

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Аналіз технологічних методів відновлення робочих поверхонь гільз
циліндрів вантажних автомобілів із дослідження характеру впливу фінішних
методів обробки поверхонь гільз циліндрів на їх трибологічні властивості

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МАм-62
спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

	<u>Тарас ЯЦКІВ</u> (прізвище та ініціали)
	<u>(підпис)</u>
Керівник	<u>Андрій ГУПКА</u> (прізвище та ініціали)
	<u>(підпис)</u>
Нормоконтроль	<u>Михайло ЛЕВКОВИЧ</u> (прізвище та ініціали)
	<u>(підпис)</u>
Зав. кафедри	<u>Олег ЦЬОНЬ</u> (прізвище та ініціали)
	<u>(підпис)</u>
Рецензент	<u>(підпис)</u>
	<u>(прізвище та ініціали)</u>

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

Факультет Інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра Автомобілів

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«14» листопада 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 Автомобільний транспорт

(шифр і назва спеціальності)

студенту Яцківу Тарасу Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз технологічних методів відновлення робочих поверхонь гільз циліндрів вантажних автомобілів із дослідження характеру впливу фінішних методів обробки поверхонь гільз циліндрів на їх трибологічні властивості

Керівник роботи Гупка А.Б., к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» листопада 2025 року № 4/7-972.

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Технологічні методи відновлення та фінішної обробки робочих поверхонь гільз циліндрів і їх вплив на трибологічні властивості. Робочі поверхні гільз циліндрів двигунів вантажних автомобілів у процесі експлуатації та відновлення.

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

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

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

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

Гайка – 1 лист А1

Шток – 1 лист А1

Обойма – 1 лист А1

Поршень – 1 лист А1

Демпфер – 1 лист А1

Технологічний процес розбирання та складання ресор – 1 лист А1

Підйомник Складальне креслення – 1 лист А1

Силовий вузол Складальне креслення – 1 лист А1

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 14.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	16.11.2025	
2	Технологічний розділ	22.11.2025	
3	Конструкторський розділ	29.11.2025	
4	Науково-дослідний розділ	6.12.2025	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	13.12.2025	
6	Оформлення графічної частини	19.12.2025	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	23.12.2025	

Студент

(підпис)

Тарас ЯЦКІВ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Андрій ГУПКА

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ресурсу дизельних двигунів вантажних автомобілів, зниженням витрат пального й мастильних матеріалів, а також забезпеченням високої надійності та задиростійкості трибоспряження «гільза циліндра – поршневі кільця» за умов форсованих режимів роботи.

У загальнотехнічній частині виконано огляд сучасних тенденцій у двигунобудуванні, проаналізовано умови роботи гільз циліндрів форсованих дизелів, наведено характеристику традиційного хонінгування та його недоліків щодо формування оптимальної структури поверхневого шару. Розглянуто принцип дії плосковершинного хонінгування, параметри мікрорельєфу (A , C , B , R_a , R_z , маслоємність профілю), а також вплив геометрії рисок і опорної поверхні на утримання мастила та процес припрацювання.

У технологічному розділі проаналізовано метод силового розкочування кулькою, показано його переваги щодо формування регулярного мікрорельєфу та підвищення маслоємності, а також виявлено недоліки – підвищені витрати масла на вигорання та низьку продуктивність. Детально розглянуто метод хімічного фосфатування робочої поверхні гільз, умови отримання пористого фосфатного шару та його роль у полегшенні припрацювання пари тертя, зокрема для циліндрів з твердохромованими поршневими кільцями.

Особливу увагу приділено комплексному дослідженню поверхонь після «звичайного» хонінгування, де показано, що надмірно низька шорсткість і пластична деформація поверхневого шару, закриття графітових пор та наявність мікротріщин погіршують маслоємність та задиростійкість. На основі цього обґрунтовано доцільність застосування плосковершинного та рівновершинного хонінгування, наведено схеми формування двоярусного профілю, вимоги до параметрів A , C , несучої частини профілю B та питомої маслоємності.

У роботі розроблено критерії вибору профілю поверхні циліндра для різних ступенів форсування двигуна та стану термічної обробки гільз

(гартовані/негартовані), запропоновано рекомендовані зернистості й концентрації алмазних брусків для основного і фінішного хонінгування, наведено узагальнені параметри мікрорельєфу для плоскоплощинного та рівновершинного профілів.

Окремий розділ присвячено механо-хімічній триботехнології нанесення спеціального припрацьовуючого покриття на рівновершинний профіль поверхні гільз: описано склад кислотно-фосфатної суміші, принцип роботи антифрикційних брусків, режими обробки та механізм формування фосфатного шару з підвищеними антифрикційними властивостями. Наведено результати моторно-стендових випробувань, на основі яких встановлено залежність витрат масла на вигоряння та інтенсивності зношування від параметрів мікропрофілю й типу припрацьовуючого покриття.

Практична цінність роботи полягає в тому, що сформульовані рекомендації щодо вибору технології хонінгування (плосковершинного чи рівновершинного), параметрів мікропрофілю та типу припрацьовуючого покриття можуть бути використані при модернізації ремонтних і виробничих технологій обробки гільз циліндрів вантажних автомобілів, що забезпечить підвищення ресурсу циліндро-поршневої групи, зниження витрат масла й палива та покращення екологічних показників двигунів.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	1
ЗМІСТ	3
ВСТУП	5
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ	6
1.1 Шляхи підвищення параметрів задиростійкості поверхонь гільз циліндрів	6
1.1.1 Характеристика процесу плосковершинного хонінгування поверхонь гільз циліндрів	6
1.1.2 Метод силового розкочування робочої поверхні гільзи циліндра	18
1.2 Метод хімічного фосфатування робочої поверхні гільзи циліндра	20
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	22
2.1 Комплексне дослідження та аналіз характеристик поверхні гільзи циліндра після «звичайного» хонінгування	22
2.2 Комплексне дослідження та критерії вибору основних характеристик робочого профілю технологічної поверхні гільзи циліндра після плосковершинного хонінгування	24
2.3 Комплексне дослідження та критерії вибору основних характеристик робочого профілю технологічної поверхні гільзи циліндра після рівновершинного хонінгування	27
2.4 Методика дослідження технології триботехнічного нанесення спеціального припрацьовуючого покриття на робочі поверхні гільзи циліндрів із рівновершинним профілем після хонінгування	34
2.5 Критерії вибору та техніко-економічний аналіз технологічних процесів хонінгування робочих поверхонь гільз циліндрів та технологій триботехнічного нанесення спеціальних припрацьовуючих покриттів	35
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	40

3.1 Вплив структури чавуну гільз циліндрів на зносостійкість деталей циліндро-поршневої групи	40
3.2 Характер впливу припрацьовуючих покриттів поверхонь гільз циліндрів на параметри їх задиро- і зносостійкості	50
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ	55
4.1 Дослідження характеру впливу основних хімічних елементів на трибологічні властивості перлітного чавуну для гільз циліндрів	55
4.2 Розробка технології виготовлення та дослідження гільз циліндрів із перлітних чавунів	62
4.3 Шляхи підвищення параметрів зносостійкості негартованих гільз циліндрів	71
4.4 Розробка технології виготовлення та дослідження негартованих гільз циліндрів для заміни гартованих гільз циліндрів	75
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	78
5.1 Розрахунок звукоізолюючої здатності дільниці	78
5.2 Розрахунок заземлення дільниці	79
5.3 Організація і порядок проведення робіт по знезараженню на об'єкті	79
ВИСНОВКИ	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86

ВСТУП

Розвиток автомобілебудування вимагає підвищення технічного рівня і конкурентоспроможності двигунів. Суть цих вимог полягає в підвищенні їх ресурсу і літрової потужності, в зниженні витрат пального і мастила, затрат на виробництво, технічне обслуговування і ремонт. Надійність двигунів автомобілів залежить від їх конструкції, технології виробництва, точності виконання складальних операцій, якості пального і мастила та умов експлуатації. Одним із напрямків забезпечення високих техніко-економічних показників двигуна є підвищення зносостійкості основних деталей трибоспряжень і зниження в них механічних втрат на тертя та зношування.

Досягнення заданого ресурсу двигунів забезпечується використанням зносостійких верхніх поршневих кілець з робочою поверхнею, покритою твердим полірованим електролітичним хромом, масло ємність і змочуваність мастилом якої практично нульова. У зв'язку з цим, надійне припрацювання таких поршневих кілець в циліндрах досягається спеціальною технологією обробки робочих поверхонь гільз циліндрів.

Для підвищення задиро- і зносостійкості гільз циліндрів розроблено та зреалізовано спеціальні технології плоско- і рівновершинного хонінгування з нанесенням трибо логічним методом на їх поверхню металополімерного або кислотного припрацьовую чого покриття. Ефективність примінення даних технологій підтверджено рядом досліджень процесів припрацювання і зношування гільз циліндрів і поршневих кілець в період технологічної і повної обкатки двигунів з різними ступенями форсування з метою вибору оптимальної структури чавуну для гільз циліндрів і припрацьовую чого покриття.

Як показала практика, експлуатація автомобілів із середньо форсованими двигунами, обробка робочих поверхонь гільз циліндрів повинна здійснюватися методом плоско вершинного хонінгування з нанесенням припрацьовую чого металополімерного покриття, а для високо форсованих двигунів, методом рівно вершинного хонінгування з нанесенням кислотного покриття.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Шляхи підвищення параметрів задиростійкості поверхонь гільз циліндрів

1.1.1 Характеристика процесу плосковершинного хонінгування поверхонь гільз циліндрів

У найближчому майбутньому двигуни внутрішнього згорання, які сьогодні забезпечують близько 70 % загального обсягу енергетичних установок, за прогнозами фахівців залишатимуться основним джерелом енергії й надалі. Очікується, що їхня частка у світовому паливно-енергетичному балансі зросте до 80 %, що свідчить про їхню стратегічну важливість для транспортної та промислової інфраструктури. Разом із зростанням кількості двигунів постійно підвищується їхня питома потужність, яка досягається завдяки інтенсивному форсуванню, зокрема застосуванню турбонаддуву. Такий підхід дає можливість значно збільшити теплові та механічні навантаження на елементи кривошипно-шатунного механізму, однак водночас негативно впливає на їхній ресурс.

В умовах посиленого впливу високих температур і тисків знижується зносостійкість і стійкість до задирів у парах тертя, особливо в період обкатки і на подальших етапах експлуатації. Підвищення навантаженості спричиняє зростання механічних втрат і додаткову витрату палива, а також призводить до збільшення прориву газів у картер, росту витрат масла на вигорання і скорочення строку його ефективної роботи. Усе це вимагає вдосконалення триботехнічних властивостей деталей двигуна для забезпечення їхньої безвідмовності та економічності.

