбирається таким чином, щоб забезпечити мінімальний рівень шуму та виключити можливість заклинювання при робочих температурах.

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі експлуатації поршень зазнає дії високих газових і змінних інерційних навантажень, що мають ударний характер. При недостатньому змащуванні це призводить до інтенсивного зносу. Середня швидкість руху поршня може досягати 8–20 м/с. Крім основного руху, він здійснює також поперечні переміщення (перекладку) в межах зазору між ним і циліндром.

Для зниження температури поршнів у сучасних двигунах застосовуються різні методи примусового охолодження:

1) подача масла під тиском на внутрішню поверхню днища через канали в шатуні або спеціальні форсунки, що дозволяє знизити температуру на 15–30 °С;

2) створення масляної порожнини всередині поршня, частково заповненої мастилом, яке при русі інтенсивно омиває внутрішні поверхні, підвищуючи ефективність тепловідведення та знижуючи температуру на 30–40 °С.

Таким чином, конструкція поршня формується з урахуванням складних умов його роботи та необхідності забезпечення надійності, довговічності і ефективності двигуна.

### 1.3 Вимоги, що висуваються до поршнів.

Поршень двигуна внутрішнього згоряння виконує низку ключових функцій, що забезпечують ефективну роботу двигуна. Насамперед він перетворює енергію тиску газів, які утворюються під час згоряння паливоповітряної суміші, у механічний рух. Крім того, поршень передає бічні навантаження на стінки циліндра, забезпечує герметичність камери згоряння, запобігаючи прориву газів у картер, а також відводить частину тепла через контакт із поршневыми кільцями та спідницею до системи охолодження. У двотактних двигунах він також бере участь у регулюванні процесів наповнення та продувки циліндра.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

До технологічних вимог, що висуваються до поршня, належать умови його роботи в середовищі високих температур і тисків. Температура в камері згоряння може перевищувати 2000 °С, при цьому допустима температура самого поршня, за якої не відбувається істотного зниження міцності матеріалу, повинна залишатися в межах приблизно 350 °С. Тиск газів у циліндрі може досягати десятків атмосфер, що створює значні навантаження на днище поршня. Це вимагає достатньої міцності та жорсткості конструкції, однак збільшення товщини елементів призводить до зростання маси, що негативно впливає на динаміку та навантаження на інші вузли двигуна.

При виборі матеріалу необхідно враховувати коефіцієнт теплового розширення, щоб забезпечити оптимальний зазор між поршнем і циліндром. Цей зазор має бути достатнім для запобігання заклинюванню під час нагрівання та водночас мінімальним для зниження втрат на тертя і забезпечення належного ущільнення.

Експлуатаційні вимоги до поршня передбачають його здатність працювати в умовах високих температур, тисків і змінних навантажень без втрати працездатності. Поршень повинен забезпечувати надійну герметизацію камери згоряння та ефективно взаємодіяти з циліндром і поршневыми кільцями, формуючи пару тертя з мінімальними механічними втратами та зносом. Він також має витримувати значні механічні навантаження як з боку газів, так і від елементів кривошипно-шатунного механізму.

Важливою умовою є мінімізація маси поршня, що дозволяє зменшити інерційні сили при зворотно-поступальному русі та знизити навантаження на деталі двигуна. Водночас конструкція повинна поєднувати достатню жорсткість із певною пружністю, особливо в зоні спідниці, а днище має характеризуватися високою жаростійкістю.

З технологічної точки зору конструкція поршня повинна бути максимально уніфікованою та орієнтованою на використання стандартних

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

елементів і заготовок. Геометричні параметри, точність і шорсткість поверхонь мають бути обґрунтовані як з конструктивної, так і з економічної позицій. Базові поверхні повинні забезпечувати точність встановлення, обробки та контролю деталі.

Виготовлення поршнів має здійснюватися раціональними методами, що відповідають типу виробництва та обсягам випуску, з можливістю одночасного виготовлення кількох виробів. Конструкція повинна бути придатною до застосування типових технологічних процесів і сучасних методів обробки. Матеріал, у свою чергу, має забезпечувати необхідні фізико-механічні властивості при мінімальній вартості, що особливо важливо в умовах масового виробництва.

Отже, ідеальний поршень повинен поєднувати низьку масу, високу міцність, термостійкість і зносостійкість, зберігаючи геометричну стабільність у складних умовах експлуатації. Досягнення такого поєднання характеристик можливе лише за умови раціонального вибору матеріалу та оптимізації конструкції деталі.

#### 1.4 Динамічні процеси поршня.

Ресурс і надійність циліндро-поршневої групи визначаються сукупністю конструктивних, технологічних та експлуатаційних чинників. Визначальну роль серед них відіграють саме конструктивні особливості, оскільки вони формують базові умови роботи вузла та впливають на прояв інших факторів протягом усього строку служби двигуна. Тому глибоке розуміння процесів, що відбуваються в циліндро-поршневій групі ще на етапі проектування, є необхідною умовою підвищення ефективності та довговічності двигуна.

Одним із ключових вузлів, що визначає механічні втрати, є пара тертя «поршень – циліндр». Від характеристик цього спряження залежать

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

особливості руху поршня в циліндрі, тепловий режим роботи двигуна, умови змащування поршневих кілець, а також рівень шуму і вібрацій. Основними параметрами, що визначають працездатність цієї пари, є величина зазорів, форма і профіль спідниці поршня, а також конструктивне розташування осі поршневого пальця.

Особливістю роботи поршня є його функціонування в умовах різко змінних теплових і силових навантажень. Це призводить до виникнення як температурних, так і силових деформацій, що викликають зміну геометричних параметрів і, відповідно, зазорів між спряженими поверхнями під час робочого циклу.

З позиції механіки поршень доцільно розглядати як деформівне тверде тіло, яке здійснює складний плоскопаралельний рух у межах циліндра. При аналізі цього руху враховуються не лише сили, що діють у кривошипно-шатунному механізмі, але й сили взаємодії в зоні контакту «поршень – циліндр», які формуються в умовах рідинного тертя.

Оскільки дана пара тертя функціонує подібно до підшипника ковзання, для її аналізу застосовуються підходи гідродинамічної теорії змащування. Реакція мастильного шару залежить від положення поршня в циліндрі, зокрема від товщини мастильної плівки, і змінюється протягом робочого циклу з урахуванням деформацій поршня під дією змінних навантажень.

Математичний опис руху поршня в такій постановці базується на комплексному підході, що передбачає одночасне розв'язання кількох взаємопов'язаних задач: нестационарної гідродинаміки мастильного шару (визначення розподілу тисків і сил тертя в зазорі), аналізу напружено-деформованого стану поршня, а також рівнянь його динамічної рівноваги. Для реалізації такого підходу застосовуються чисельні методи, зокрема метод кінцевих елементів, що реалізується в сучасних САД-системах. Результати розрахунків, як правило, доповнюються експериментальними даними для підвищення достовірності моделювання.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Як приклад оцінки напружено-деформованого стану розглядається поршень четвертого циліндра двигуна Fiat «Doblo» з об'ємом 1.4 літра (модель 843 A1.000), укомплектованого серійною поршневою групою. Даний двигун є чотиритактним бензиновим агрегатом робочим об'ємом 1,4 л зі ступенем стиснення 9,9. Його номінальна потужність становить 57 кВт при частоті обертання колінчастого вала 5600 об/хв, а максимальний крутний момент досягає 107 Н·м при 3400 об/хв. У системі мащення використовується напівсинтетичне моторне масло класу в'язкості 20W-40.

Таким чином, аналіз динаміки поршня дозволяє оцінити вплив конструктивних параметрів і умов роботи на його напружено-деформований стан, що є важливим для підвищення надійності та ефективності двигуна в цілому.

Рух поршня в циліндрі двигуна має складний характер і включає не лише поступальне переміщення вздовж осі циліндра, але й поперечні зміщення у площині, перпендикулярній до цієї осі, а також обертання навколо осі поршневого пальця. Для опису такого руху в межах прийнятої методики використовується принцип динамічної рівноваги за Даламбером, при якому поршень розглядається як деформівне тіло, що переміщується в зазорі циліндра, підтримуване мастильним шаром.

Під час формування системи рівнянь динамічної рівноваги приймаються такі допущення:

- поршень і поршневий палець розглядаються як єдина система, причому інерційні характеристики включають масу та момент інерції пальця;
- зазори у з'єднаннях «палець – шатун» та «шатун – колінчастий вал» не враховуються через їх незначний вплив;
- швидкість обертання колінчастого вала в розрахунковому режимі вважається сталою;
- сили, спрямовані перпендикулярно площині руху, не враховуються, оскільки конструкція поршня є симетричною.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кінематичні параметри руху поршня, рис. 1.3, такі як швидкість і прискорення, а також інерційні та бічні сили, визначаються на основі рівнянь руху кривошипно-шатунного механізму. Тиск газів у циліндрі задається за допомогою індикаторної діаграми, отриманої в результаті термодинамічного розрахунку робочого процесу двигуна.

Узагальнена система рівнянь рівноваги (1.1 – 1.3) включає баланс сил уздовж осі циліндра, баланс сил у поперечному напрямку та рівняння моментів відносно осі поршневого пальця.

$$\vec{P}_B + \vec{P}_H + \vec{R}_{\text{гсп}} + \vec{P}_{\text{трк}} + \vec{F}_{nZ} - m_n \vec{\ddot{z}} = 0, \quad (1.1)$$

$$\vec{P}_L + \vec{P}_\Pi + \vec{F}_{nY} - m_n \vec{\ddot{y}} = 0, \quad (1.2)$$

$$\vec{P}_B r_B + \vec{P}_{\text{тр}\Pi} r_\Pi + \vec{P}_{\text{тр}L} r_L + \vec{M}_L + \vec{M}_\Pi + \vec{M}_{\text{под}} - J_n \vec{\ddot{\epsilon}}_n = 0, \quad (1.3)$$

У цих рівняннях враховуються [3,5]:

- сили тиску газів з боку камери згоряння та картера;
- гідродинамічні сили, що виникають у мастильному шарі (як нормальні, так і дотичні);
- сили тертя між поршковими кільцями та стінками циліндра;
- реакції з боку шатуна;
- інерційні сили, пов'язані з масою поршня;
- моменти, що спричиняють перекид (перекидання) поршня;
- момент тертя в опорі поршневого пальця.

Таким чином, математична модель описує взаємодію сил і моментів, що діють на поршень протягом робочого циклу, з урахуванням його деформацій і умов гідродинамічного змащування.

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінка напружено-деформованого стану поршня в умовах змінних навантажень проводиться із застосуванням чисельних методів моделювання, зокрема в середовищі CAD/CAE-систем, таких як SolidWorks. Розрахунок виконується для всього робочого циклу двигуна з урахуванням як теплових, так і механічних впливів.

Методика визначення НДС передбачає послідовне виконання двох основних етапів:

1. Обчислення температурного поля поршня та пов'язаних із ним теплових деформацій, що виникають унаслідок нерівномірного нагрівання різних зон.

2. Визначення деформацій і напружень, зумовлених дією механічних навантажень, зокрема тиску газів, інерційних сил і контактної взаємодії з циліндром.

Отримані результати дозволяють оцінити зміну напружено-деформованого стану поршня протягом циклу, виявити найбільш навантажені ділянки конструкції та обґрунтувати заходи щодо підвищення його міцності й довговічності.

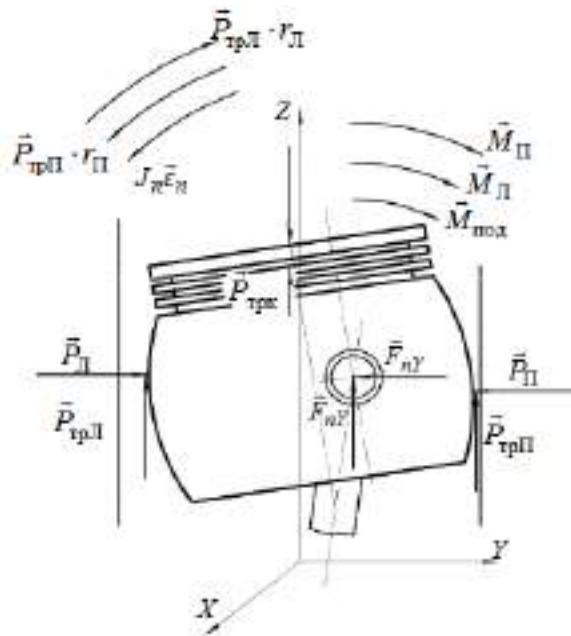


Рисунок 1.3 – Схема дії навантажень при русі поршня.