Таким чином, підвищення задиростійкості й зносостійкості деталей кривошипно-шатунного механізму, а також зменшення витрат пального та мастильних матеріалів у форсованих дизельних двигунах є одним із ключових напрямів сучасного двигунобудування. Для України це питання має особливо важливе значення, оскільки розвиток вітчизняного автомобілебудування є

необхідною умовою забезпечення галузей економіки сучасною та конкурентно спроможною технікою.

Аналіз наукових праць та технологічних рішень свідчить, що одним із найефективніших способів підвищення зносостійкості деталей циліндро-поршневої групи та покращення паливно-економічних показників двигуна є застосування гільз циліндрів, оброблених за технологією плосковершинного хонінгування. Така поверхнева обробка сприяє зменшенню втрат на тертя, покращенню утримання мастила в зоні контакту та підвищенню ресурсу двигуна в цілому.

Хонінгування належить до фінішних операцій механічної обробки та здійснюється за допомогою хонінгувальної головки, оснащеної абразивними брусками, які виконують функцію багаторіжучого інструменту. У їх основі використовуються абразивні матеріали на керамічній або алмазній зернистій основі. Під час роботи головка здійснює одночасно обертальний та зворотно-поступальний рух, забезпечуючи рівномірне зняття металу по всій поверхні циліндра, що дозволяє досягти високої точності геометричних параметрів і мінімальних відхилень форми.

У результаті хонінгування на робочій поверхні циліндра формується характерна мікрорельєфна сітка із дрібних рисок, що перехрещуються під певним кутом. Значення цього кута визначається співвідношенням швидкостей обертального та осьового рухів інструмента, а також залежить від діаметра циліндра й режимів обробки. Така мікрогеометрія поверхні забезпечує оптимальні умови змащування й сприяє стабільності роботи пари тертя «гільза—поршневі кільця» протягом усього строку експлуатації.

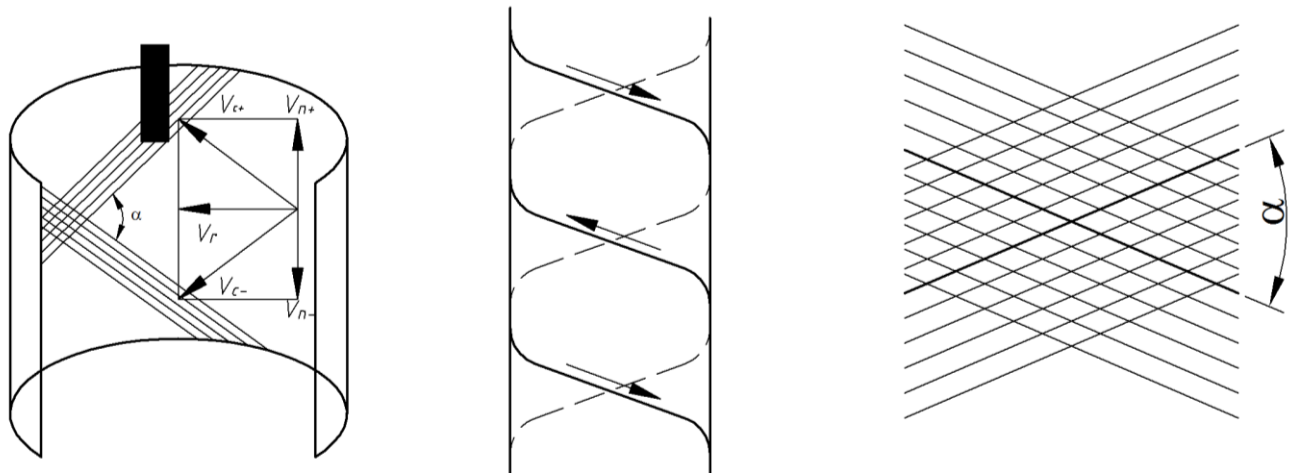


Рисунок 1.1 Типові характери руху робочих брусків в процесі хонінгування поверхонь гільз циліндрів:

V_r , V_o і V_c – відповідно швидкість обертання хонінгувальних брусків, швидкість робочих ходів хонінгувальних брусків, швидкість процесу хонінгування; α – кут перетину рисок на поверхні гільзи циліндра.

Вивчення впливу плосковершинного мікропрофілю поверхні циліндра на покращення роботи пари тертя «циліндр–поршневі кільця» свідчить, що саме така структура забезпечує мінімальний знос у період припрацювання, знижує інтенсивність задирних процесів і сприяє зменшенню витрат пального та мастила під час експлуатації двигуна. Оптимальна технологічна поверхня повинна гарантувати рівномірний розподіл мастильного шару, ефективне ущільнення надпоршневого простору, а також зниження механічних втрат на тертя, що позитивно позначається на загальній економічності двигуна. Практика доводить, що поверхня має поєднувати властивості високоякісного ковзання, властиві гладким поверхням, зі здатністю утримувати мастило, характерною для шорстких поверхонь із розвиненим мікрорельєфом.

Досягнення таких експлуатаційних характеристик забезпечується застосуванням двоступеневої технології хонінгування, яка виконується за одне встановлення циліндра у верстаті. Хонінгувальна головка комплектується абразивними брусками різної зернистості, що чергуються між собою.

На першому етапі, основному хонінгуванні, робочі елементи середньої зернистості забезпечують формування точної геометрії циліндра та створюють

глибшу сітку мікрорисок потрібних параметрів. Ці риси виконують роль маслозатримувальних канавок, необхідних для стабільного змащування.

Другим етапом є завершальне хонінгування за допомогою дрібнозернистих брусків, які зрізають вершини мікрорельєфу, формуючи характерний плосковершинний профіль поверхні. У результаті утворюється топографія, що поєднує знижену площу фактичного контакту з відмінною здатністю накопичувати мастило в мікроканалах. Такий профіль забезпечує оптимальні умови роботи поршневих кілець, підвищує їх ресурс, зменшує втрати на тертя та сприяє економнішій роботі двигуна.

Хонінгувальне устаткування дозволяє автоматично та послідовно поєднувати обробку брусками різної зернистості, за потреби забезпечуючи невелике перекриття у часі їх роботи. Це сприяє підвищенню стабільності технологічного процесу та забезпечує високу повторюваність заданих параметрів поверхні.

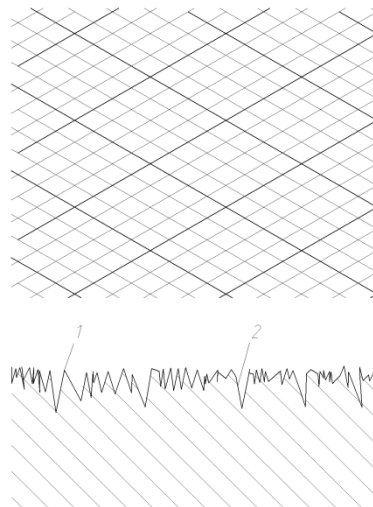


Рисунок 1.2 Схема робочої поверхні гільзи циліндра після плосковершинного хонінгування:

1 – риси від абразивів хонінгувальних брусків на профілі поверхні; 2 – характер впадини на профілі поверхні.

Запровадження сучасної технології плосковершинного хонінгування вимагає суттєвих змін традиційних підходів до механічної обробки циліндрів. Це пов'язано з тим, що виробництво тривалий час орієнтувалося на високопродуктивне силове різання під час остаточного розточування та

хонінгування, тоді, як провідні зарубіжні компанії застосовують малосилову високошвидкісну обробку. Такий метод забезпечує формування поверхневого шару з мінімальною структурною деформацією металу, що покращує умови припрацювання деталей циліндропоршневої групи в період початкової експлуатації двигуна.

У зв'язку з цим, при розробленні технології плосковершинного хонінгування для виробництва необхідним стало встановлення оптимальних параметрів мікрорельєфу — профілю та топографії поверхні, які б гарантували безпечний і ефективний перехід технологічної поверхні до експлуатаційного стану під час скороченої заводської обкатки. Це зумовило проведення поглибленого аналізу впливу кожного технологічного параметра на процес формування поверхневого шару та його триботехнічні властивості.

Для визначення якості поверхні циліндра обирають комплекс основних контрольних показників. Після завершальної операції хонінгування технологічна поверхня характеризується сукупністю геометричних параметрів макро-, мікро- і субмікрорівня, структурними ознаками, хімічним і фазовим складом матеріалу, а також фізико-механічними властивостями поверхневого шару та величиною його деформацій. Саме така багатокomпонентна оцінка забезпечує достовірне визначення експлуатаційного потенціалу циліндра.

Досвід провідних виробників двигунів підтверджує, що контроль технологічної якості плосковершинної поверхні має здійснюватися, як за даними профілометрії, так і за параметрами топографічної структури. Однією з ключових характеристик профілю виступає шорсткість поверхні, яку вимірюють профілограф-профілометром із гойдаючим щупом. При цьому реєстрація виконується без увімкнення хвильового фільтра, що дозволяє отримати повні відомості про мікронерівності поверхневого шару.



Рисунок 1.3 Параметри технологічної якості робочої поверхні гільзи циліндра

Існуюча кількість основних параметрів профілю технологічної поверхні циліндрів недостатня для оцінки їх задиростійкості. Тому необхідно було вивчити досвід оцінки профілю технологічної поверхні циліндрів стандартами зарубіжних моторобудівних фірм і використати його при розробці технології плосковершинного хонінгування.

Найбільш повно характеризують якість профілю технологічної поверхні такі показники шорсткості: R_t , R_z , R_{3z} , R_v , R_a

Методика визначення цих параметрів профілограми показана на рис. 1.4.

R_t – найбільша висота нерівностей профілю, яка не дає повної оцінки шорсткості поверхні циліндра, так як характеризує поодинокі виступи і впадини профілю.

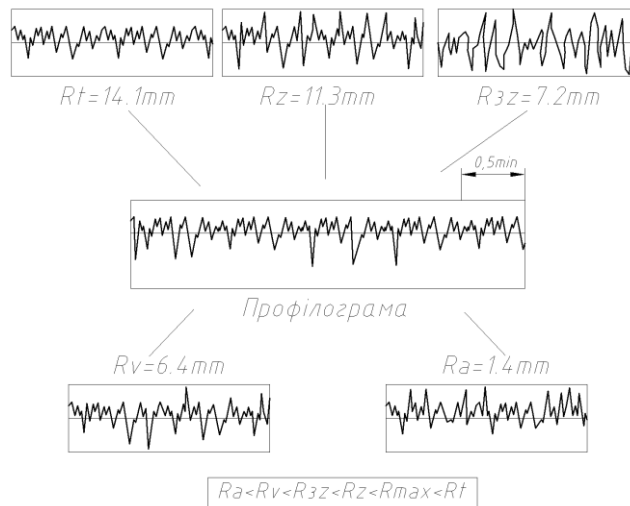


Рисунок 1.4 Геометричні параметри шорсткості робочого профілю поверхні гільзи циліндра після механічної обробки:

R_t – відстань між найбільшим піком виступу та найнижчою впадиною, мкм;

R_z – значення висоти нерівностей профілю поверхні по значеннях десятих точок, мкм;

R_{z3} – значення висоти нерівностей профілю поверхні по значеннях шести точок, мкм;

R_v – параметр функціональної шорсткості, мкм;

R_a – середнє значення арифметичного відхилення профілю поверхні, мкм.

R_z – сумарне значення абсолютних середніх арифметичних відхилень по п'яти максимальних мінімумів (y_{vi}) і п'яти максимальних максимумів (y_{pi}) профілю поверхні в межах заданої базової довжини вимірювання:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}| \right)$$

R_{z3} – глибина шорсткості по середньому значенні для двох виступів зверху і знизу для кожної із п'яти ділянок.

R_v – параметр функціональної шорсткості, який визначається шляхом відсіканням 5% виступів та впадин на заданій профілограмі. Інколи, значення R_{z3} є близьким до зазначення R_v ;

R_a – абсолютні значення середніх арифметичних відхилень профілю поверхні в межах заданої базової довжини l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

Де y – віддаль від будь-якої точки профілю поверхні до середньої лінії, яка проходить по нормалі, що проведена через цю точку до середньої лінії профілю;

l – прийнята базова довжина вимірювання:

Наближено приймаємо, що
$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

Де n – загальна кількість точок вимірювання на профілі поверхні.

Параметр R_a не являється характеристикою глибини шорсткості поверхні, а є характеристикою фактичного відхилення профілю поверхні від середньої лінії. Параметр R_a завжди менше значення параметру R_v . Як правило, параметри R_t і R_z є максимальними значеннями глибини шорсткості поверхні. У зв'язку з цим можемо записати:

$$R_t > R_z > R_{3z} > R_v > R_a$$

На рисунку 1.5 приведено спрощений метод графічного визначення основних геометричних параметрів профілографи поверхні.

Параметр несучої частини профілю поверхні, $B \% (t_p)$. Несуча крива Аботта

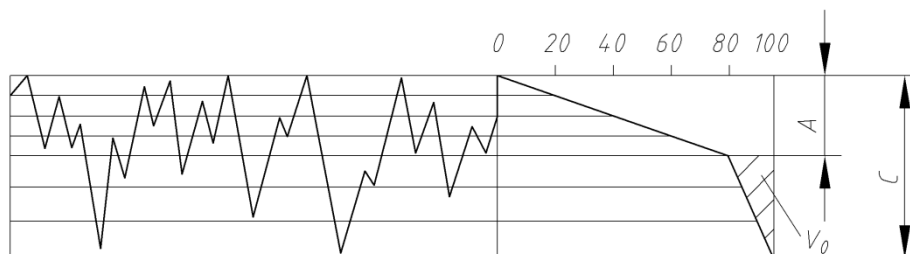


Рисунок 1.5 Основні геометричні параметри профілю поверхні:

A – середнє значення глибини рисок на несучій поверхні, мкм; C – середнє значення глибини маслоутримуючих впадин профілю поверхні,

мкм; B – несуча частина профілю поверхні, %; V_0 – значення питомого об’єму масла внаслідок спрацювання більшості рисок на опорній поверхні профілю, $\text{мм}^3/\text{см}^2$.

Для визначення основних параметрів діаграми профілю можна використовувати графічний метод розрахунку як теоретичного, так і реального профілю циліндра, виготовленого методом плосковершинного хонінгування (рис. 1.6).

Формула для визначення об’єму масла (V_0), на несучій поверхні гільзи циліндра, що утримується внаслідок спрацювання рисок профілю:

$$V_0 = \frac{(100 - B)(C - A)}{2000}, \text{ мм}^3/\text{см}^2$$

де V_0 – розрахунковий об’єм масла на опорній поверхні гільзи циліндра внаслідок спрацювання робочих рисок, $\text{мм}^3/\text{см}^2$;

B – параметр несучої частини профілю поверхні, %;

C – середнє значення глибини маслоутримуючих впадин профілю поверхні, мкм;

A – середня значення глибини рисок на опорній поверхні гільзи циліндра, мкм.

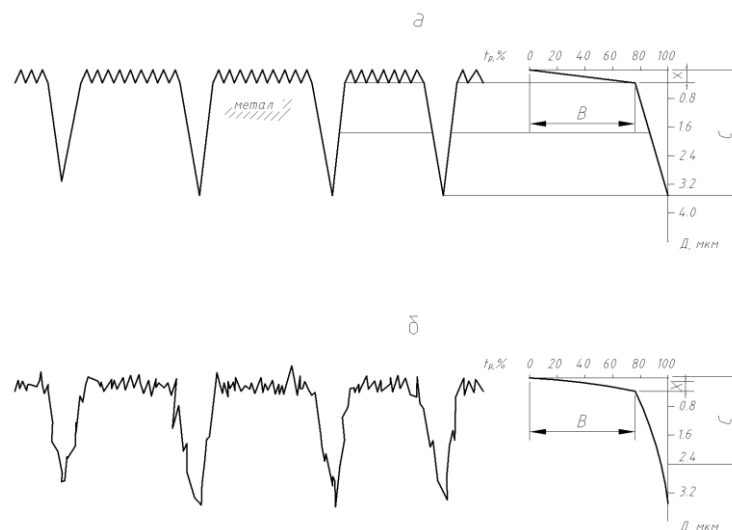


Рисунок 1.6 Характерний вигляд профілограм та опорних кривих, як теоретичного (а) так і реального (б) профілів поверхні гільзи циліндра.

Шорсткість несучої поверхні циліндра доцільно розглядати у зв'язку з функціональною глибиною шорсткості, яку на практиці часто визначають наближено шляхом виключення найбільших виступів і западин профілю. За умов традиційного хонінгування функціональна глибина шорсткості, як правило, становить 2...4 мкм, тоді як для плосковершинного (plateau) хонінгування її рекомендується приймати в межах 1,0...2,5 мкм. Надмірне зниження шорсткості поверхні циліндра може погіршувати умови припрацювання поршневих кілець і збільшувати тривалість обкатки двигуна, а для високофорсованих двигунів — створювати передумови для пошкодження пари тертя «циліндр — поршневі кільця».

Геометричні параметри слідів хонінгування — глибина, ширина та частота розміщення рисок — істотно впливають на витрату масла на вигорання, коефіцієнт тертя та загальну надійність роботи спряження «циліндр — поршневі кільця». Зокрема, надмірно широкі й глибокі риси спричиняють підвищену витрату масла, збільшують механічні втрати на тертя та, відповідно, зростання витрат палива на їх подолання. Крім того, такі нерівності можуть виступати концентраторами напружень і бути причиною пошкодження робочих поверхонь циліндрів і кілець або їх прискореного зношування. Оптимальні значення глибини та ширини рисок визначають для кожного типу двигуна індивідуально; орієнтовно глибина рисок для різних двигунів становить 2...8 мкм, а їх ширина — 5...150 мкм.

Більшість сучасних профілографів-профілометрів зарубіжного виробництва забезпечують автоматизоване визначення та реєстрацію параметрів профілю, зокрема опорної довжини профілю (В), кількості піків (пр) і положення середньої лінії. Рівень січення профілю може задаватися оператором у широкому діапазоні в напрямку «вгору/вниз», що дає змогу будувати опорні криві профілю, криві розподілу піків, а також криву Аботта. Водночас зазначений підхід до оцінювання профілю технологічної поверхні циліндра є відносно трудомістким, оскільки потребує значних часових витрат.

Удосконалений метод контролю шорсткості поверхні циліндра дозволяє

реєструвати несучу криву Аботта безпосередньо профілографом-профілометром як із застосуванням хвильового фільтра, так і без нього (рис. 1.7), що підвищує оперативність контролю та спрощує інтерпретацію результатів під час технологічного забезпечення якості хонінгованих поверхонь.

Формула для розрахунку маслоутримуючого об'єму на поверхні гільзи циліндра:

$$V_0 = \frac{100 - B}{1000} \text{ мм}^3/\text{см}^2$$

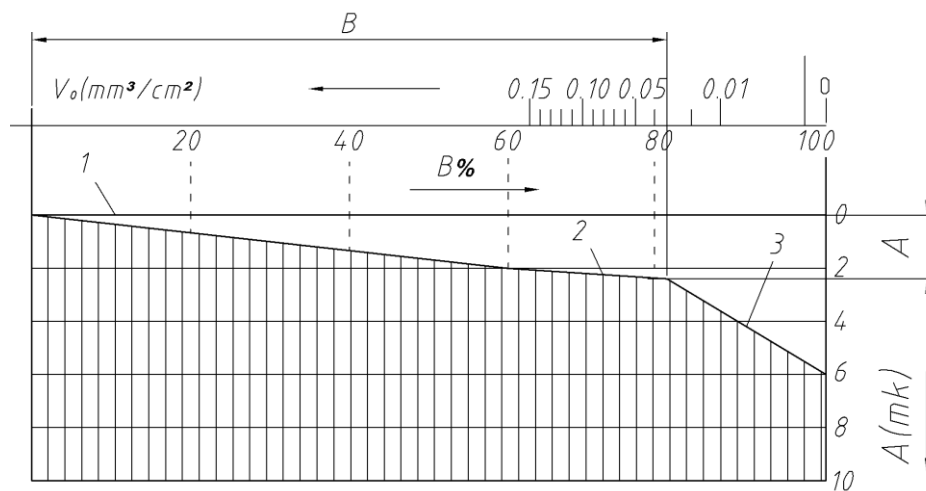


Рисунок 1.7 Графічне зображення спрощеного методу при визначенні основних параметрів профілографи поверхні:

A – параметри глибини рисок на несучій поверхні, мкм; B – несуча поверхня профілю, %; V_0 – розрахункова питома масло ємність профілю поверхні, $\text{мм}^3/\text{см}^2$; 1 – базова (нульова) лінія профілю поверхні; 2 – перша характеристика профілю; 3 – друга характеристика профілю із врахуванням нахилу $0,2 \text{ мкм}/\%$; 4 – параметри глибини маслоутримуючих впадин профілю.

Формула для визначення середньої глибини рисок C із врахуванням параметрів профілю поверхні A і B :

$$C = A + 0,2(100 - B)$$

Глибина мікрорисок на плато поверхні циліндра є важливим параметром,

що визначає умови припрацювання поршневих кілець та впливає на витрати мастильного матеріалу під час експлуатації. Значення цього параметра повинно забезпечувати достатній об'єм мастилозатримувальних западин і водночас мінімізувати втрати масла на вигоряння. Оскільки глибина рисок залежить від конструктивних і теплотехнічних характеристик двигуна, режимів його роботи, властивостей матеріалів та профілю поршневих кілець, її значення визначається індивідуально для кожного типу двигуна.