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

У обох видах розрахунків застосовувалась просторова кінцево-елементна модель серійного поршня, що містить 65 722 тетраедральні елементи. Для зменшення обчислювальних витрат і скорочення часу моделювання використовувалася половинна модель поршня, що є коректним завдяки його геометричній симетрії.

Граничні умови закріплення поршня, рис. 1.4, задавалися таким чином: по поверхні 1 обмежувались переміщення в напрямку, перпендикулярному до неї, а також обертання відносно двох осей, перпендикулярних осі пальцевого отвору (три ступені вільності). По поверхнях 2 або 3, залежно від напрямку дії навантаження в парі «поршень – палець», виключалися радіальні переміщення відносно осі отвору (два ступені вільності). Додатково, для запобігання обертанню навколо осі пальцевого отвору, фіксація здійснювалася по краю 4 (один ступінь вільності).

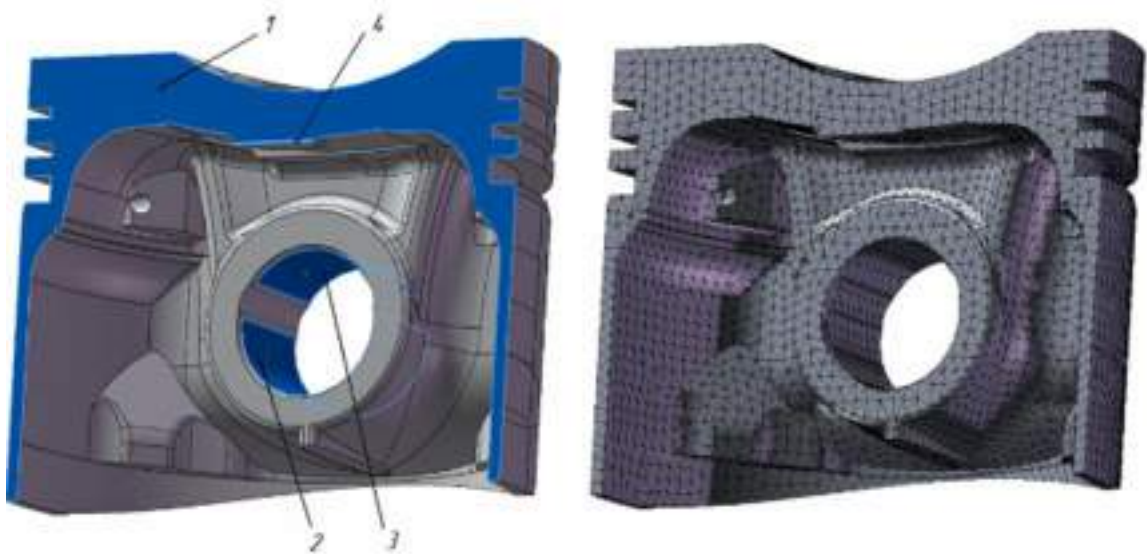


Рисунок 1.4 – Схема закріплення поршня та сітка кінцевих елементів.

Визначення температурного поля та пов'язаних із ним теплових деформацій поршня зводиться до розв'язання задачі теплопровідності з урахуванням заданих граничних умов. Розрахунок виконувався у

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

стаціонарній постановці з використанням усереднених за робочий цикл значень параметрів теплообміну.

Граничні умови третього роду формувалися на основі результатів розрахунку робочого процесу в циліндрі двигуна для заданого режиму (рис. 1.5). Отримані результати розподілу температур і відповідних теплових деформацій наведені на рис. 1.6.

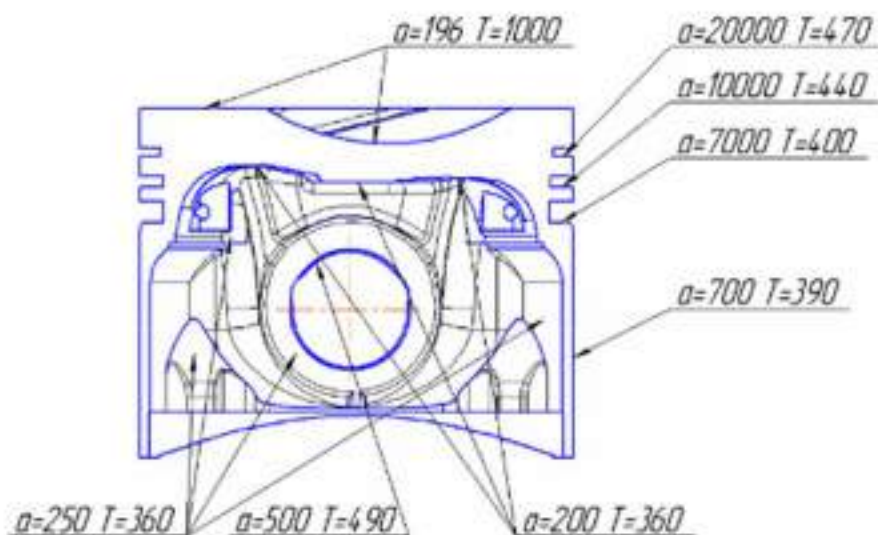


Рисунок 1.5 – Граничні умови теплообміну 3-го роду:  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>К; T – температура, К

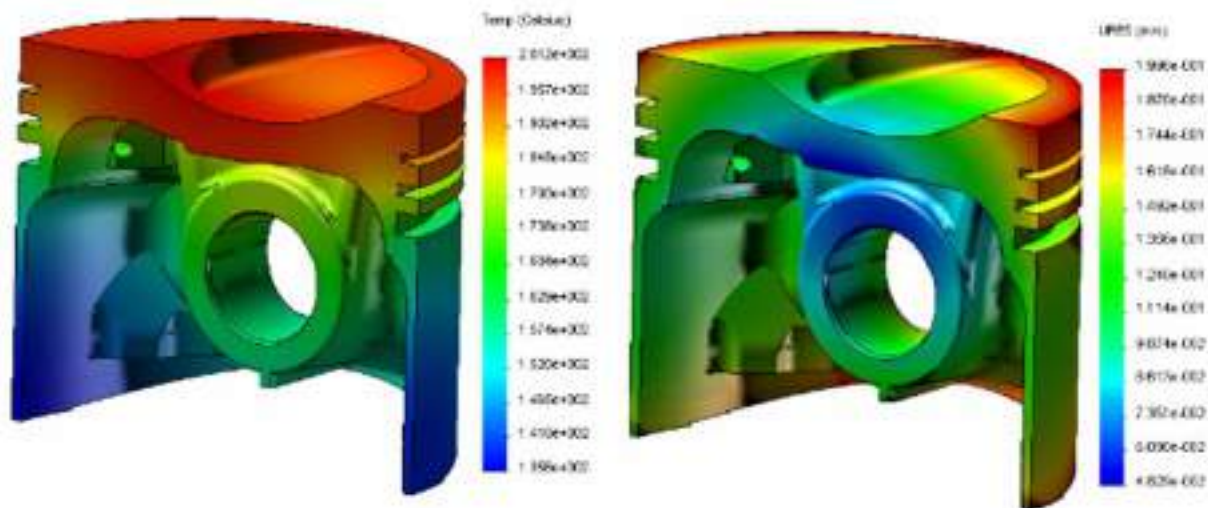


Рисунок 1.6 – Поле температур (ліворуч) та теплових деформацій поршня на розрахунковому режимі (праворуч).

Аналіз деформацій, спричинених механічними навантаженнями, здійснювався з кроком  $5^\circ$  за кутом повороту колінчастого вала. Значення навантажень визначалися на основі індикаторної діаграми та рівнянь динаміки кривошипно-шатунного механізму. Для кожного положення поршня обчислювалися величина і напрям бічної сили (або еквівалентної пари сил), які прикладалися до відповідних зон контакту.

Навантаження розподілялися рівномірно по еліптичних ділянках на поверхні тривимірної моделі поршня, причому для кожного розрахункового випадку формувалися окремі умови прикладання сил. Такий підхід дозволяє більш точно відобразити реальні умови взаємодії поршня з циліндром і оцінити його напружено-деформований стан у різних фазах робочого циклу.

Положення центрів еліптичних зон прикладання бічних навантажень (тобто плечей дії сил) визначалося з урахуванням величини бічної сили, а також моменту, який спричиняє поворот поршня відносно осі поршневого пальця. Геометричні параметри цих ділянок на початковому етапі задавалися виходячи з конструктивних обмежень (допустима ширина та висота контактної зони), а в подальшому уточнювалися за результатами розрахунків.

Таким чином, навантажувальна схема була сформована наступним чином: тиск газів прикладався до поверхні днища поршня; інерційна складова задавалася через прискорення і прикладалася в центрі мас; бічні сили, що виникають у процесі роботи, розподілялися по еліптичних контактних ділянках на поверхні спідниці поршня рівномірно.

У результаті чисельного моделювання змінного напружено-деформованого стану було визначено характер деформацій спідниці поршня (рис. 1.7) залежно від кута повороту колінчастого вала. Отримані дані представлені у вигляді 144 масивів, що містять складові сумарних переміщень уздовж осей  $OX$  та  $OY$ , визначених у 48 дискретних точках на поверхні спідниці.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

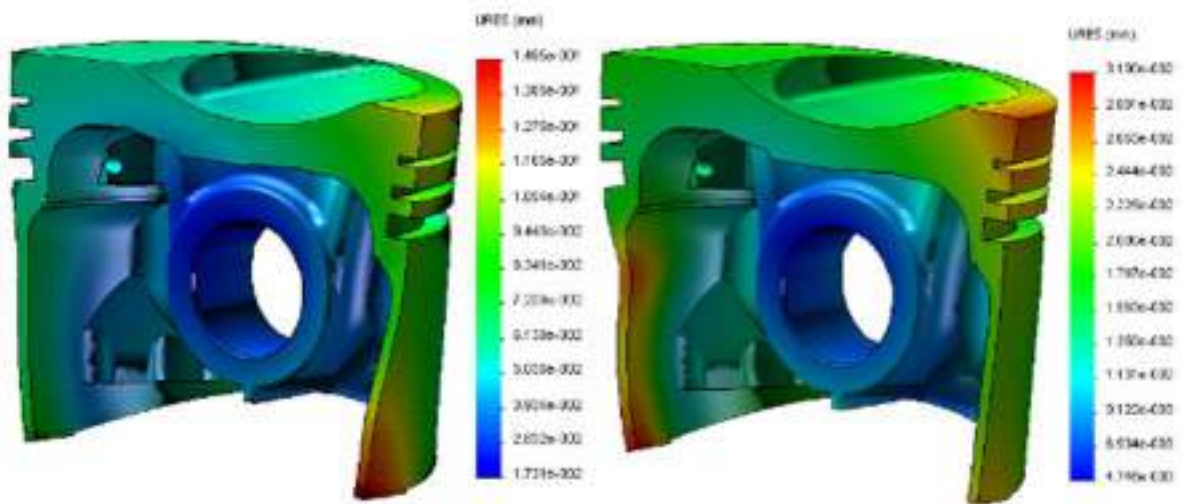


Рисунок 1.7 – Поле деформацій поршня під дією силових факторів у кривошипно-шатунному механізмі: кут повороту колінчастого валу  $\varphi = 375^\circ$  (ліворуч) та  $\varphi = 420^\circ$  (праворуч).