Важливу роль у надійності функціонування циліндро-поршневої групи відіграє не лише профіль, а й топографія поверхні, яка визначає фактичну площу контакту, умови мастилозабезпечення та інтенсивність трибологічних процесів у зоні тертя. Саме тому провідні світові виробники двигунів активно досліджують структуру технологічного шару циліндра з використанням сучасних методів фізики поверхні та міжфазних взаємодій, що дозволяє глибше оцінити механізми припрацювання та зносу.

Основними контрольними показниками топографії поверхні циліндра є кут перехрестя хонінгувальних рисок, відстань між впадинами профілю, ступінь чистоти різання, наявність двосторонніх рисок, ознак хвильового або перерваного хонінгування, ширина мікровпадин та слідів попередньої механічної обробки. Також контролюються такі характеристики, як глибина деформації поверхневого шару, можливі дефекти у вигляді мікротріщин, виривів металу, кількість відкритих графітових включень, що визначають здатність чавуну акумулювати мастило й зменшувати тертя.

Сучасні закордонні моторобудівні підприємства застосовують чотири основні методи контролю якості технологічної поверхні циліндрів: індикацію мікрорельєфу за допомогою факс-фільм-фото методики, виготовлення поперечних металографічних шліфів, растрову електронну мікроскопію та комбіновані методи, що забезпечують найповнішу характеристику мікрогеометрії та структурного стану поверхневого шару. Такі підходи дозволяють гарантувати високу експлуатаційну стійкість пари «циліндр – поршневі кільця» та відповідність поверхні сучасним вимогам

двигунобудування.

1.1.2 Метод силового розкочування робочої поверхні гільзи циліндра

Дослідженнями обґрунтовано й детально відпрацьовано два базові підходи до розкочування внутрішньої поверхні циліндрів сталевую кулькою: із накладанням вібраційних коливань та без їх застосування. Найбільшого поширення набув вібраційний спосіб, оскільки він забезпечує відтворюване формування стабільного, чітко організованого мікропрофілю та дає змогу цілеспрямовано отримувати канавки заданої форми і конфігурації залежно від вимог до поверхні. У результаті підвищуються маслоутримувальні властивості та покращуються умови роботи циліндро-поршневої групи в експлуатаційних режимах.

Сутність обкочування кулькою відображена на схемах (рис. 1.8). У процесі обробки кулька притискається до поверхні циліндра 1 за допомогою спеціального пристрою 3, встановленого у різцетримачі 4 токарного верстата (рис. 1.8, а). Циліндр 1 закріплюється на шпинделі верстата через пристосування 2 і здійснює обертання навколо своєї осі. За відсутності осциляційного руху кульки поздовжня подача інструмента приводить до формування гвинтоподібного профілю канавок уздовж внутрішньої поверхні деталі.

Під час вібраційного розкочування кулька додатково виконує високочастотні коливання з малою амплітудою вздовж осі циліндра, внаслідок чого на поверхні утворюються зміщені одна відносно одної криволінійні риси, близькі за конфігурацією до синусоїдальних (рис. 1.8, а). Такий режим забезпечує формування регулярної мікросітки підвищеної маслоємності, причому її параметри — глибина та густота канавок — піддаються регулюванню зміною частоти обертання деталі та зусилля притиску кульки.

Осциляційний рух кульки вздовж твірної поверхні реалізується вібраційною головкою 3 (рис. 1.8, б), яка приводиться в дію окремим

електродвигуном 6 через ексцентриковий механізм 7. Використання варіанта без осциляцій (рис. 1.8, б) забезпечує утворення перехресних гвинтових канавок правого і лівого напрямків, що також формують сітчасту структуру поверхні, однак характеризуються меншою варіативністю геометричних параметрів порівняно з вібраційним способом.

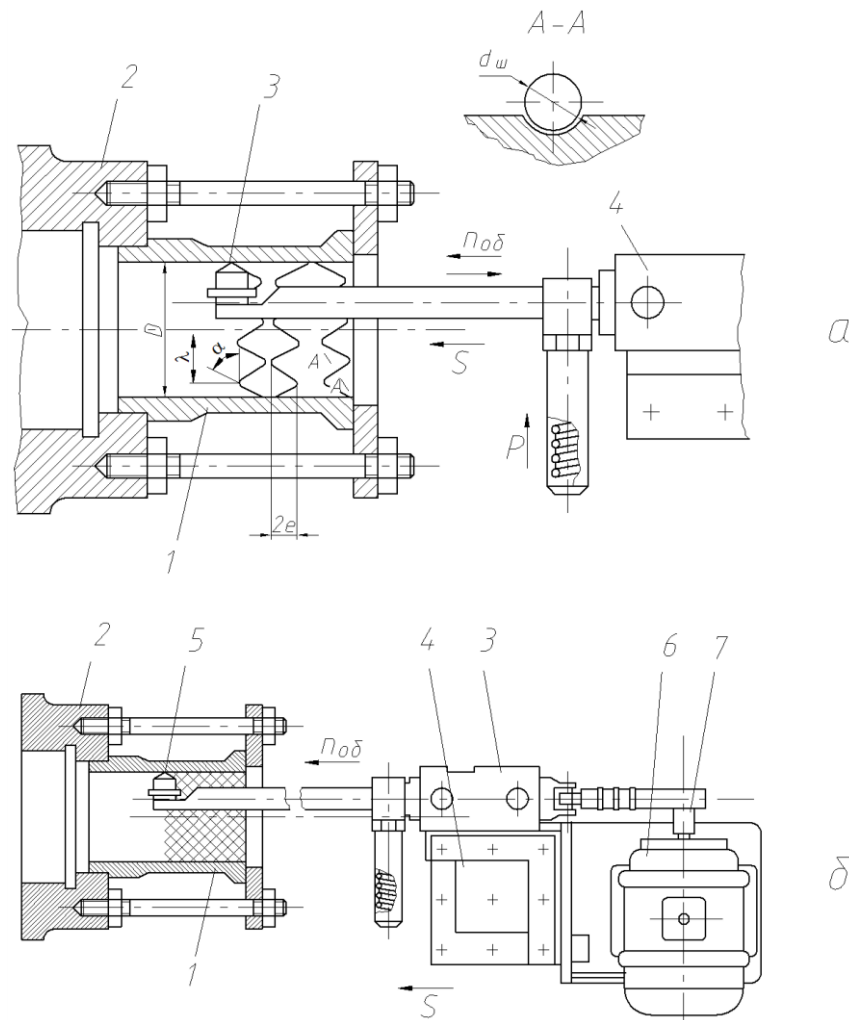


Рисунок 1.8 Принципова схема силового обкочування робочих поверхонь гільз циліндрів за допомогою сталюї кульки:

а – силове обкочування поверхні з вібруючою кулькою; 1 – гільза циліндра; 2 – пристрій для фіксації і закріплення гільзи циліндра; 3 – пристрій для закріплення робочої кульки; 4 – різцетримач (верстат токарний); б – спосіб силового обкочування без використання вібруючої кульки; 1 – гільза циліндра; 2 – пристрій для фіксації та закріплення гільзи циліндра; 3 – обкатна головка; 4 – різцетримач; 5 – пристрій для закріплення силової кульки; 6 – механізм приводу стенда; 7 – спеціальний ексцентрик.

Моторно-стендові випробування засвідчили, що застосування технології розкочування внутрішньої поверхні циліндрів сталевую кулькою забезпечує стабільне припрацювання поршневих кілець і сприяє підвищенню зносостійкості циліндрів. Водночас установлено суттєвий експлуатаційний недолік — зростання витрат масла на вигорання, що обумовлюється надмірною маслоспоживністю сформованих канавок мікрорельєфу. Нормалізація витрат масла, як правило, досягається лише після тривалої роботи двигуна, коли внаслідок часткового спрацювання канавок зменшується їхній об'єм і, відповідно, здатність утримувати мастильний матеріал.

Крім того, процес розкочування кулькою характеризується низькою продуктивністю, підвищеною складністю автоматизації та значними часовими витратами порівняно з операцією хонінгування. Саме недостатня технологічність і обмежені можливості інтеграції в потокові лінії зумовили те, що даний спосіб не набув широкого застосування в умовах масового виробництва циліндрів.

1.2 Метод хімічного фосфатування робочої поверхні гільзи циліндра

Одним із поширених способів підвищення припрацьовуваності робочих поверхонь циліндрів є хімічне фосфатування. Сутність процесу полягає у формуванні на поверхні пористого шару фосфатів заліза або марганцю внаслідок обробки деталей у водних розчинах відповідних солей. Товщина сформованого покриття може сягати до 20 мкм. Розвинена пористість такого шару забезпечує інтенсивне поглинання мастильного матеріалу, що знижує тертя та полегшує перехід циліндро-поршневої групи до стабільного режиму роботи в період обкатки.

У процесі початкової експлуатації двигуна пористий шар поступово зношується та переходить у дрібнозернисту дисперсну масу, яка виконує роль припрацьовувального середовища з абразивно-захисною дією. Поряд із цим застосовується варіант фосфатування у розчині первинного фосфату цинку,

внаслідок чого утворюється припрацьовувальне покриття на основі фосфатів заліза та цинку, що характеризується підвищеними трибологічними властивостями. Для додаткового зниження коефіцієнта тертя поверхню можуть обробляти графітизованим мастилом, яке сприяє ефективнішому ущільненню надпоршневого простору та зменшує ймовірність пошкодження поверхні на початковій стадії тертя.

Разом із тим широке впровадження фосфатування у серійне виробництво стримується низкою істотних технологічних та організаційних обмежень. Процес є відносно складним і трудомістким, потребує систематичного контролю концентрації розчинів і температурних режимів, характеризується підвищеною енергоємністю та недостатньою екологічною сумісністю. Зазначені особливості не повністю відповідають сучасним вимогам двигунобудування щодо автоматизації, стабільності параметрів і «чистоти» виробничих технологій.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Комплексне дослідження та аналіз характеристик поверхні гільзи циліндра після «звичайного» хонінгування

Якість хонінгування, характер профілограм, топографічні особливості поверхні та результати поперечного шліфу гільзи циліндра дизельного двигуна Д-240 наведено на рис. 2.1. Аналіз свідчить, що шорсткість технологічної поверхні є надмірно низькою (... мкм; 9а...9в клас чистоти), що не завжди є позитивним з позицій припрацювання циліндро-поршневої групи. При цьому сліди обробки мають односторонній характер, що може бути наслідком підвищеного питомого тиску хонінгувальних брусків на поверхню циліндра, а також наявності люфтів у карданних з'єднаннях головки, які порушують стабільність кінематики процесу.

Поверхня характеризується вираженою пластичною деформацією та набуває «мармурового» вигляду, подібного до наклепаної структури. Унаслідок інтенсивного силового впливу графітні пори виявляються частково здавленими та закритими, що погіршує маслоємність і знижує здатність поверхні формувати стабільну мастильну плівку. Деформований поверхневий шар орієнтований переважно у напрямку обертання хонінгувальної головки, що підтверджує домінування зсувних деформацій у приповерхневій зоні.

Крім того, на межах графітних включень фіксується значна кількість мікротріщин, які є потенційними осередками подальшого руйнування та прискореного зношування. Виникнення зазначених дефектів пов'язується з умовами силового різання на завершальних операціях розточування і хонінгування, коли поєднання високих контактних тисків і недостатньої стабільності процесу призводить до надмірного деформування приповерхневого шару та деградації його структурних елементів.

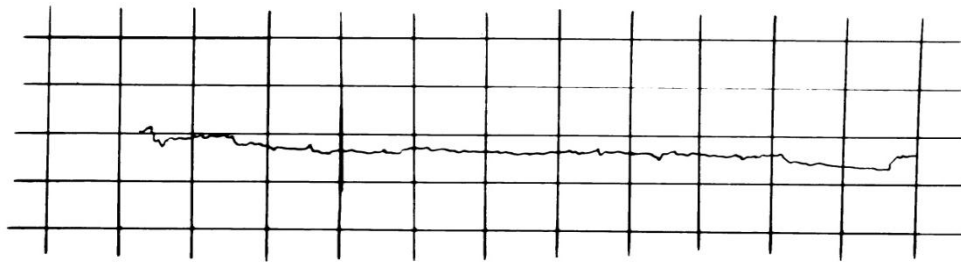


Рисунок 2.1 Характерний вигляд профілограми робочої поверхні гільзи циліндра двигуна Д-240 після «звичайного» хонінгування:

$V_3=5000$; $\Gamma_3=100$; $R_a = 0,17...0,32$ мкм (9а...9в клас чистоти).

Проведені після обкатки дослідні випробування дизельного двигуна Д-240, оснащеного циліндрами та верхніми поршневыми кільцями з твердохромовим покриттям, показали недостатню задиристійкість такої пари тертя. Основною причиною цього є низька маслоємність робочої поверхні та значна деформація мікропрофілю циліндра під дією навантажень, що призводить до погіршення умов змащування і підвищення ризику локального схоплювання.

Відомо, що істотного покращення задиристіх властивостей поверхні циліндрів можна досягти шляхом застосування технології плосковершинного хонінгування. Однак впровадження цієї технології на автопідприємствах тривалий час залишалося проблематичним через низку факторів. До основних складнощів належали: низький технічний рівень існуючих хонінгувальних верстатів і відсутність абразивних керамічних брусків необхідної якості; недостатня забезпеченість сучасними контрольно-вимірювальними засобами та відсутність методик оцінки параметрів профілю і топографії поверхні, що є специфічним технологічним досвідом «ноу-хау» провідних зарубіжних виробників; складність технології та необхідність суттєвого підвищення кваліфікації виробничого персоналу для забезпечення стабільності параметрів обробки; обмежений доступ до актуальної науково-технічної інформації, пов'язаної з новітніми технологіями finishing-обробки в двигунобудуванні.

Подолання цих бар'єрів стало можливим лише шляхом проведення комплексу науково-дослідних, конструкторсько-технологічних робіт та

поетапного впровадження у виробництво технології плосковершинного хонінгування, що забезпечило підвищення надійності й довговічності деталей циліндро-поршневої групи.

2.2 Комплексне дослідження та критерії вибору основних характеристик робочого профілю технологічної поверхні гільзи циліндра після плосковершинного хонінгування

Відомо, що профіль та топографія технологічної поверхні циліндра повинні забезпечувати оптимальні умови роботи пари тертя «гільза — поршневі кільця». До основних вимог належать рівномірний розподіл мастильного матеріалу по всій робочій поверхні, достатня маслоємність для зменшення сил тертя та ефективного відведення тепла із зони контакту, а також для виносу продуктів спрацювання. Крім того, технологічна поверхня повинна забезпечувати надійне ущільнення надпоршневого простору при мінімальних витратах масла на вигорання.

Важливо, щоб у період припрацювання поверхня мала здатність до контрольованого початкового зношування, внаслідок чого площа фактичного контакту поступово збільшується, досягаючи стабільного значення при мінімальному подальшому зносі циліндрів і поршневих кілець.

Науковими дослідженнями встановлено, що таким вимогам повною мірою відповідає поверхня з двоярусним профілем (рис. 2.2), який формується при послідовному виконанні основного та завершального хонінгування. Верхній ярус виконує роль опорної та маслорозподільної поверхні, що безпосередньо контактує з поршневими кільцями. Нижній ярус складається з мікробпадин, які виконують функцію маслоутримувальних резервуарів, забезпечуючи стабільний мастильний режим і зниження ризику задирів у всіх режимах роботи двигуна.

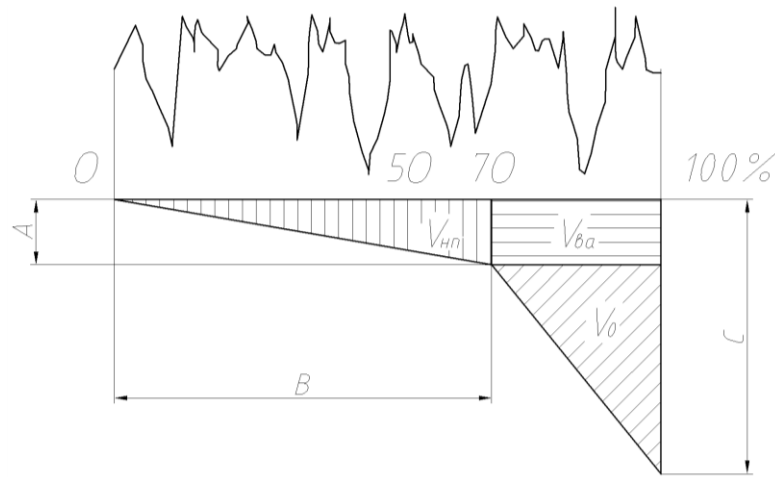


Рисунок 2.2 Принципова схема робочого профілю технологічної поверхні гільзи циліндра після плоско вершинного хонінгування:

A – середнє значення глибини рисок на маслорозподільчому ярусі, мкм; C – середня значення глибини впадин на маслоутримуючому ярусі, мкм; B – частка несучої робочої поверхні, %; $V_{нп}$ – величина питомої масло ємності для несучого ярусу, $\text{мм}^3/\text{см}^2$; $V_{ба}$ – величина питомої маслоємності маслоутримуючого ярусу відносно рівня глибини робочих рисок A на відповідному плато, $\text{мм}^3/\text{см}^2$; V_0 – значення питомої маслоємності маслоутримуючого ярусу внаслідок спрацювання рисок A для маслорозподільного ярусу, $\text{мм}^3/\text{см}^2$.

Запропонований процес плосковершинного хонінгування складався з трьох послідовних операцій: попередньої, основної та завершальної. Попереднє хонінгування виконувалося замість традиційного чистового розточування, оскільки дозволяло забезпечити високу точність діаметра циліндра та видалити деформований поверхневий шар чавуну завтовшки не менше 20 мкм, який утворюється після попередніх силових режимів різання.

На другому етапі, основному хонінгуванні, формувався профіль нижнього ярусу, що визначає маслоутримувальні властивості поверхні, необхідні для стабільного мастильного режиму роботи пари тертя «циліндр–кільця». Цей ярус є основою формування необхідної маслоємності.

Завершальне хонінгування виконувалося для формування верхнього

маслорозподільного ярусу профілю. На цьому етапі створювалися такі важливі експлуатаційні параметри поверхні, як опорна площа контакту, шорсткість і необхідна глибина рисок на плато, що забезпечують надійну роботу циліндрів у період припрацювання.

Для забезпечення високої точності геометричних параметрів циліндра попереднє хонінгування виконувалося подовженою головкою, оснащеною грубозернистими алмазними брусками, а контроль розміру здійснювався падаючим калібром із твердосплавних пластин типу ВК6. Довжина брусків становила $1/3 \dots 2/3$ довжини циліндра, а їх вихід за межі оброблюваної поверхні з кожного боку дорівнював $1/3$ довжини бруска, що забезпечувало рівномірність зняття припуску та мінімальну конусність.

Для цієї операції застосовувалися надтверді абразивні матеріали: синтетичні алмази типів АСС, АСК, АСПК, СВСП, АСБ у зернистості 800/630, 630/500, 500/400, 400/315, 315/250 та 250/200 із концентрацією 100 % і 125 %. Найбільш поширеною була металосилікатна основа брусків, яка забезпечувала високу продуктивність різання. Вибір оптимальної зернистості проводився на основі експериментальних досліджень.

З метою підвищення ефективності та якості попереднього хонінгування в головці чергували дві групи алмазних брусків однакової зернистості. Перша група мала більшу силу притиску (у 6...10 разів), яка прикладалася переривчасто — в інтервалі 0,25...0,50 тривалості обробки. Друга група працювала зі змінним імпульсним зусиллям, що залежало від кількості брусків першої групи та швидкості обертання головки. Для підвищення ефективності різання періодично змінювали напрямок обертання головки. Радіальна подача брусків здійснювалася гідравлічно.

Кут хонінгування вибирався переважно в діапазоні 60...75°, що забезпечувало оптимальний розподіл мастила й найбільшу продуктивність обробки при одночасному формуванні стабільної сітки рисок.

Основне й завершальне хонінгування виконували комбінованою головкою, у якій встановлювали середньозернисті (160×125; 125×100; 100×80)

та дрібнозернисті (40×28; 28×20; 20×14; 14×10) бруски. У головку входило по п'ять брусків кожної зернистості розміром 125×7×5×3 мм або 200×7×5×3 мм. Обробка здійснювалася послідовно з невеликим перекриттям фаз. Контроль діаметра на етапі основного хонінгування забезпечували пневматичні вимірювальні пристрої у вигляді сопел на колодках із твердого сплаву типу ВК6. При досягненні необхідного діаметра автоматично припинялося основне хонінгування й вмикалося завершальне керування, яким здійснювалося реле часу за кількістю ходів головки.

Щоб мінімізувати залишкові деформації металу поверхні деталі, після кожної операції, змінювали напрямок обертання інструмента. Циліндри закріплювали в гумових манжетах, які сприймали крутний момент та осьові навантаження, запобігаючи пошкодженню поверхні.

Процес наладки верстата передбачав багаторазове коригування параметрів обробки й вибір брусків до тих пір, поки отримані профілограми не наближалися до еталонних. Під час хонінгування застосовували змащувально-охолоджувальні рідини як на водяній, так і на масляній основі, а їх очищення здійснювалося за допомогою магнітних і паперових фільтрів.