Для визначення гідродинамічних реакцій у мастильному прошарку було прийнято ряд спрощень, що дозволяють сформувану розрахункову модель:

- тиск по товщині мастильного шару вважається рівномірним;
- на межах розрахункової сітки тиск приймається рівним тиску в камері;
- мастильна рідина розглядається як ньютонівська, тобто напруження в ній пропорційні швидкості деформації;
- в'язкість мастила вважається сталою величиною і не залежить від тиску та просторових координат;
- температура мастильного шару задається на основі експериментальних даних.

Прийняті припущення дають змогу спростити розрахунок і водночас зберегти достатню точність оцінювання сил і моментів, що виникають у зоні контакту поршня з циліндром у процесі роботи двигуна.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Аналіз залежності в'язкості моторного масла від температури показав, що в робочому температурному діапазоні її зміна протягом циклу не перевищує приблизно 6 %. Це дозволяє при розрахунку гідродинамічних характеристик мастильного шару приймати в'язкість як сталу величину. Температурний стан мастила в зазорі між поршнем і циліндром визначався на основі експериментальних досліджень [7].

Складна геометрія спідниці поршня, яка має овально-бочкоподібну форму, не дозволяє отримати аналітичний розв'язок рівняння Рейнольдса, тому застосовується чисельний підхід. Для цього розрахункова область мастильного шару дискретизується шляхом побудови кінцево-різницевої сітки, де бічна поверхня поршня поділяється на сукупність двовимірних прямокутних елементів.

Граничні умови для визначення гідродинамічного тиску задаються у вигляді сталого значення картерного тиску по краях спідниці поршня. У результаті розв'язання крайової задачі рівняння Рейнольдса зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь виду:

$$\bar{A} \cdot \bar{X} = \bar{B} \quad (1.4)$$

де  $A$  - матриця коефіцієнтів,  $X$  - вектор невідомих значень тиску в мастильному шарі,  $B$  - вектор правих частин.

Для розв'язання цієї системи використано метод факторизації матриці (LU-розклад), який базується на представленні матриці коефіцієнтів у вигляді добутку нижньої трикутної матриці з ненульовими діагональними елементами та верхньої трикутної матриці з одиничною діагоналлю, за умови, що головні мінори вихідної матриці не дорівнюють нулю.

У результаті чисельного розв'язання отримуються розподіли нормальних і дотичних тисків у мастильному шарі (рис. 1.8). Загальна

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

гідродинамічна реакція визначається інтегруванням елементарних сил по всій площі контакту бічної поверхні поршня.

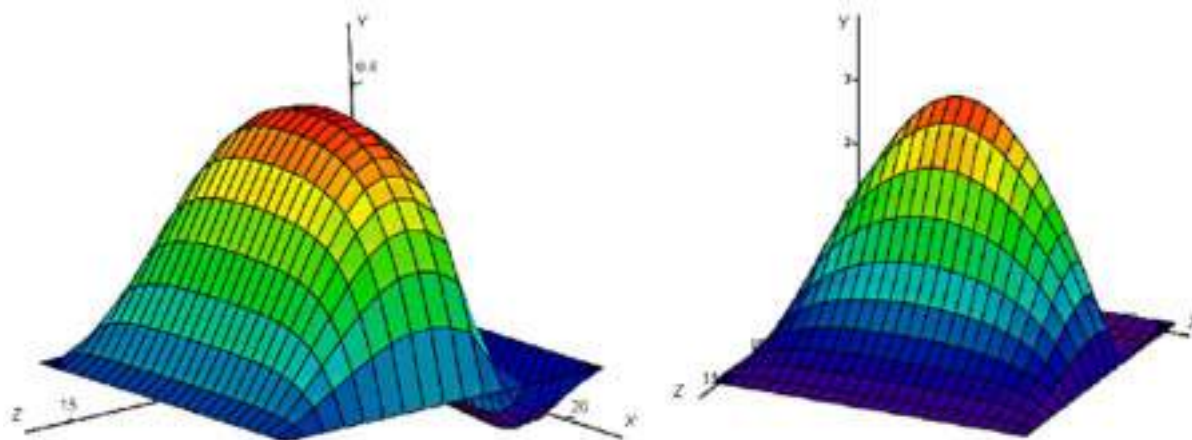


Рисунок 1.8 – Розподіл нормальних тисків по бічній поверхні поршня, МПа, (зліва і праворуч відповідно) при куті повороту колінчастого валу  $\varphi = 420^\circ$ .

Одним із найбільш інформативних показників навантаженості циліндро-поршневої групи є траєкторія руху поршня в циліндрі. Розв’язання системи рівнянь руху у поєднанні з гідродинамічною задачею дозволяє визначити координати центру поршневого пальця, а також оцінити параметри, що характеризують механічні втрати у спряженні «поршень – циліндр».

Слід зазначити, що застосування рівнянь гідродинаміки для опису поведінки мастильного шару можливе лише за наявності ненульових швидкостей руху поршня. Оскільки поршень здійснює зворотно-поступальний рух із періодичною зміною напрямку, у робочому циклі існують ділянки, де його швидкість наближається до нуля. Такі умови виникають поблизу верхньої та нижньої мертвих точок і супроводжуються зниженням несучої здатності мастильного шару, що може призводити до переходу до граничного режиму тертя.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У межах розглянутої методики поведінка поршня в цих зонах визначається на основі експериментальних даних [6]. Водночас у ділянках, де швидкість руху є достатньою для формування повноцінної гідродинамічної плівки, реалізується режим рідинного тертя. У цьому випадку гідродинамічна реакція мастильного шару залежить від положення поршня в циліндрі, тобто від товщини мастильної плівки, і забезпечує врівноваження бічних сил та моментів, що діють на поршень.

Для чисельного розв'язання системи рівнянь було використано метод, що базується на формулах диференціювання у зворотному напрямку (ФДЗН). Суть підходу полягає у зведенні початкової системи диференціальних рівнянь другого порядку до еквівалентної системи рівнянь першого порядку з подальшим застосуванням неявної інтеграційної схеми.

У якості інтеграційного алгоритму застосовано зворотний метод Ейлера, який належить до неявних чисельних методів. Його особливість полягає в тому, що значення шуканих величин на поточному кроці входять як у ліву, так і в праву частину різницевого рівняння, що потребує виконання додаткових обчислень. Разом з тим, такі методи характеризуються підвищеною чисельною стійкістю та, як правило, забезпечують кращу точність порівняно з явними схемами. Це пояснюється наявністю зворотного зв'язку в обчислювальному процесі.

У результаті розв'язання отримано часові залежності поперечного переміщення поршня (вздовж осі ОУ), а також зміни кута його нахилу відносно осі циліндра. Отримані розрахункові криві порівнювалися з експериментальними даними для заданого режиму роботи двигуна, що наведено на рис. 1.9 та 1.10.

Аналіз результатів дозволяє визначити моменти переключення поршня в циліндрі, а також, у поєднанні з даними про напружено-деформований стан, локалізувати зони контакту між поверхнями пари тертя. Крім того, стає можливим виділення ділянок, на яких реалізуються різні режими тертя —

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гідродинамічний та граничний, а також оцінка рівня механічних втрат у випадку рідинного тертя.

Для досліджуваного двигуна Fiat Doblo 1.4 (843 A1.000) встановлено, що поршень четвертого циліндра протягом приблизно 12,63 % часу робочого циклу функціонує в умовах граничного тертя.

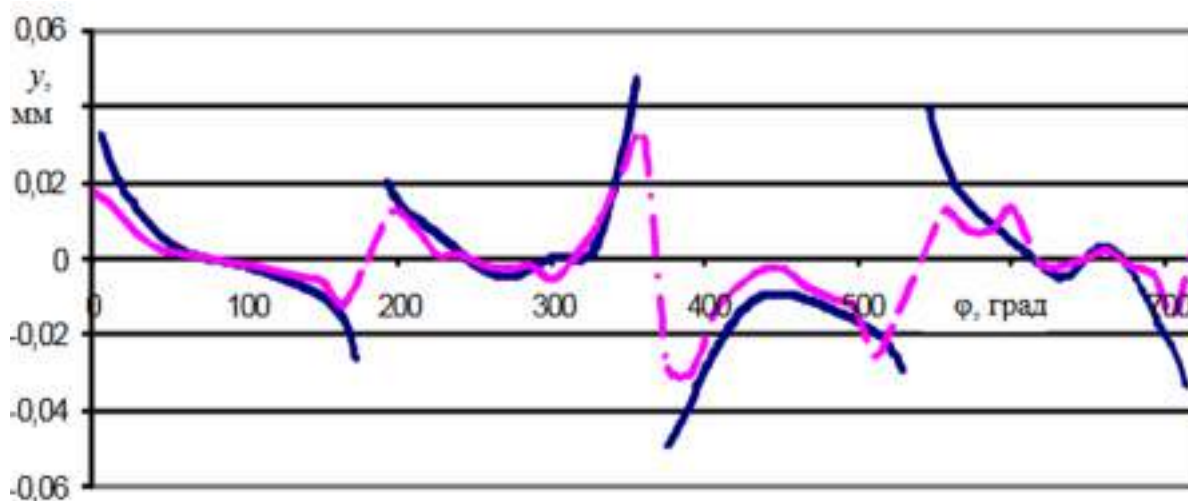


Рисунок 1.9 – Координати центру отвору пальця поршня в залежності від кута повороту колінчастого валу  $\varphi$  (суцільна крива – розрахунок; штрихпунктирна – експеримент).

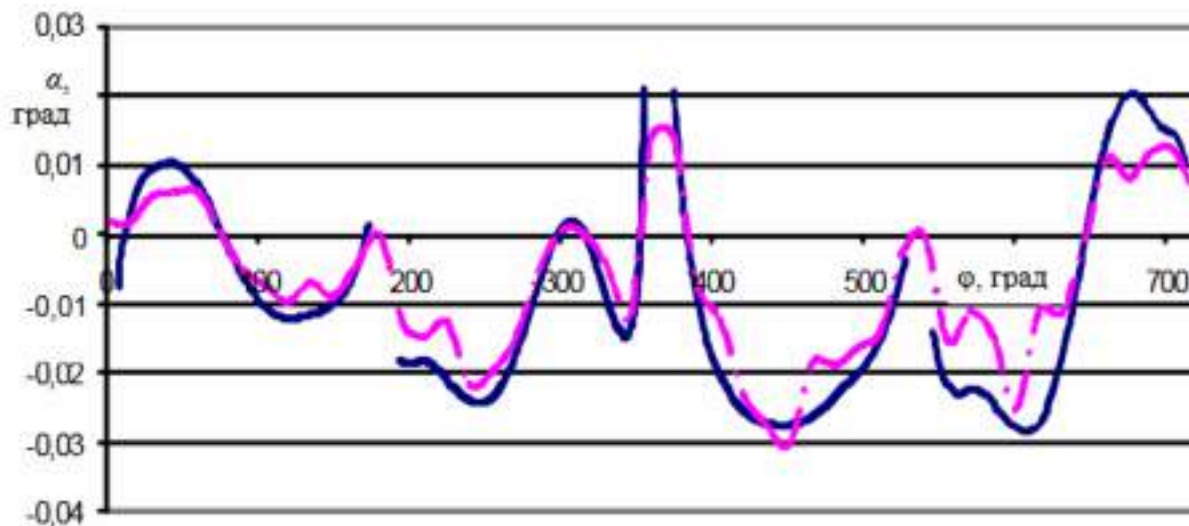


Рисунок 1.10 – Кут нахилу поршня  $\alpha$  в залежності від кута повороту колінчастого валу  $\varphi$  (суцільна крива – розрахунок; штрихпунктирна – експеримент).

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними свідчить про їх задовільну узгодженість за якісними характеристиками.

Середнє відхилення розрахункових даних щодо траєкторії руху поршня становить трохи більше 21 %. Така похибка може бути зумовлена як прийнятими спрощеннями при моделюванні напружено-деформованого стану, так і неточностями експериментальних вимірювань.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

## 2. ОСНОВИ ВИБІРУ МАТЕРІАЛУ ТА МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ПОРШНЯ

### 2.1 Характеристики матеріалів поршнів.

Умови роботи поршнів двигунів внутрішнього згоряння є надзвичайно складними, що обумовлює підвищені вимоги як до самої деталі, так і до матеріалів, з яких вона виготовляється. Основні вимоги до матеріалів поршнів можна сформулювати наступним чином [9]:

- висока міцність у поєднанні з малою густиною;
- низький коефіцієнт теплового розширення;
- добра теплопровідність і теплоємність для ефективного відведення тепла;
- сприятливі антифрикційні властивості у парі зі стінками циліндра;
- стійкість до корозії;
- підвищена зносостійкість;
- добра оброблюваність і придатність до різних технологічних процесів (зокрема лиття);
- економічна доцільність і доступність;
- здатність зберігати властивості при циклічних навантаженнях (втомна міцність);
- стабільність механічних характеристик у широкому температурному діапазоні.

Максимальна ефективність використання матеріалу досягається лише за умови комплексної оптимізації всіх елементів циліндро-поршневої групи, включаючи кільця та гільзу циліндра. Зокрема, застосування однакових або сумісних матеріалів для поршня і гільзи дозволяє зменшити монтажні зазори, оптимізувати роботу ущільнюючих елементів і потенційно знизити їх кількість. Додатково, удосконалення конструкції поршня та поршневого

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пальця на основі розрахунково-експериментальних досліджень сприяє зменшенню маси та покращенню динамічних показників двигуна.

Зміна властивостей матеріалу, зокрема теплопровідності, дозволяє впливати на температурний режим поршня. Наприклад, для двигунів із самозайманням гомогенної суміші доцільним є підвищення температури днища для покращення процесів сумішоутворення, тоді як у бензинових двигунах необхідно обмежувати температуру з метою запобігання детонації.

Аналіз умов роботи та вимог до поршнів показує, що найбільш поширеними матеріалами для їх виготовлення є алюмінієві сплави. Рідше застосовуються сірий чавун, сталі та композиційні матеріали. Найбільш доцільно розглянути алюмінієві сплави та чавун як основні варіанти.

Переваги сплавів алюмінієвих:

- низька густина, що забезпечує значне зменшення маси (приблизно на 30 % у порівнянні з чавуном);
- висока теплопровідність (у 3–4 рази більша, ніж у чавуну), що сприяє зниженню температури днища поршня до приблизно 250 °С;
- хороші антифрикційні властивості;
- низький коефіцієнт тертя в парі з чавунними або сталевими гільзами.

Недоліки сплавів алюмінієвих:

- обмежена втомна міцність, яка зменшується при підвищенні температури;
- високий коефіцієнт теплового розширення;
- зниження міцності при нагріванні (при температурі близько 300 °С міцність може зменшуватися більш ніж наполовину);
- відносно низька твердість і зносостійкість канавок під кільця;
- вища вартість у порівнянні з чавуном.

Для компенсації зазначених недоліків застосовуються різні конструктивні та технологічні рішення, зокрема:

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- розробка спеціальних легованих сплавів із покращеними високотемпературними характеристиками та зниженим коефіцієнтом розширення;

- використання сучасних методів виготовлення заготовок, таких як лиття під тиском, ізотермічне штампування або рідке штампування для евтектичних і гранульованих сплавів.

Переваги чавунних поршнів:

- висока міцність і жаростійкість;
- значна зносостійкість;
- добрі антифрикційні властивості;
- малий коефіцієнт теплового розширення, що дозволяє зменшити робочі зазори;
- відносно низька вартість.

Недоліки чавунних поршнів:

- велика густина, що обмежує їх застосування переважно тихохідними двигунами;
- низька теплопровідність, яка призводить до значного нагрівання днища (до 350–400 °C), що є небажаним для бензинових двигунів через ризик виникнення калильного запалювання та зниження коефіцієнта наповнення.

Сучасні вимоги до поршнів значно зросли, і жоден із традиційних матеріалів не забезпечує повного задоволення всіх критеріїв. Тому актуальним є пошук оптимальних сплавів і технологій, що дозволяють досягти необхідного балансу властивостей.

Для подальшого аналізу доцільно порівняти характеристики алюмінієвих сплавів АЛ2, АК4 та сірого чавуну СЧ24, хімічний склад і фізико-механічні властивості яких наведено в таблицях 2.1–2.5 [10].

У таблицях використано такі позначення: відносне звуження, межа міцності при розтягуванні, відносне подовження, твердість за Брінеллем,

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коефіцієнт лінійного теплового розширення, модуль пружності, питомий електроопір, густина та коефіцієнт теплопровідності.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад АК4, %

Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Al	Cu	Mg	Zn
0,8-1,3	0,5-1,2	До 0,2	0,8-1,3	0,02- 0,1	92,05- 96,08	1,9-2,5	1,4-1,8	До 0,3

Таблиця 2.2 – Механічні, фізичні та технологічні властивості сплаву АК4.

Марка	Механічні властивості				Фізичні властивості				Технологічні властивості		
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	НВ	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м <sup>0</sup> С)	$\alpha \cdot 10^6$ , 1/°С	$E \cdot 10^{-5}$ , МПа	Оброблюваність різанням	Здатність до зварювання	Пластичність при обробці тиском
АК4	421	10	20- 25	117,8	2725	180	22	0,72	В	З	Н

Таблиця 2.3 – Значення твердості сплаву АК4.

Твердість АК4	НВ 10 <sup>-1</sup> = 100 МПа
Твердість АК4 після гартування і старіння	НВ 10 <sup>-1</sup> = 120 МПа

Згідно з даними таблиці 2.1, жароміцні алюмінієві сплави типу АК4-1 системи Al–Cu–Mg–Fe–Ni за своїм хімічним і фазовим складом є близькими до дуралюмінів. Основною відмінністю є використання заліза та нікелю як легуючих компонентів замість марганцю.

Аналіз механічних, фізичних і технологічних властивостей (таблиці 2.2 і 2.3) свідчить, що сплав АК4 добре піддається пластичній деформації у гарячому стані. Він характеризується високою корозійною стійкістю та не має схильності до корозійного розтріскування під дією напружень, незалежно від термічного стану матеріалу. Для додаткового захисту поверхні виробів зазвичай застосовують анодування, оксидування або лакофарбові покриття.

Зварюваність сплаву оцінюється як задовільна: можливе виконання точкового, шовного та аргонодугового зварювання. Оброблюваність різанням залежить від стану матеріалу: у відпаленому стані вона є недостатньою, тоді як після гартування і старіння значно покращується.

Серед важливих експлуатаційних характеристик слід відзначити підвищену зносостійкість, що зумовлено низьким коефіцієнтом тертя. Завдяки поєднанню міцності та жаростійкості сплав АК4 широко застосовується для виготовлення відповідальних деталей, зокрема елементів реактивних двигунів (робочі колеса, компресорні диски, лопатки тощо).

Алюмінієво-кремнієвий сплав АК12 (АЛ2), що належить до групи силумінів, відзначається високою корозійною стійкістю та добрими ливарними властивостями, що підтверджується даними таблиць 2.5 і 2.6.

Вміст кремнію в межах 10–13 % забезпечує високу текучість розплаву, що сприяє якісному заповненню форм, зниженню температури лиття та підвищенню довговічності виливків. Додаткове легування незначними кількостями інших елементів дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики матеріалу.

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 – Хімічний склад АЛ2, %.

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Zr	Mg	Zn
До 1,5	10-13	До 0,5	До 0,1	84,3-90	До 0,6	До 0,1	До 0,1	До 0,3

Таблиця 2.5 – Механічні, фізичні та технологічні властивості сплаву АЛ2.

Марка	Механічні властивості			Фізичні властивості				Рекомендовані способи лиття		Зварюваність, способи зварювання
	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м <sup>0</sup> С)	$\alpha \cdot 10^6$ , 1/°С	$E \cdot 10^{-5}$ , МПа	Температура °С	Позначення	
АЛ2	147	2,0	49,0	2850	176	21,1	0,7	690-760	З, К, Д	Х, Г, А-Д, А-В

Таблиця 2.6 – Значення твердості сплаву АЛ2.

Твердість АЛ2	НВ 10 <sup>-1</sup> = 55 МПа
Твердість АЛ2 після загартування та старіння	НВ 10 <sup>-1</sup> = 110 МПа

Зокрема, введення марганцю підвищує жароміцність і водночас запобігає прилипанню металу до стінок форми під час лиття. Крім того, він зв'язує шкідливі домішки заліза, зменшуючи їх негативний вплив на структуру та властивості сплаву. Добавки титану сприяють подрібненню

зерна, що позитивно впливає як на ливарні властивості, так і на оброблюваність різанням.

Завдяки евтектичній структурі сплав АК12 має відмінні ливарні характеристики, однак його механічна міцність є відносно невисокою. Зокрема, межа короточасної міцності нижча порівняно з деякими іншими алюмінієвими сплавами, що обмежує сферу його застосування деталями, які працюють за помірних навантажень.

Введення фосфору до складу чавуну сприяє підвищенню його рідкотекучості, одночасно збільшуючи зносостійкість, проте разом із цим зростає схильність матеріалу до структурних змін під час експлуатації. Для покращення експлуатаційних характеристик застосовують легування: додавання хрому підвищує твердість і опір зношуванню, тоді як нікель сприяє подрібненню структури та зменшенню коефіцієнта теплового розширення (таблиця 2.7).

Основними перевагами чавунних поршнів є їх висока міцність, значна зносостійкість і невелике лінійне теплове розширення.

Проведений аналіз можливих матеріалів для виготовлення поршнів показує, що як сірий чавун СЧ24, так і алюмінієвий сплав АК12 мають суттєві обмеження для використання в умовах сучасних двигунів. До їх недоліків належать недостатня втомна міцність, яка додатково знижується при підвищенні температури, а також обмежена зносостійкість. Крім того, ці матеріали не забезпечують надійної роботи поршня за високих теплових навантажень.

Хоча силумін АК12 характеризується відносно меншим коефіцієнтом теплового розширення (дещо нижчим, ніж у АК4), його механічні властивості є недостатніми для використання у відповідальних деталях, що працюють під значними навантаженнями.

З урахуванням проведеного аналізу можна зробити висновок, що найбільш придатним матеріалом для виготовлення поршнів є алюмінієвий

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сплав АК4. Він значно перевершує АК12 і СЧ24 за механічними характеристиками, зберігає працездатність при підвищених температурах і має відносно низький коефіцієнт теплового розширення, що забезпечує його ефективне використання в умовах інтенсивних теплових і силових навантажень.

Таблиця 2.7 – Хімічний склад СЧ24, % .

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
2.9-3.2	1.2-1.6	0.8-1.2	до 0.2	до 0.15	до 0.3	до 0.5

Таблиця 2.8 – Механічні властивості виливків із сірого чавуну СЧ24.

Марка	Межа міцності, МН/м <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )		Твердість за Брінеллем, НВ	Тимчасовий опір при розтягуванні $\sigma_b$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> )
	При розтягуванні	При згинні		
СЧ24	240 (24)	440 (44)	170...241	240 (24)

Таблиця 2.9 – Тимчасовий опір при розтягуванні та твердість у стінках виливки різного перерізу

Марка чавуну	Товщина стінки виливки, мм						
	4	8	15	30	50	80	150
Тимчасовий опір при розтягуванні, МПа, щонайменше							
СЧ24	310	270	250	210	180	165	150
Твердість НВ, не більше							
СЧ24	260	255	245	238	187	170	156

Таблиця 2.10 – Фізичні властивості чавуну з пластинчастим графітом

Марка чавуну	Щільність, $\rho$ кг/м <sup>3</sup>	Лінійне усадження, $\epsilon$ , %	Модуль пружності при розтягуванні, $E \times 10^{-2}$ МПа	Питома теплосмієність при температурі від 20 до 200°С, G, Дж(кг×К)	Коефіцієнт лінійного розширення при температурі від 20 до 200°С, $\alpha$ 1/°С	Теплопровідність при 20 °С, $\lambda$ , Вт (м × К)
СЧ24	$7,2 \times 10^3$	1,2	Від 900 до 1100	500	$10,0 \times 10^{-6}$	50

Алюмінієвий сплав АК4 демонструє високу корозійну стійкість у середовищах, характерних для роботи двигуна, зокрема у бензині та моторному маслі. Завдяки наявності кремнію у складі, цей матеріал добре протистоїть впливу мало агресивних середовищ, що повністю відповідає вимогам, які висуваються до матеріалів поршнів.