2.3 Комплексне дослідження та критерії вибору основних характеристик робочого профілю технологічної поверхні гільзи циліндра після рівновершинного хонінгування

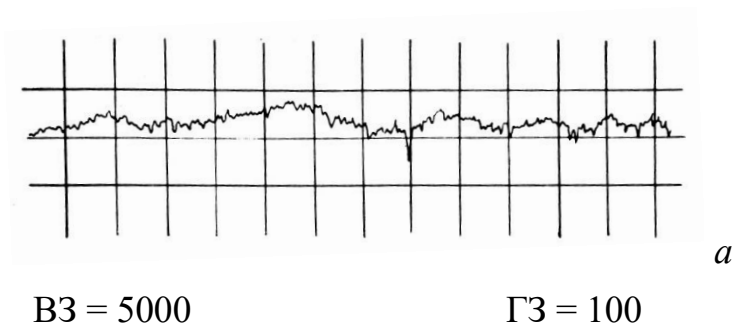
Експериментально встановлено, що при форсуванні дизельного двигуна за рахунок підвищення літрової потужності понад 20 кВт/л надійне припрацювання циліндрів і поршневих кілець досягається як збільшенням маслоємності маслорозподільного V_{mr} (верхнього ярусу), так і маслоємності маслоутримуючого V_0 (нижнього ярусу) профілів технологічної поверхні циліндрів. Тому профіль технологічної поверхні циліндра після хонінгування до нанесення припрацьовуючого покриття не повинен мати виражених площадок (плато). Такий профіль поверхні циліндра одержав умовну назву

рівновершинний (рис. 2.3), а технологія – рівновершинного хонінгування (PBX).

Основні параметри профілограм поверхні гільзи циліндра, які показані на рисунку 2.3 подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Основні параметри профілограм поверхні гільзи циліндра

Параметри профілограм поверхні	Значення основних параметрів профілограми поверхні	
	<i>a</i>	<i>б</i>
Робочий кут хонінгування поверхні циліндра, град.;	60	60
Відносна довжина профілю поверхні циліндра <i>B</i> , %	50	60
Середнє значення глибини впадин профілю поверхні <i>C</i> , мкм	3,6	3,12
Середня значення глибини рисок на досліджуваному плато <i>A</i> , мкм	1,60	1,12
Параметр шорсткості поверхні R_a , мкм	0,74	0,68
Величина питомої масло ємності робочої поверхні V_0 , мм ³ /мм ²	0,05	0,035



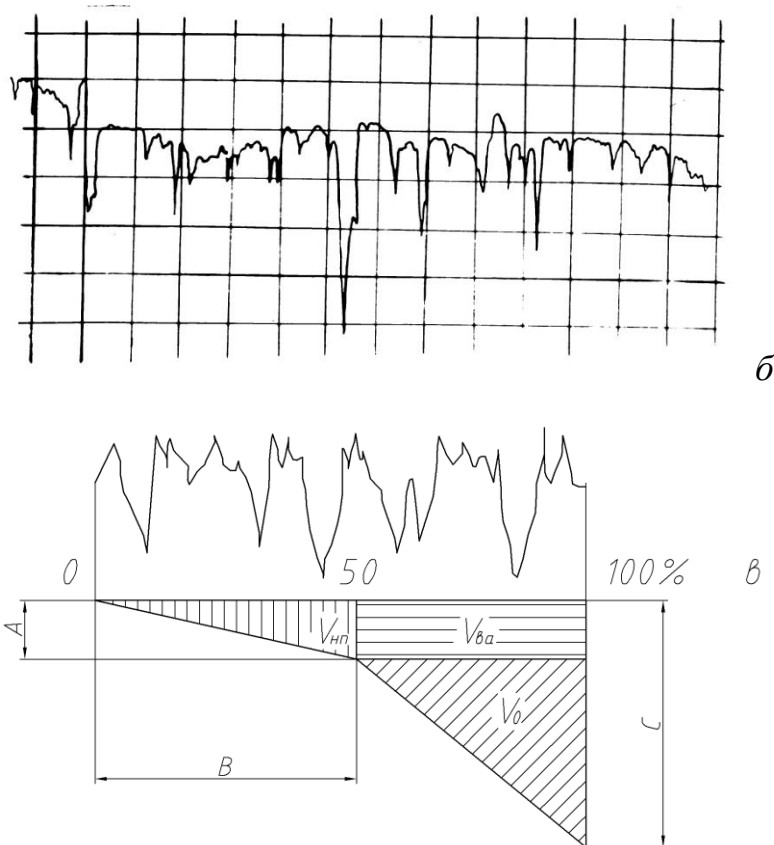


Рисунок 2.3 Характер профілограм профілю робочої поверхні після рівновершинного хонінгування (а, б) та схема для розрахунку основних параметрів профілю поверхні (в)

Для формування необхідного мікропрофілю поверхні циліндра була розроблена спеціальна технологія рівновершинного хонінгування, яка за своєю суттю є близькою до плосковершинного, однак має низку конструктивно-технологічних відмінностей. Основна з них полягає в тому, що вже на етапі основного хонінгування забезпечується не тільки досягнення геометричної точності внутрішнього діаметра, але й одночасне формування маслорозподільних рисок і маслоутримувальних впадин. Це реалізується шляхом одночасної роботи в хонінгувальній головці грубозернистих (АСС 125/100М-МС1-100) і дрібнозернистих (АСС 63/50М-МС1-100) алмазних брусків, які розташовуються у шаховому порядку.

Різання металу здійснювалося при тиску гідросистеми розтискання брусків 1,2...1,8 МПа, швидкості обертання головки 80...120 хв⁻¹ та частоті зворотно-поступального руху 40...50 подвійних ходів за хвилину. Особливість

комбінованої хонінгувальної головки (рис. 2.4), розробленої за участю автора, полягає в тому, що вона забезпечує можливість як одночасної роботи брусків двох типів, так і окремого їх використання залежно від етапу обробки.

Після досягнення необхідної точності розмірів внутрішнього діаметра циліндра за командою пневматичного вимірювального пристрою знижували тиск у гідравлічній системі до 0,3...0,7 МПа, змінювали напрямок обертання головки на протилежний і переходили до завершального хонінгування дрібнозернистими брусками. Ця операція контролювалася реле часу за кількістю подвійних ходів головки до моменту, поки параметри профілю не відповідали еталонним профілограмам.

З метою визначення оптимальних параметрів рівновершинного профілю поверхні були виготовлені дослідні зразки циліндрів форсованих дизельних двигунів СМД-31 з літровою потужністю 25,5 кВт/л, що мали такі значення мікропрофілю до нанесення припрацьовуючого металоолімерного покриття: середня глибина рисок маслорозподільного ярусу $A = 0,6; 1,0; 1,4; 2,0; 2,4$ мкм; середня глибина впадин маслоутримувального ярусу $C = 2,6; 3,0; 5,0; 5,5$ мкм.

Експериментальні випробування зазначених циліндрів проводилися на дизельних двигунах СМД-31А і СМД-31. Поршні комплектувалися чотирма кільцями: трьома компресійними і одним маслоснімним. Перше компресійне кільце — двостороння трапеція з бочкоподібним робочим профілем і твердим полірованим хромовим покриттям; друге — одностороння трапеція з пористим хромом; третє — плоске конічне кільце без покриття; маслоснімне — пластинчасте з тангенціальним розширювачем і хромованою робочою поверхнею.

Випробування проводилося на моторних стендах, обладнаних електробалансирними машинами та ваговими пристроями, а також усіма необхідними контрольно-вимірювальними засобами відповідно до чинних стандартів контролю та моторних досліджень.

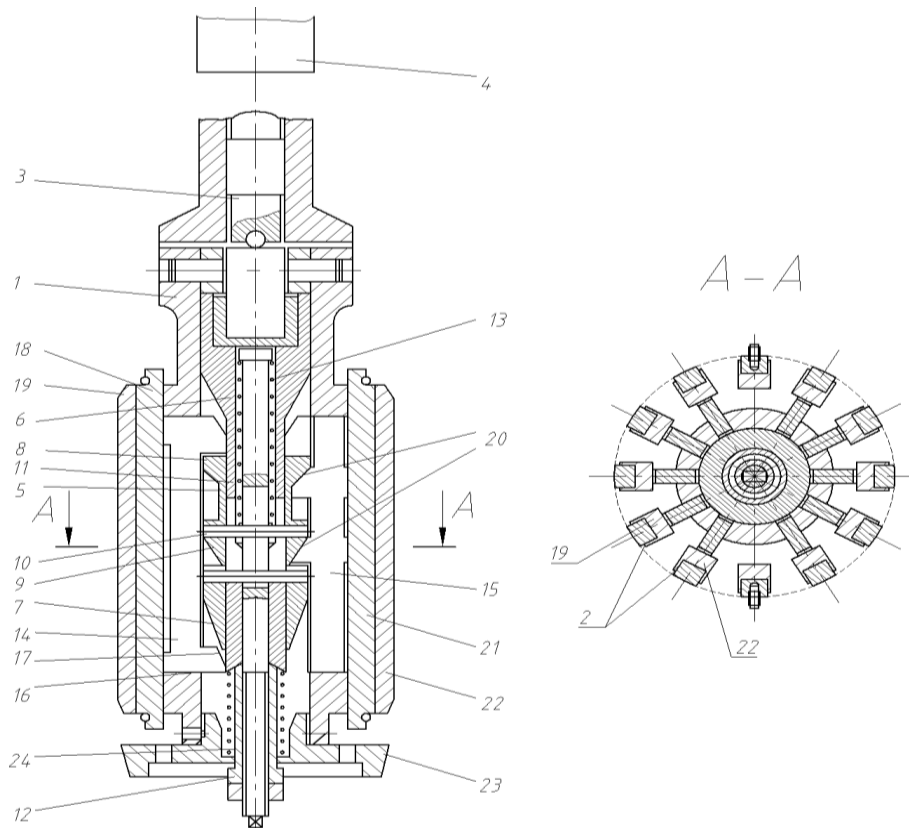


Рисунок 2.4 Конструкція хонінгувальної головки для рівновершинного хонінгування робочих поверхонь гільз циліндрів:

1 – корпус хонінгувальної головки; 2 – направляючі пази; 3 – шток гідроциліндра; 4 – гідравлічний привід; 5 – направляюча вісь; 6, 7 – втулки із конічними поверхнями; 8, 9 – конуси здвоєного типу; 10 – зачіпний пристрій; 11 – робоча тяга; 12 – кінцевий упор; 13 – пружина стиснення; 14, 15 – штовхачі; 16, 17 – площадки для контакту; 18 – колодка; 19 – абразивні грубозернисті робочі бруски; 20 – площадки; 21 – натискні колодки; 22 – абразивні дрібнозернисті робочі бруски; 23 – уловлювач продуктів зносу; 24 – пружина розтиску.