Отже, вибір матеріалу для деталей двигуна внутрішнього згорання повинен базуватися на комплексному аналізі їхніх властивостей і поведінки в експлуатаційних умовах. Досягнення необхідних характеристик можливе лише за умови дотримання технологічних режимів виготовлення та проведення відповідної термічної обробки. Остаточне рішення щодо матеріалу поршня приймається з урахуванням його експлуатаційних вимог, технологічності та економічної доцільності. Проведений аналіз показує, що серед розглянутих матеріалів – сірого чавуну, алюмінієвих сплавів АЛ2 та АК4 – найкраще заданим умовам відповідає саме сплав АК4.

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Для покращення експлуатаційних характеристик алюмінієвих сплавів до їх складу вводять різні легуючі компоненти, кожен із яких виконує певну функцію.

Магній сприяє підвищенню міцності, дещо покращує корозійну стійкість і оброблюваність різанням. Його низька густина також є важливою перевагою при виготовленні легких конструкцій, а здатність поглинати вібрації позитивно впливає на роботу деталей.

Залізо, з одного боку, знижує пластичність і корозійну стійкість алюмінію, тому зазвичай вважається небажаною домішкою. Водночас у жароміцних алюмінієвих сплавах воно може виконувати корисну роль, підвищуючи їхню міцність за високих температур.

Кремній є одним із ключових елементів, що визначають властивості сплаву. Він утворює евтектичну структуру з алюмінієм, підвищує міцність і суттєво покращує ливарні характеристики, знижуючи температуру плавлення. Разом із тим, надлишок кремнію може призводити до утворення крихких голкоподібних включень, що зменшують пластичність і тріщиностійкість матеріалу.

Нікель і хром підвищують жароміцність, уповільнюючи дифузійні процеси та сприяючи формуванню стабільних зміцнюючих фаз у структурі сплаву.

Титан використовується для модифікації структури, оскільки сприяє подрібненню зерна, що забезпечує підвищення міцності та однорідності властивостей матеріалу.

Марганець покращує корозійну стійкість і підвищує жароміцність сплавів, особливо у поєднанні з іншими легуючими елементами.

Цинк зміцнює алюмінієву матрицю, а введення міді (до 6 %) сприяє підвищенню втомної міцності та теплопровідності, а також покращує ливарні властивості, що може знижувати собівартість виготовлення. Водночас це може супроводжуватися деяким зниженням зносостійкості.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Додаткові модифікуючі елементи, такі як натрій, азот і фосфор, використовуються для підвищення зносостійкості матеріалу.

## 2.2 Технологічний процес виготовлення автомобільних поршнів.

Заготовки поршнів з алюмінієвих сплавів отримують переважно двома основними способами: литтям у кокіль та ізотермічним штампуванням. При ізотермічному штампуванні метал не доводять до рідкого стану, а нагрівають до температури, за якої він набуває високої пластичності, після чого формоутворення здійснюється на гідравлічних пресах із використанням спеціального оснащення. Така технологія сприяє підвищенню щільності структури матеріалу, покращенню його механічних характеристик і зменшенню схильності до деформацій під час експлуатації.

У сучасному серійному та масовому виробництві найпоширенішими залишаються литі поршні з алюмінієвих сплавів. Водночас найвищу міцність демонструють ковані поршні, які виготовляють із попередньо отриманих литих заготовок шляхом їх подальшого пластичного деформування. Для алюмінієвих сплавів характерна відносно невисока температура кування, що зазвичай становить близько 500 °С.

Лиття у кокіль є технологічно простим і економічно доцільним методом, який забезпечує отримання виробів складної геометрії та дозволяє застосовувати сплави з низьким коефіцієнтом лінійного розширення. Проте цей спосіб має низку недоліків, зокрема підвищену ймовірність утворення внутрішніх дефектів у виливках і відносно низький коефіцієнт використання металу через значні втрати у вигляді ливарних відходів.

Заготовки, отримані гарячим штампуванням деформівних сплавів, характеризуються більш однорідною структурою та вищою якістю. Однак такі матеріали мають більший коефіцієнт лінійного розширення (на 15–20% більше порівняно з литими сплавами), що може негативно впливати на

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботу поршня в умовах змінних температур. Крім того, при штампуванні спостерігаються значні втрати металу у вигляді облоя та технологічних напусків, що також знижує ефективність використання матеріалу.

Таким чином, вибір раціональної технології виготовлення поршнів залежить від вимог до їх міцності, точності геометрії, термостійкості та економічної доцільності виробництва, що буде детальніше розглянуто у таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Порівняльна характеристика литих і кованих поршнів

№		Литі поршні	Ковані поршні
1.	Застосування	Для легкових автомобілів, двигунів, які не сприймають важкі навантаження.	Для форсованих двигунів, тому що литі не здатні витримувати високих навантажень.
2.	Обсяг продукції, що виготовляється	Серійне, масове виробництво	Однічне виробництво
3.	Вартість	Дешевші	Дорожчі
4.	Вага	Легші	Тяжкі
5.	Міцність	Литі поршні поступаються кованим	
6.	Структура	Крупна	Дрібна
7.	Твердість, од.	80-90	130
8.	Робоча температура днища	До 200 °С	До 350 °С та вище
9.	ЛЕ	Бажано менший вміст Si	Бажано більший вміст Si
10.	Термоциклічна стійкість		В 6 раз більше

№ 4 таблиці 2.11.

Експлуатація двигуна у важких режимах супроводжується значними механічними та тепловими навантаженнями на всі його елементи, зокрема на поршні. Враховуючи їх високошвидкісний зворотно-поступальний рух, інерційні сили суттєво зростають зі збільшенням маси деталі. Саме тому маса

поршня є критичним параметром: чим вона більша, тим вищі навантаження виникають у вузлі. Ковані поршні, як правило, мають меншу масу порівняно з литими, що сприяє зниженню інерційних навантажень і покращує умови роботи двигуна.

№ 5 таблиці 2.11.

У процесі виготовлення литих поршнів у матеріалі можуть формуватися мікродфекти, які не впливають на роботу двигуна за номінальних режимів. Проте при підвищенні потужності і, відповідно, навантаження на поршень, ці дефекти можуть стати осередками концентрації напружень. Це підвищує ризик появи деформацій або навіть руйнування деталі під час експлуатації.

№ 9 таблиці 2.11.

Хімічний склад сплаву, зокрема вміст кремнію, суттєво визначає як технологію виготовлення, так і експлуатаційні властивості поршнів. Для кованих виробів зазвичай застосовують сплави з підвищеним вмістом кремнію, що забезпечує кращу теплостійкість і зменшення коефіцієнта теплового розширення. У випадку лиття можливе утворення структурних неоднорідностей через нерівномірну кристалізацію кремнію, що може призводити до формування більш крихкої структури матеріалу.

У межах даної кваліфікаційної роботи розглядається серійне виробництво поршнів. З огляду на це, незважаючи на переваги ізотермічного штампування, як основний метод обрано лиття, що є більш доцільним з технологічної та економічної точок зору для масового виготовлення поршнів легкових автомобілів.

До кокілів висувають наступні вимоги:

Перед виконанням заливки кокіль підлягає обов'язковій підготовці, яка включає такі етапи:

1. Ретельне очищення робочих поверхонь форми та площин роз'єму від забруднень, корозії та залишків мастильних матеріалів.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

2. Контроль працездатності рухомих елементів, перевірка точності їх взаємного розташування та надійності фіксації.

3. Нанесення на робочі поверхні та металеві стрижні спеціальних вогнетривких покриттів, що забезпечують захист форми та покращують якість виливка.

Після нанесення покриття форму нагрівають до робочої температури, яка визначається складом сплаву, геометрією та товщиною стінок майбутнього виробу, а також заданими експлуатаційними властивостями. Як правило, температура попереднього нагріву кокіля знаходиться в межах 150–250 °С. Далі здійснюється заливання розплаву. Після часткового охолодження до необхідного рівня форму розкривають і витягують готову виливку, після чого технологічний цикл повторюється.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 АСПЕКТИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ПОРШНІВ.

Термічна обробка алюмінієвих сплавів застосовується з метою формування необхідних експлуатаційних властивостей матеріалу. Її ефективність визначається трьома основними параметрами: температурою нагрівання, тривалістю витримки при цій температурі та швидкістю охолодження. Змінюючи ці фактори, можна цілеспрямовано впливати на структуру сплаву і, відповідно, на його механічні характеристики. Тривалість нагрівання залежить від типу термічного обладнання, габаритів деталей і способу їх розміщення в печі, тоді як час витримки визначається інтенсивністю фазових перетворень.

Силумінові сплави характеризуються обмеженою здатністю до зміцнення шляхом термічної обробки, оскільки їх властивості значною мірою формуються ще на етапі лиття. Проте для підвищення міцності застосовують операції гартування та старіння, а для усунення внутрішніх напружень, структурної неоднорідності та дефектів, що знижують пластичність, використовують відпал.

#### 3.1 Гартування сплавів алюмінієвих.

Гартування алюмінієвих сплавів полягає у створенні пересиченого твердого розчину – нестійкого фазового стану, в якому максимально розчинені легувальні елементи. Такий стан забезпечує підвищення твердості й міцності порівняно з рівноважною структурою, а також створює передумови для подальшого зміцнення під час старіння.

Процес гартування включає нагрівання сплаву до температури, за якої інтерметалідні фази максимально розчиняються в алюмінієвій матриці, витримку при цій температурі та подальше швидке охолодження до

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кімнатних умов. Для алюмінієвих сплавів характерний вузький інтервал температур гартування, який зазвичай знаходиться в межах 450–560 °С.

Правильний вибір температури є критично важливим. Надмірне перегрівання може призвести до явища перепалу – локального оплавлення по межах зерен, що викликає утворення тріщин і порушення суцільності матеріалу. Такі дефекти є незворотними і значно погіршують механічні та корозійні властивості виробу.

Тривалість витримки при температурі гартування повинна бути достатньою для розчинення інтерметалідних фаз, але водночас мінімальною. Вона залежить від розміру та розподілу фаз: у деформованих сплавах вони мають дрібнодисперсний характер, тому час витримки становить десятки хвилин, тоді як у литих сплавах, де присутні грубі евтектичні включення, цей час може досягати кількох годин.

Швидкість охолодження є ще одним важливим параметром. Вона повинна перевищувати критичне значення, характерне для конкретного сплаву, щоб запобігти виділенню надлишкових фаз під час охолодження. Якщо охолодження недостатньо інтенсивне, відбувається частковий розпад пересиченого твердого розчину, що призводить до зниження міцності та корозійної стійкості після старіння. Для уникнення цього інтервал часу між вилученням деталі з печі та її зануренням у гартувальне середовище повинен бути мінімальним (як правило, не більше 15–30 секунд).

Після гартування алюмінієві сплави характеризуються відносно невисокими показниками міцності, проте мають високу пластичність, що створює сприятливі умови для подальшого зміцнення в процесі старіння.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.2 Охолоджувальне середовище для гартування.

У виробничій практиці для гартування алюмінієвих сплавів найчастіше застосовують охолодження у воді – переважно холодній, рідше підігрій. Такий спосіб забезпечує високу інтенсивність відведення тепла, необхідну для формування пересиченого твердого розчину.

Разом із тим, використання води не завжди є оптимальним рішенням. Надмірно висока швидкість охолодження призводить до виникнення значних внутрішніх напружень у матеріалі, що може спричиняти деформації (короблення) деталей. Особливо це характерно для великогабаритних виробів або деталей складної форми, для яких подальше виправлення геометрії після гартування є складним, трудомістким і економічно затратним процесом.

У зв'язку з цим важливим завданням є підбір такого охолоджувального середовища для кожного конкретного сплаву, яке забезпечить швидкість охолодження, достатню для запобігання розпаду пересиченого твердого розчину, але водночас нижчу, ніж при гартуванні у воді. Це дозволяє зменшити рівень внутрішніх напружень і підвищити якість готових виробів.

### 3.3 Прожарюваність матеріалу.

У процесі подальшого старіння зміцнення алюмінієвих сплавів може відбуватися нерівномірно по товщині деталі. У зв'язку з цим важливим є визначення прожарюваності сплаву, а також встановлення її залежності від хімічного складу (марки алюмінію) і геометричних параметрів заготовки. Даний показник дозволяє оцінити можливість забезпечення рівномірного гартування виробів різної форми та розмірів.

Прожарюваність характеризує здатність матеріалу після гартування зберігати пересичений твердий розчин у всьому об'ємі деталі, що є

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідною умовою для досягнення заданих механічних властивостей під час старіння. Вона визначається, насамперед, критичною швидкістю охолодження, а також чинниками, що впливають на стабільність пересиченого стану.

Крім того, на рівень прожарюваності впливають конструктивні особливості виробу, зокрема його розміри, форма, розташування в печі під час термічної обробки, а також стан поверхні. Чим нижча критична швидкість охолодження для конкретного сплаву, тим вищою є його прожарюваність, що полегшує досягнення рівномірних властивостей по всьому перерізу деталі.

### 3.4 Старіння металу.

Старіння алюмінієвих сплавів – це процес витримки після гартування при відносно невисоких температурах, у результаті якого відбуваються структурні зміни в пересиченому твердому розчині або починається його розпад. Основне призначення цього етапу термічної обробки полягає у підвищенні міцнісних характеристик матеріалу.

Під час старіння пересичений твердий розчин, що сформувався після гартування, поступово переходить у більш стабільний стан. У результаті цього процесу з однорідної фази утворюється двофазна структура: твердий розчин із меншим вмістом легувальних елементів та дисперсні виділення інтерметалідних сполук, які відрізняються за складом і кристалічною будовою. Ці виділення відокремлені від матриці чіткою міжфазною поверхнею.

Високий ступінь пересичення твердого розчину після гартування зумовлює його термодинамічну нестійкість. Тому процес розпаду є самодовільним і супроводжується зменшенням вільної енергії системи. У багатьох алюмінієвих сплавах початкові стадії цього процесу можуть

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відбуватися навіть без додаткового нагрівання – при зберіганні виробів за звичайних температур (приблизно від 0 до 30 °С). Водночас для деяких сплавів активація процесів розпаду можлива лише за умови нагрівання до температур 100–200 °С, що сприяє інтенсифікації дифузійних процесів.

Залежно від умов проведення розрізняють природне та штучне старіння. Природне старіння відбувається при кімнатній температурі та супроводжується поступовим підвищенням міцності матеріалу з часом. Штучне старіння передбачає нагрівання загартованого сплаву до температур, як правило, у межах 100–200 °С з витримкою від кількох годин до десятків годин, що дозволяє суттєво прискорити процес зміцнення.

Особливістю алюмінієвих сплавів є наявність так званого «свіжозагартованого стану» – стану матеріалу одразу після гартування, коли його властивості можуть значно відрізнитися від характеристик після певного часу витримки. У процесі природного або штучного старіння структура сплаву зазнає тонких змін, які не завжди можна виявити звичайними методами мікроскопії. Детальне дослідження цих перетворень стало можливим завдяки застосуванню рентгеноструктурного аналізу, що дозволило встановити механізми початкових стадій розпаду пересиченого твердого розчину.

Старіння суттєво впливає на механічні характеристики сплаву АК4. У стані безпосередньо після гартування межа міцності становить близько 420 МПа, тоді як після проведення старіння цей показник зростає приблизно до 600 МПа (рисунок 3.1). За умов природного старіння при температурі близько 20 °С максимальні значення міцності досягаються через 4–5 діб після гартування. При цьому на початковому етапі швидкість зміцнення є невисокою, далі вона зростає, а після досягнення пікового значення знову знижується. Типовий характер зміни міцності в процесі природного старіння наведений на рисунку 3.2.

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

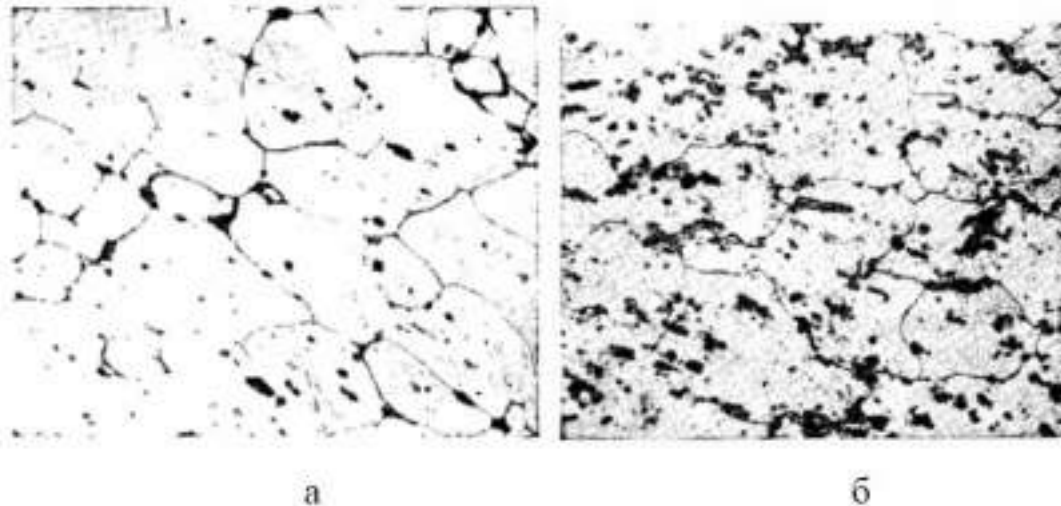


Рисунок 3.1 – Мікроструктура сплаву АК4:

а - після загартування; б - після загартування та штучного старіння.

Початкова стадія, під час якої підвищення міцності практично не спостерігається або є незначним, називається інкубаційним періодом. Цей інтервал має важливе практичне значення, оскільки в цей час матеріал зберігає високу пластичність. Це дозволяє виконувати різні технологічні операції, пов'язані з деформацією, такі як клепання, згинання чи відборткування. Однак уже через 2–3 години після гартування пластичність різко зменшується, що ускладнює або робить неможливим виконання таких операцій.

Стан після природного старіння не є стабільним. При короткочасному нагріванні сплаву до температури 200–250 °С відбувається його розм'якшення. Це пояснюється тим, що дисперсні виділення надлишкової фази розчиняються, і матеріал знову набуває властивостей, характерних для свіжозагартованого стану, включаючи здатність до подальшого природного старіння. Таке явище називають поверненням.

У сплавах системи Al–Cu процеси старіння мають свої особливості. Помітне виділення другої фази відбувається переважно під час штучного старіння при температурах понад 200 °С (рис. 3.2), причому в цьому випадку матеріал не досягає максимальної міцності. Дані рентгеноструктурних

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

досліджень свідчать, що при досягненні максимальної міцності під час природного старіння класичні виділення другої фази відсутні, а зміцнення не пов'язане з повним розпадом пересиченого твердого розчину (рисунок 3.3).

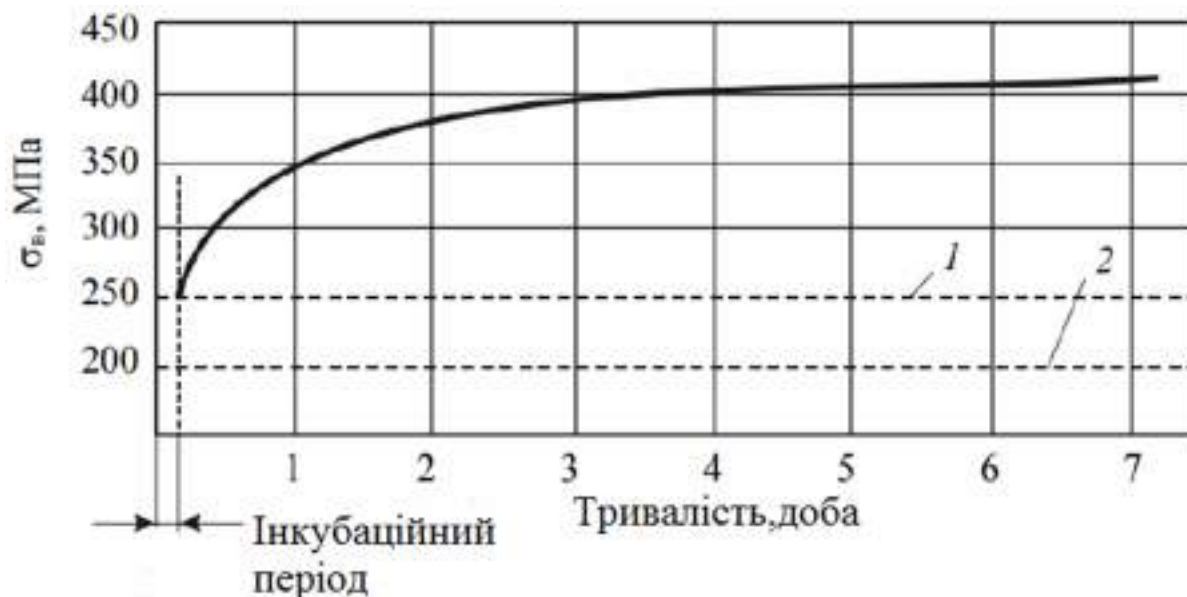


Рисунок 3.2 – Зміна міцності при природному старінні алюмінієвого сплаву:

1 - загартований стан; 2 – відпалений стан

Згідно з сучасними уявленнями, підтвердженими методами рентгеноструктурного аналізу та просвічувальної електронної мікроскопії, у процесі природного старіння спочатку відбуваються підготовчі структурні зміни. Безпосереднє виділення нових фаз можливе лише за підвищених температур, коли активізується дифузія атомів. На початковій стадії старіння атоми міді, які після гартування розташовані хаотично, починають концентруватися у певних ділянках кристалічної ґратки. У результаті формуються локальні області з підвищеним вмістом міді – так звані зони Гінґе–Престона, які відіграють ключову роль у процесі зміцнення сплаву.