Програма випробувань складалася з кількох послідовних етапів. Спочатку виконувалася заводська технологічна обкатка двигуна тривалістю 55 хв, після чого проводилися приймально-здавальні випробування. Після завершення цього етапу двигун розбирався для візуального контролю якості робочих поверхонь циліндрів та поршневих кілець. За умови задовільного стану деталей циліндро-поршневої групи двигун повторно складали для наступного випробування, що

передбачало 30-годинну обкатку з поступовим виведенням на номінальний режим при оптимальних значеннях потужності та частоти обертання xv^{-1} .

Після виходу на номінальний режим визначали витрати масла на вигоряння за 5-годинними циклами до моменту їх стабілізації. По завершенні всього комплексу дослідних робіт двигуни знову розбирали для аналізу стану поверхонь циліндрів і поршневих кілець.

За результатами стендових випробувань була встановлена залежність витрат масла на вигоряння від параметрів мікропрофілю — середньої глибини рисок A та глибини впадин C рівновершинного профілю технологічної поверхні циліндра до нанесення припрацьовуючого покриття. Взаємозв'язок між геометрією профілю та інтенсивністю вигоряння масла наведено на рис. 2.5. На підставі аналізу отриманих графіків і обчислень визначено оптимальні параметри профілю технологічної поверхні циліндрів, які забезпечують мінімальні витрати масла при швидкому переході в експлуатаційний стан. Вони становлять: $A = 15$ мкм; $C = 25$ мкм. У процесі випробувань дизельних двигунів СМД-31/31А з гартованими циліндрами було встановлено, що стабілізація витрат масла на вигоряння досягалася лише після тривалої технологічної обкатки тривалістю 30...60 год. Загальний стан припрацьованої поверхні був задовільним, однак у зоні верхньої мертвої точки спостерігалися поодинокі подовжні мілкі риски. На окремих ділянках зберігався металічний блиск, що свідчило про недостатню здатність поверхні до утримання мастильного шару.

Аналіз отриманих даних показав, що настільки тривалий перехід від технологічної до експлуатаційної поверхні зумовлений низькою здатністю гартованого шару до контрольованого початкового зносу, необхідного для формування стабільного мастильного режиму. Отже, першочерговим завданням стало зниження твердості поверхневого шару циліндра до рівня, який забезпечує швидке припрацювання мікропрофілю. Додатково виникла потреба у нанесенні припрацьовуючого покриття, продукти зношування якого виконують роль своєрідної триботехнічної абразивної пасти, прискорюючи стабілізацію профілю і підвищуючи його маслоутримувальні властивості.

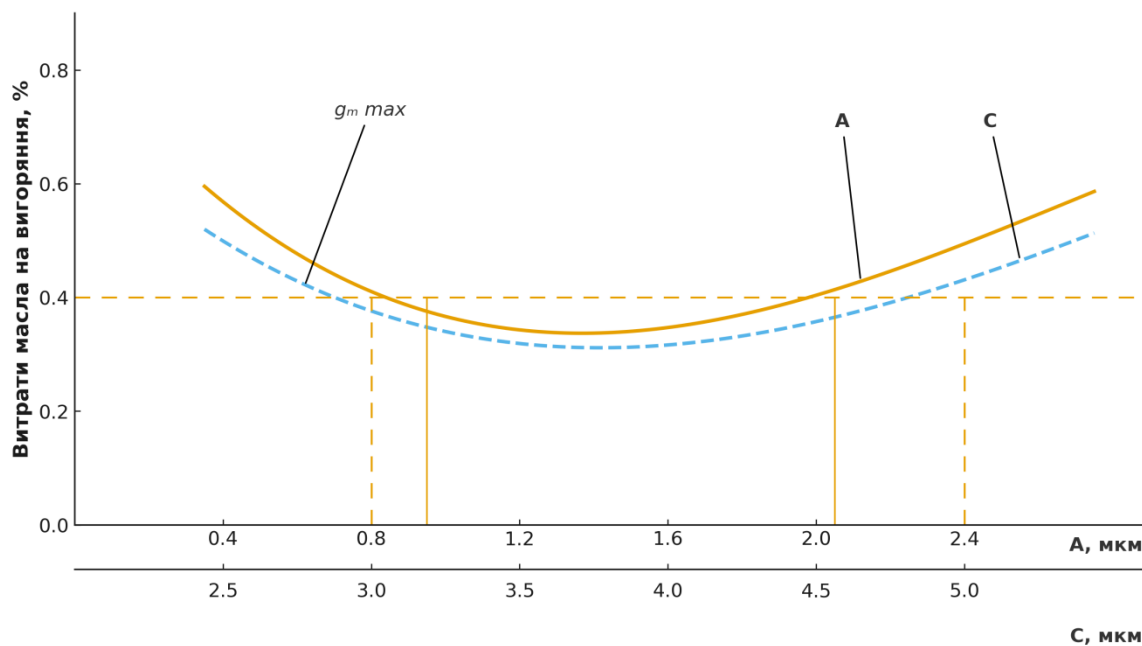


Рисунок 2.5 Характер залежностей обсягу витрат масла на процес вигорання в залежності від основних параметрів рівновершинного профілю технологічної поверхні гільзи циліндра:

A – параметри глибини для маслорозподільного яруса профілограми, мкм; C – параметри глибини маслоутримуючого яруса профілограми, мкм

Встановлено, що усунення зазначеної проблеми може бути досягнуте шляхом зниження поверхневої твердості технологічної поверхні загартованого циліндра за рахунок хімічного травлення у 10...25% розчині азотної кислоти протягом 1...3 хв. У результаті такої обробки поверхня набуває пористого характеру, а також формується шар оксидних сполук, зокрема магнітний оксид заліза типу Fe_3O_4 (за рахунок компонентів FeO та Fe_2O_3), який характеризується підвищеними антифрикційними властивостями. Це створює сприятливі умови для зниження коефіцієнта тертя та поліпшення припрацьовування елементів циліндро-поршневої групи на початковій стадії роботи.

Паралельно з травленням азотною кислотою на загартовану технологічну поверхню циліндра наносили припрацьовувальні хімічні покриття різного складу. Найбільш перспективним визнано фосфатне покриття, сформоване на основі фосфатів заліза, марганцю, цинку, нікелю та інших сполук

антифрикційного призначення, які здатні підвищувати здатність поверхні до утримання мастила і стабілізувати режим тертя. Зазначені операції реалізовували одночасно механо-хімічним способом (МХО) безпосередньо на хонінгувальному верстаті, що забезпечувало поєднання механічної дії інструмента з хімічним впливом активного середовища та підвищувало ефективність формування припрацьовувального поверхневого шару.

2.4 Методика дослідження технології триботехнічного нанесення спеціального припрацьовуючого покриття на робочі поверхні гільзи циліндрів із рівновершинним профілем після хонінгування

Розроблена триботехнологія ґрунтується на поєднанні поверхневого травлення хонінгованої поверхні циліндра азотною кислотою з одночасним формуванням на ній припрацьовувального фосфатного покриття. Стендові випробування циліндрів із таким покриттям засвідчили, що найкращі техніко-економічні показники дизелів СМД-31/31А та максимальна задиростійкість робочих поверхонь забезпечуються за умов застосування для механохімічної обробки спеціальної суміші на основі азотної та фосфатної кислот, у якій додатково розчинені оксид цинку та інші активні компоненти. Такий склад реагентів одночасно активує процес контрольованого розтравлення приповерхневого шару і забезпечує інтенсивне утворення антифрикційних фосфатних сполук, що стабілізують режим тертя в період припрацювання.

Антифрикційні бруски, призначені для реалізації триботехнології МХО, виготовляли методом порошкової металургії з шихти, до складу якої входили мідь, олово, нікель, цинк, оксид молібдену, сурма та інші антифрикційні метали у спеціально підібраному співвідношенні. Після спікання твердість брусків була на 10...15% нижчою за твердість чавуну гільз, що дозволяло формувати необхідний тепловий і контактний стан у зоні взаємодії для активації механохімічних та каталізаторних реакцій, водночас виключаючи абразивне пошкодження поверхні циліндра.

Триботехнологічний процес МХО реалізовували на обладнанні, яке

раніше використовувалося для нанесення металополімерних покриттів. Обробна головка з розтиснутими антифрикційними брусками вводилася у циліндр, а через систему дозованого впорскування подавалася початкова порція кислотної суміші. Під час обертального та зворотно-поступального руху головки забезпечувалося контрольоване хімічне розтравлення приповерхневого шару чавуну, що відбувалося одночасно з механічною взаємодією брусків із технологічною поверхнею.

Подачу суміші повторювали з інтервалом 10...15 с. Продукти зношування брусків змішувалися з продуктами кислотної взаємодії з чавуном, унаслідок чого формувалися фосфатні сполуки різного складу, які заповнювали впадини та риски хонінгованої поверхні, утворюючи припрацьовувальне покриття. Тривалість процесу натирання становила 1,0...2,5 хв, а витрата реагентів — 3...7 см³ на циліндр діаметром 120...165 мм.

Технологічні режими обробки встановлювали у таких межах: частота обертання головки 160...240 хв⁻¹; швидкість зворотно-поступального руху до 3 м/хв; тиск брусків 0,1...0,5 МПа. За 6...12 с до завершення циклу подачу хімічної суміші припиняли, забезпечуючи умови для інтенсивного формування та ущільнення фосфатного покриття. Після завершення обробки циліндри витримували на транспортері або в накопичувачі протягом 6...12 хв для завершення хімічних реакцій і стабілізації властивостей сформованого шару.

2.5 Критерії вибору та техніко-економічний аналіз технологічних процесів хонінгування робочих поверхонь гільз циліндрів та технологій триботехнічного нанесення спеціальних припрацьовуючих покриттів

Систематизація отриманих експериментальних даних дала змогу сформулювати практичні рекомендації щодо вибору профілю та топографії технологічної поверхні циліндра, а також визначити доцільний тип триботехнології залежно від ступеня форсування двигуна й особливостей мікроструктури чавуну гільзи. Узагальнення результатів показало, що

раціональне поєднання параметрів мікрорельєфу та способу формування припрацьовувального шару є визначальним чинником забезпечення стабільного режиму тертя, зниження ймовірності задирів і підвищення ресурсу спраження «циліндр — поршневі кільця».

Встановлено, що для низько- та середньофорсованих двигунів із загартованими або незагартованими гільзами за наявності верхніх поршневих кілець з твердим хромовим покриттям доцільним є застосування плосковершинного хонінгування у поєднанні з нанесенням металополімерного припрацьовувального покриття. Для середньо- та високофорсованих двигунів із загартованими гільзами оптимальні результати забезпечує рівновершинне хонінгування, доповнене триботехнологією формування механохімічного припрацьовувального покриття, що дозволяє стабілізувати поверхневий шар та підвищити його задиростійкість у більш напружених тепломеханічних умовах роботи.