– на початковій стадії старіння атоми міді не виділяються з твердого розчину, тому середнє значення параметра кристалічної ґратки залишається практично незмінним;

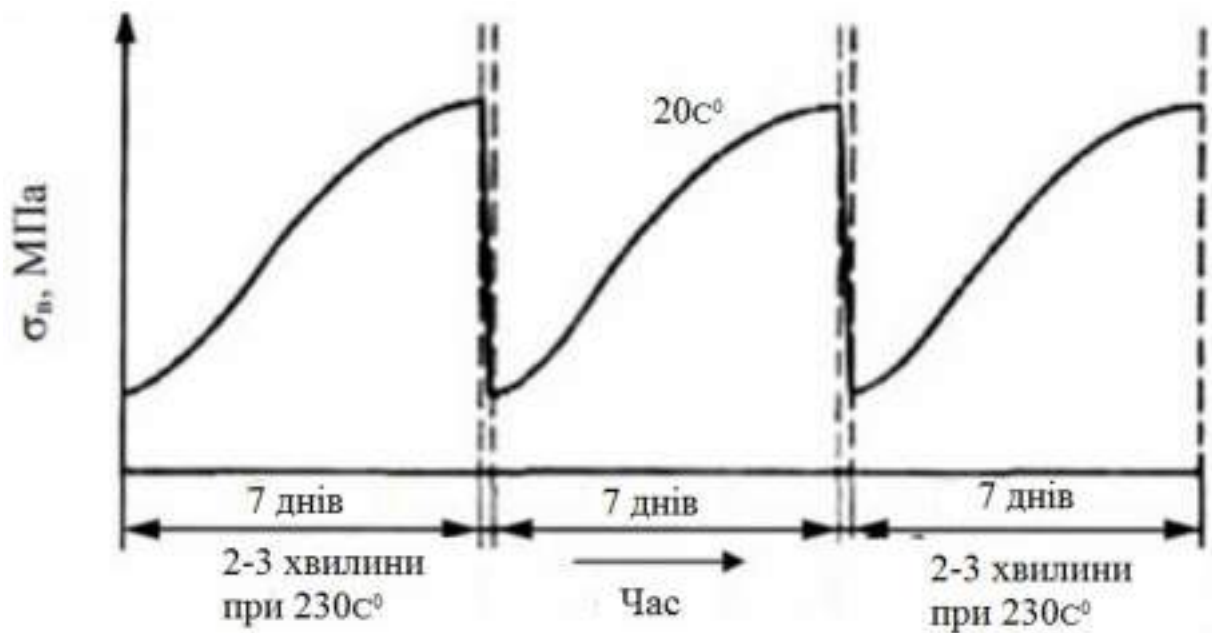


Рисунок 3.3– Криві старіння після повернення до загартованого стану (короткочасне нагрівання при температурі  $230^\circ\text{C}$ )

– у ділянках із підвищеною концентрацією міді параметри ґратки відрізняються від збіднених зон, що спричиняє виникнення внутрішніх напружень, подрібнення мозаїчної структури кристалу та, як наслідок, підвищення твердості матеріалу;

– концентрація міді у зонах Гінґе–Престона зростає, однак ще не досягає стехіометричного складу сполуки  $\text{CuAl}_2$ ;

– ці зони мають вигляд надзвичайно тонких пластинчастих або дископодібних утворень із товщиною порядку  $0,5\text{--}1\text{ нм}$  і діаметром приблизно  $4\text{--}10\text{ нм}$  (рисунок 3.4, а);

– у подальшому розвитку процесу старіння відбувається збільшення розмірів цих зон: їх товщина може досягати  $1\text{--}4\text{ нм}$ , а діаметр –  $20\text{--}30\text{ нм}$ , при цьому вміст міді наближається до складу фази  $\text{CuAl}_2$ . Прийнято розрізняти дрібні зони (Г.–П.-1) та укрупнені (Г.–П.-2). Етап формування таких зон називають зонним старінням, що відрізняє його від наступної стадії – фазового старіння;

										Арк.
										48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КВРМТВА. 22095.01.17.00					

– після формування зон типу Г.–П.-2 підвищення температури або тривала витримка, наприклад при 100 °С, призводить до їх перетворення у метастабільну фазу  $\theta'$ . Вона вже є окремою фазою з власною кристалічною ґраткою, яка, однак, залишається когерентно пов'язаною з матрицею (рисунок 3.4, б);

– при подальшому підвищенні температури  $\theta'$ -фаза переходить у стабільну  $\theta$ -фазу ( $\text{CuAl}_2$ ), що супроводжується укрупненням частинок (коагуляцією) (рисунок 3.4, в).

Отже, процес старіння алюмінієвих сплавів відбувається послідовно через такі стадії: свіжозагартований стан  $\rightarrow$  утворення зон Гінґе–Престона (Г.–П.-1  $\rightarrow$  Г.–П.-2)  $\rightarrow$  формування метастабільної фази  $\theta'$   $\rightarrow$  перехід у стабільну фазу  $\theta$ .

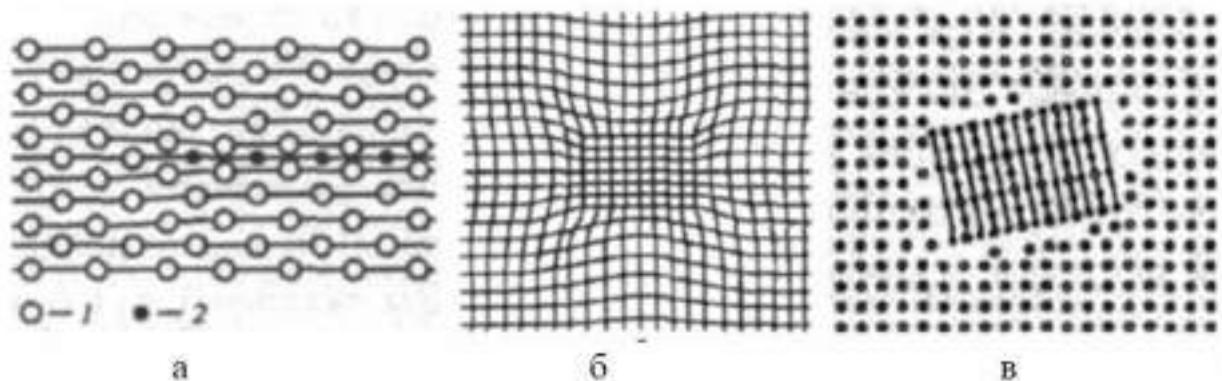


Рисунок 3.4 – Типи виділень із пересиченого твердого розчину:

а– зона Г.–П.: 1– атоми розчинника Al; 2 – розчинені атоми Cu;

б – кристали метастабільної фази  $\theta'$  (когерентне виділення);

в – кристали стабільної фази  $\theta$  (некогерентне виділення)

### 3.5 Обґрунтування та розрахунок режимів термічної обробки поршнів

При розрахунку норм часу нагрівання деталі необхідно визначити критерій  $Bi$ , який дозволяє віднести вироби до "тонких" або "масивних" тіл, для цього визначимо до якого класу відноситься поршень. Довжина поршня значно перевищує ширину та товщину, тому віднесемо його до класу циліндра.

Поправочний коефіцієнт класу циліндра  $m_{ц}$  визначають з виразу:

$$m_{ц} = 1 + \frac{1}{4} Bi, \quad (3.1)$$

Критерій циліндра:

$$Bi = \frac{A_{ц} \cdot \alpha \cdot S_{ц}}{\lambda}, \quad (3.2)$$

Критерій форми:

$$A_{ц} = \frac{P}{\sqrt{4\pi F_{п}}}, \quad (3.3)$$

$$S_{ц} = \sqrt{\frac{F_{п}}{\pi}}, \quad (3.4)$$

де  $P$  - довжина периметра поперечного перерізу, мм;  $F_{п}$  – площа поперечного перерізу, мм<sup>2</sup>;  $S_{ц}$  - геометричний розмір, діаметр для циліндра, мм.

$$d_{cp} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3}, \quad (3.5)$$

$$d_{cp} = 62,5/3 = 20,8 \text{ мм}$$

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>\*С;  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/м\*С.

$$\alpha = 0,09 \left( \frac{t_p}{100} \right)^{3+10}, \quad (3.6)$$

$$\alpha = 0,09 \cdot \left( \frac{700}{100} \right)^{3+10} = 40,9 \text{ ккал/м}^2\text{С} = 47,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{С} = 171360 \text{ Вт/ч} \cdot \text{м} \cdot ^\circ\text{С}$$

$$A_{\text{ц}} = \frac{318 \text{ мм}}{\sqrt{4 \cdot 3,14 \cdot 6308 \text{ мм}^2}} = \frac{318}{282} = 1,13;$$

$$S_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{6308 \text{ мм}^2}{3,14}} = 44,82 \text{ мм} = 0,04482 \text{ м}$$

$$Bi = \frac{1,13 \cdot 47,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{С} \cdot 0,04482 \text{ м}}{180 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{С}} = 0,013 \quad (\text{безрозмірна величина}) < 0,25,$$

відноситься до тонких тіл.

Розрахунок часу нагрівання проводиться за формулою для тонких тіл за постійної температури печі:

$$t_{\text{н}} = \frac{G \cdot C}{\alpha \cdot F} * 2,31 \lg \left( \frac{t_{\text{сп}} - t_{\text{мн}}}{t_{\text{сп}} - t_{\text{мк}}} \right), \quad \text{год}; \quad (3.7)$$

де  $G$  маса тіла, кг;  $C$  - питома теплоємність, Дж/кг <sup>0</sup>С;  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі; Вт/год м <sup>0</sup>С;  $F$  - активна площа, мм<sup>2</sup>.

$$F = 2\pi R h + 2\pi R^2 = 2\pi R(h+R), \quad (3.8)$$

$$F = 238,64 * 121 = 28875 \text{ мм}^2 = 0,029 \text{ м}^2$$

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

де  $t_{cp}$  - температура печі,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{мн}$  - температура кімнатна,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{мк}$  - температура загартування,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$m = V \cdot \rho = \pi^2 h \cdot \rho, \quad (3.9)$$

$$m = 3.14 \cdot 38 \cdot 38 \cdot 83 \cdot 0.0028 \text{ г/мм}^3 = 1054 \text{ г} = 1 \text{ кг} . \quad (3.10)$$

Час нагріву при загартуванні визначають за формулою:

$$\tau_{н} = \frac{1 \cdot 797}{171360 \cdot 0,029} 2,31 \text{ г} \left( \frac{700-20}{700-510} \right) = 1,27 \cdot 0,16 = 0,2 \text{ ч} = 12 \text{ хв.}$$

Час витримки при загартуванні розраховують за такою формулою:

$$\tau_{в} = 2,5 \text{ хв} + 1,3 \text{ хв на } 1 \text{ мм ум. Товщини}, \quad (3.11)$$

$$\tau_{в} = 2,5 + 1,3 \cdot 20,8 = 29,54 = 30 \text{ хв}$$

Час охолодження знаходимо за формулою:

$$\tau_{ох} = \frac{t_{мк} - t_{мн}}{v_{охл}}, \text{ хв} \quad (3.12)$$

Швидкість охолодження обчислюється за такою формулою:

$$v_{ох} = C(S/V)n, \quad (3.13)$$

$$v_{ох} = 797(28875 / 376335) 0,9 = 82 \text{ мм/с},$$

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $S$  - повна площа деталі,  $\text{мм}^2$ ;  $V$  - об'єм деталі,  $\text{мм}^3$ ;  $n$  - постійна, для алюмінію = 0,9.

За формулою знаходимо час охолодження при загартуванні (рис. 3.5):

$$\tau_{\text{ох}} = \frac{510-20}{82} = 5.98 \text{ хв}$$

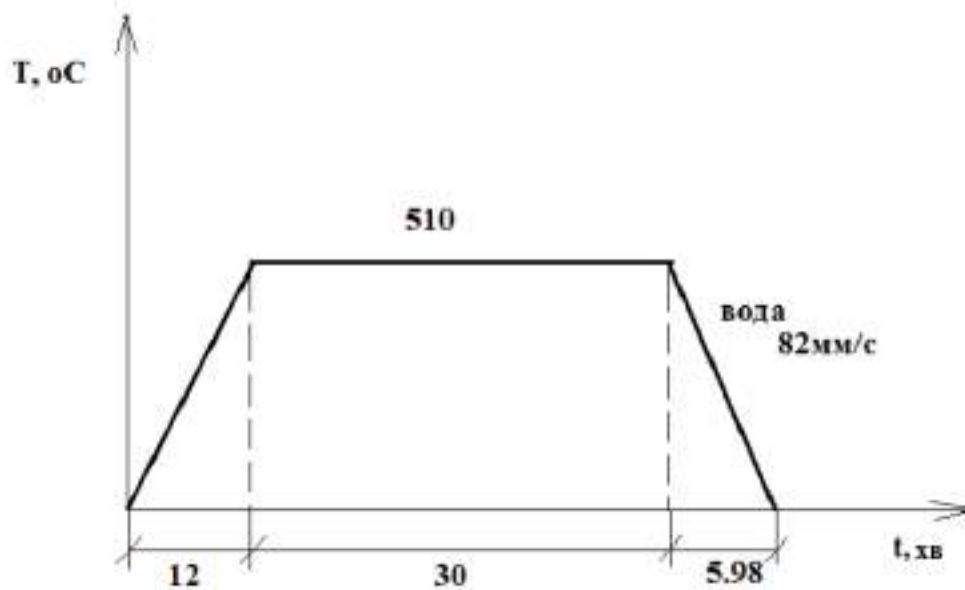


Рисунок 3.5 – Температурні режими загартування.

Час нагріву при старінні визначають за формулою:

$$\tau_{\text{н.відп}} = \frac{1 \cdot 797}{171360 \cdot 0,029} \cdot 2,31 \lg \left( \frac{700-20}{700-150} \right) = 0,21 \cdot 0,16 = 0,03 \text{ год.} = 1,8 \text{ хв.}$$

Час витримки при старінні розраховують за такою формулою:

$$T = 15 \text{ год.} + 1 \text{ хв.}$$

$$\text{На } 1 \text{ мм. умовної товщини} = 15 \text{ год.} + 20,8 \text{ хв.} = 15 \text{ год. } 21 \text{ хв.}$$

Час охолодження при старінні (рис. 3.6):

$$\tau_{\text{ох}} = \frac{150-20}{82} = 1.56 \text{ хв.}$$

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

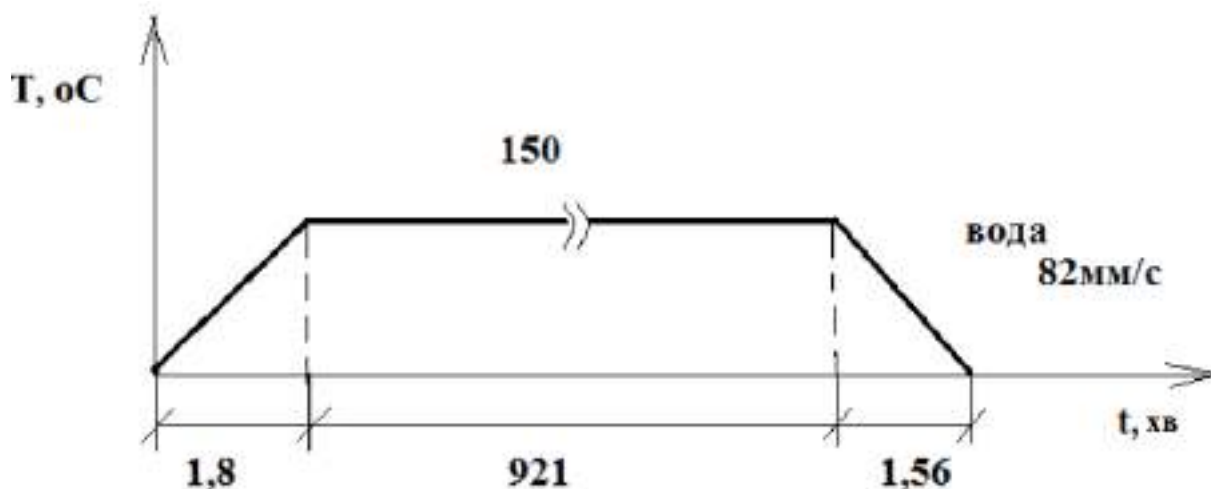


Рисунок 3.6 – Температурні режими штучного старіння

### 3.6 Створення спеціальних покриттів.

З метою підвищення експлуатаційних характеристик поршнів широко застосовуються різні види захисних і функціональних покриттів. Як правило, на поверхню наносять тонкий шар товщиною в кілька мікрометрів. Основне призначення таких покриттів полягає у прискоренні процесу припрацювання деталей, зменшенні коефіцієнта тертя та підвищенні зносостійкості.

Алюмінієві сплави потребують спеціальної підготовки перед нанесенням покриттів, оскільки їх поверхня швидко окиснюється з утворенням тонкої оксидної плівки, що ускладнює адгезію. Тому технологічний процес передбачає застосування методів очищення та активації поверхні.

Серед основних способів обробки поверхні поршнів використовують лудіння, фосфатування та нанесення керамічних покриттів.

Лудіння передбачає нанесення на поверхню поршня тонкого шару легкоплавкого металу – олова або його сплавів. Товщина такого покриття зазвичай становить 0,002–0,005 мм. Існує два основні способи реалізації цього процесу: гальванічний та вакуумно-плазмовий.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Гальванічне лудіння здійснюється електролітичним методом і є технологічно відносно простим, причому не вимагає попереднього повного видалення оксидної плівки. Проте цей спосіб має суттєві недоліки: низьку адгезію покриття до основи, а також підвищену небезпеку для здоров'я людини і навколишнього середовища через використання шкідливих речовин.

Більш сучасним варіантом є застосування вакуумно-плазмових технологій. Умови розрідженого середовища запобігають утворенню оксидної плівки під час обробки, що забезпечує міцне зчеплення покриття з основним матеріалом. Такі покриття відзначаються кращими фізико-механічними властивостями, а сам процес є екологічно безпечнішим. Крім того, цей метод дозволяє точно регулювати товщину шару.

Фосфатування полягає у формуванні на поверхні металу фосфатної плівки шляхом обробки деталей у гарячих (90–100 °С) розчинах фосфатів заліза, марганцю, цинку або кадмію. Отримане покриття, рис. 2.7, має дрібнокристалічну структуру і, на відміну від багатьох інших покриттів, хімічно зв'язане з основним металом. У результаті формується двошарова структура: внутрішній шар є еластичним і міцно зчепленим із основою, тоді як зовнішній – твердий, пористий і кристалічний. Така будова забезпечує високу зносостійкість, зменшення тертя та здатність утримувати мастильний матеріал. Оптимальна товщина фосфатного шару становить приблизно 5–7 мкм (0,005–0,007 мм).

Таким чином, вибір технології нанесення покриття визначається вимогами до експлуатаційних властивостей поршня, умовами його роботи та економічною доцільністю застосування конкретного методу.

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

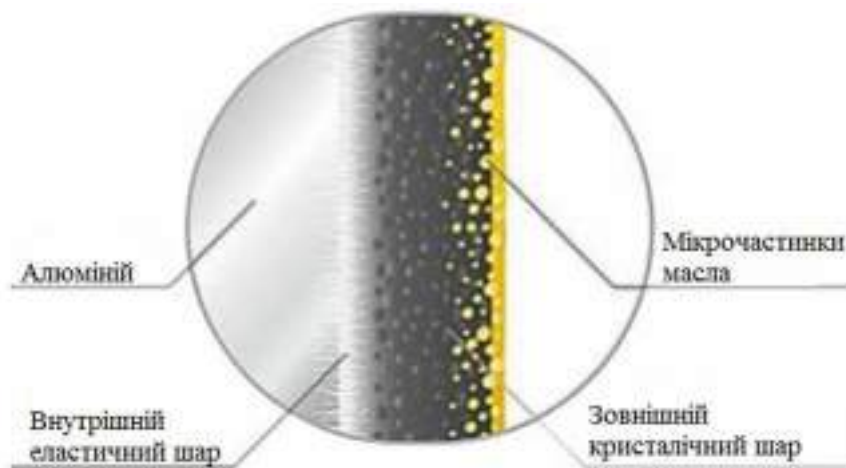


Рисунок 2.7 – Фосфатне покриття поршня.

Переваги фосфатного покриття [13]:

- підвищення стійкості до впливу кислотних середовищ у 10 разів і більше;
- збільшення маслоємності поверхні у 2–4 рази порівняно з необробленим металом (приблизно з 2,5 до 7–10 г/см<sup>2</sup>);
- збереження захисних властивостей покриття при температурах до 500 °С;
- зниження коефіцієнта тертя на 25–30 %;
- відповідність пружних властивостей плівки еластичності основного матеріалу поршня.

Покриття керамічні. Результати численних досліджень свідчать, що застосування керамічних покриттів у двигунах внутрішнього згорання (як дизельних, так і бензинових) дає подібний ефект. Кераміка відзначається високими теплоізоляційними властивостями, зокрема здатністю акумулювати тепло в приповерхневих шарах поршня. Утворений шар виступає ефективним бар'єром, який обмежує теплопередачу вглиб матеріалу.

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До основних переваг керамічних покриттів належать: висока термостійкість, хімічна інертність, значна твердість, мала густина, підвищена зносостійкість, низька теплопровідність, а також висока міцність на стиск.

Порівняльний аналіз різних видів покриттів показав, що найбільш доцільним для застосування є фосфатування. Даний метод забезпечує необхідні експлуатаційні властивості поршня, зокрема покращення зносостійкості та зменшення тертя, а також є економічно обґрунтованим для серійного виробництва.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

1. Геометрія зовнішньої бічної поверхні поршня формується з урахуванням як механічних навантажень (тиску газів і інерційних сил), так і теплових впливів, що виникають під час згоряння паливоповітряної суміші. Такий підхід дозволяє забезпечити надійну роботу вузла без заклинювання поршня в циліндрі, запобігти прориву газів у картер і уникнути перегріву або прогорання елементів камери згоряння.

2. Запропонований підхід до аналізу динамічних процесів руху поршня дає змогу встановити залежність між конструктивними параметрами циліндро-поршневої групи та показниками ефективності роботи двигуна, що є важливим для оптимізації його експлуатаційних характеристик.

3. При обґрунтуванні вибору матеріалу для виготовлення поршня ключовим фактором є величина теплового розширення, яка безпосередньо впливає на зазор між поршнем і циліндром. Цей зазор повинен забезпечувати належні умови змащування та мінімізацію тертя без ризику заклинювання. У межах дослідження було проаналізовано технологічні, експлуатаційні та економічні показники сплавів АК4, АЛ2 (АК12) та СЧ24. За результатами порівняльного аналізу найбільш доцільним виявився сплав АК4.

4. Розроблено технологічний режим термічної обробки поршня та виконано розрахунок його основних параметрів. Запропонований процес включає гартування з нагріванням до 510 °С, витримкою протягом 30 хвилин і подальшим інтенсивним охолодженням у воді, а також штучне старіння при температурі 150 °С з витримкою 15 годин 21 хвилину і наступним охолодженням. Такий режим забезпечує формування необхідних механічних властивостей матеріалу поршня.

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кисликов В. Ф., Лущик В. В. Будова й експлуатація автомобілів: Підручник. — 6-те вид. - К.: Либідь, 2006. — 400 с.
2. Діагностика і технологія ремонту автомобілів : підруч. / В. М. Коваленко, В. К. Щуріхін. – Київ : Літера ЛТД, 2017. – 224 с.
3. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.
4. Kolbenschäden – erkennen und beheben. MS Motor Service International GmbH. – Germany :Wilhelm-Maybach-Straße, Neuenstadt, 2010. – 92 pp.
5. Zhinan Zhang. Design approach for optimization of a piston ring profile considering mixed lubrication / Zhinan Zhang, Jun Liu, Youbai Xie // friction Volume 4, (2016). – p.p. 335–346
6. Тарандушка Л.А. Параметричне проектування 3D-моделі кривошипно-шатунного механізму автомобіля з використанням САПР Solidworks / Л.А. Тарандушка, А.В. Йовченко // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2022. Вип. 5(36), ч.ІІ. – С. 195-201
7. Гурей І. В. Розрахунково-експериментальні методи керування процесами граничного змащування технічних трибосистем. Монографія. – Хмельницький: ТНТУ, 2020. – 170 с.
8. Основи теорії примежового шару [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / А. А. Халатов, Є. В. Мочалін, Н. Ф. Димитрієва ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,86 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 191 с.
9. Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Долганов К. Є. Автомобільні двигуни: Підручник. К. : Арістей, 2006. – 476 с.

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

10. Матеріалознавство та технологія металів : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А. М. Власенко. – Київ : Літера ЛТД, 2019. – 224 с.

11. Большаков В.І., Береза О.Ю., Харченко В.І. Прикладне матеріалознавство. – РВА «Дніпро-VAL», 2000. – 290с.

12. Матеріалознавство: підручник / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, А.О. Мовлян., Е.І. Плешаков; за ред. проф. С.С. Дяченко. – Харків: ХНАДУ, 2007. – 440 с

13. Корж В. М. Нанесення покриття : навчальний посібник / В. М.Корж. — К. : Арістей, 2005. — 204 с.

					КВРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КвРМТВА. 22095.01.17.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61