Підбір зернистості та концентрації алмазних брусків здійснювали на основі серії експериментальних досліджень на хонінгувальних верстатах різних типорозмірів з урахуванням відтворюваності та стабільності формування заданого профілю. У табл. 2.2 наведено рекомендовані марки, розміри й основні характеристики алмазних брусків для основного та завершального хонінгування за технологіями плосковершинного і рівновершинного формування поверхні.

Таблиця 2.2 Рекомендована зернистість і концентрація алмазних брусків для основного і фінішного хонінгування поверхонь гільз циліндрів

Термічна обробка поверхонь гільз циліндрів	Тип профілю поверхні після хонінгування	Параметри зернистості та концентрації алмазних брусків	
		Основне хонінгування	Фінішне хонінгування
Негартовані поверхні гільз	Плосковер шинне	100/80; 125/100МС1-100%	14/10; 20/14МС1-100%

Гартовані поверхні гільз	хонінгування	160/125; 200/160MC1-100%	20/14;28/20; 4028MC1-100%
Негартовані поверхні гільз	Рівновершинне хонінгування	100/80+50/40;125/100 + +63/50MC1-100%	50/40;63/50MC1- 100%
Гартовані поверхні гільз		200/160+63/50; 250/200+83/63MC1- 100	63/50;80/63MC1- 100%

В оцінювальній специфікації наведено критерії контролю основних параметрів профілю та топографії поверхні циліндра, а також їхній вплив на процес припрацювання циліндро-поршневої групи та на витрати масла на вигорання під час технологічної обкатки двигуна. Встановлено, що будь-які відхилення показників якості поверхні від оптимальних значень призводять до погіршення змащувального режиму, виникнення локального схоплювання та передчасного зносу деталей пари тертя «циліндр – кільця», що супроводжується зростанням витрат масла на вигорання.

У специфікації також наведено типові причини виникнення дефектів поверхні (переривчасті риси, хвилястість, мікротріщини, напливи металу, викришування графітових включень тощо) та рекомендовані технологічні заходи з коригування параметрів процесу хонінгування для їх усунення й запобігання повторній появі.

На підставі аналізу експериментальних даних і вимог до експлуатаційних властивостей поверхні визначені оптимальні параметри профілю та топографії циліндра при плосковершинному хонінгуванні:

- кут хонінгування $\alpha = 55 \dots 65^\circ$, що забезпечує рівномірний розподіл і стабільне утримання мастила;
- відстань між глибокими рисками ≤ 100 мкм;
- риси повинні бути чітко нарізані, рівномірно розташовані, з ознаками двостороннього різання;

- відсутність хвилястих, перерваних і надмірно широких рисок (понад 75 мкм);
- поодинокі тріщини допускаються, якщо їхня довжина ≤ 100 мкм;
- поодинокі листоподібні напливи металу допускаються до 50 мкм;
- локальні вириви або викришування металу допускаються лише при їх максимальній величині до 50 мкм;
- глибина рисок верхнього ярусу плато $A = 1,0 \dots 1,5$ мкм;
- глибина впадин $C = 3 \dots 6$ мкм, що забезпечує необхідну маслоємність;
- відносна опорна довжина профілю $B = 50 \dots 75\%$, яка гарантує оптимальну площу фактичного контакту при припрацюванні.

Таке поєднання параметрів забезпечує швидкий і безпечний перехід технологічної поверхні у стабільний експлуатаційний стан, мінімізацію ризику задирів, підвищення ресурсу циліндро-поршневої групи та зниження витрат масла на вигорання.

При рівновершинному хонінгуванні оптимальними показниками топографії і профілю технологічної поверхні можна вважати такі: функціональна шорсткість маслоутримуючого профілю $R_{\phi}^c = 3 \dots 6$ мкм; функціональна шорсткість маслорозподільного профілю $R_{\phi}^a = 1,0 \dots 2,5$ мкм; відносна довжина опорного профілю $B = 50 \dots 65\%$.

Циліндри з оптимальними параметрами профілю та топографії технологічної поверхні, сумарна оцінка яких не перевищує 15 балів, вважаються придатними для комплектування двигунів і забезпечують їх надійну роботу. Допускається також використання циліндрів, що отримали оцінки 0; 1 або 3 бали за окремими показниками, за умови, що їх сумарний бал не перевищує 20. Такі відхилення не призводять до пошкодження поршневих кілець і не впливають критично на зносостійкість циліндро-поршневої групи.

Якщо сумарна кількість балів перевищує 20, циліндри підлягають вибракуванню для повторного хонінгування за умови можливості усунення дефектів поверхні шляхом додаткової механічної обробки. У випадках, коли усунення дефектів неможливе або недоцільне, такі деталі остаточно

вибраковуюються і направляються на переплав для повторного використання сировини.

Окремо підлягають вибракуванню циліндри, що отримали оцінку 4 або 5 балів хоча б за одним із дефектів поверхні, незалежно від загальної суми балів, оскільки це свідчить про наявність критичних недоліків, які можуть призвести до пошкодження пари тертя.

Незважаючи на значний міжнародний досвід у сфері хонінгування циліндрів, а також наявність рекомендацій щодо вибору оптимальних параметрів профілю та топографії технологічної поверхні, для кожного конкретного типу двигуна необхідно проводити власні експериментальні дослідження. Це пояснюється індивідуальністю конструктивних і технологічних характеристик, зокрема діаметра циліндрів, ходу поршня, кількості та типу поршневих кілець, ступеня форсування, системи охолодження, особливостей геометрії поршня і гільзи, хімічного складу чавуну та технології його лиття. Усі ці фактори визначають специфіку припрацювання поверхні і, відповідно, вимагають уточнення оптимальних характеристик профілю і топографії в умовах конкретного виробництва.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Вплив структури чавуну гільз циліндрів на зносостійкість деталей циліндро-поршневої групи

Метою досліджень було визначення оптимальних структурних характеристик чавунів для виготовлення циліндрів та припрацьовуючих покриттів їх робочих поверхонь, які забезпечують надійну обкатку двигунів з мінімальними втратами ресурсу пари тертя «циліндр — поршневі кільця».

Постійне зростання літрової потужності та експлуатаційного ресурсу сучасних автомобільних дизельних двигунів вимагає застосування високо задиристійких та зносостійких циліндрів і поршневих кілець. Припрацювання деталей розпочинається під час короткочасної заводської обкатки й завершується вже в умовах експлуатації автомобіля. Заводська обкатка повинна забезпечити формування повноцінної експлуатаційної поверхні пари тертя з плавним переходом від технологічного мікропрофілю без ризику пошкоджень та інтенсивного спрацювання.

Якість припрацювання визначається структурою чавуну гільз, параметрами профілю і топографії технологічної поверхні, застосованими припрацьовуючими покриттями, характеристиками покриттів поршневих кілець та рядом конструктивних і режимних факторів.

Дослідження циліндрів із різною структурою чавуну проводилися в умовах обкатки сучасних дизельних двигунів, що широко застосовуються у вантажних автомобілях, а також у дизельних двигунах сімейств Д-245, СМД-18 та 4DTNA, включаючи їх одноциліндрові секції. Додатково зразки поверхонь перевіряли на машині тертя типу СМЦ-2 для визначення триботехнічних властивостей матеріалів. Комплектація двигунів здійснювалась серійними поршнями та поршневими кільцями; верхні компресійні кільця мали тверде електролітичне хромове покриття з полірованою поверхнею.

Для оцінки припрацювання і зношування циліндро-поршневої групи до та після обкатки визначали наступні параметри:

- профіль і топографію технологічної поверхні циліндра;
- структурний стан чавуну та мікротвердість поверхневого шару;
- внутрішній діаметр циліндрів (мікрометруванням і методом штучних баз);
- радіальну товщину верхніх компресійних кілець.

Методика відпрацьовувалася на сучасному дизельному двигуні. Для оцінки задиростійкості проводилася короткочасна обкатка протягом 32 хв, далі виведення на режим максимальної потужності при $n = 3200 \text{ хв}^{-1}$ з витримкою на цьому режимі протягом однієї години. Температура охолоджуючої рідини та масла підтримувалась на рівні $80 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Після завершення випробувань двигун розбирали для аналізу стану поверхонь тертя, після чого за позитивних результатів проводили повну 60-годинну технологічну обкатку згідно з методикою заводу-виробника для визначення зносостійкості циліндро-поршневої групи.

Огляд після короткочасної обкатки показав, що циліндри з перлітним і аустенітним чавуном забезпечують достатню задиростійкість завдяки їхній помірній твердості та гетерогенності структури, що сприяє оптимальному початковому зношуванню і формуванню мастильної плівки.

Робоча поверхня гартованих циліндрів після технологічної обробки мала характерний металічний блиск із чітко вираженими слідами мікрорізання технологічним абразивом та продуктами зносу. Така поверхня практично позбавлена мікровпадин, що погіршує маслоутримувальні властивості й ускладнює формування стабільного мастильного режиму. Задиростійкість мартенситної структури виявилася недостатньою через її надмірно високу твердість, що призводить до локальних руйнувань у зоні контакту при першому навантаженні.

Для оцінювання впливу структури чавуну й процесів припрацювання на властивості поверхневого шару виконували визначення мікротвердості зразків у зоні зупинки верхніх поршневих кілець та у прилеглих ділянках як після операції хонінгування, так і після короткочасної та повної обкатки двигуна.

Додаткові заміри проводили після різних експлуатаційних випробувань для встановлення закономірностей зміни твердості в процесі роботи.

Мікротвердість вимірювали інтерференційним глибиноміром моделі 270, що забезпечує високу точність визначення характеристик поверхневого шару на малих глибинах. Узагальнені результати вимірювань подано у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Характеристика мікротвердості робочих поверхонь гільз циліндрів

Дослідні зразки гільз циліндрів	Параметри мікротвердості,	
	Вище верхньої мертвої точки	В зоні верхньої мертвої точки
В результаті процесу хонінгування		
Перлітна структура чавуну гільзи циліндра	229	229
Аустенітна структура чавуну гільзи циліндра	380	380
В результаті короткотермінового технологічного обкатування протягом 1,5 год.		
Перлітна структура чавуну гільзи циліндра	280	314
	518	720
Аустенітна структура чавуну гільзи циліндра	420	400
В результаті повного циклу технологічного обкатування протягом 60 год.		
Перлітна структура чавуну гільзи циліндра	399	432
	835	1248
Аустенітна структура чавуну гільзи циліндра	360	325
Мартенситна структура чавуну гільзи циліндра		

Як видно з табл. 3.1, у циліндрах із перлітного чавуну під час короткочасної, а згодом і повної обкатки двигуна спостерігається зростання

мікротвердості поверхні в зоні верхньої мертвої точки (ВМТ) відповідно в 1,4 та 1,9 рази. Це свідчить, що вже під час первинного припрацювання відбувається активна трансформація поверхневого шару під дією пластичних деформацій, спричинених тертям поршня та кілець. Завершення структурних змін відбувається на етапі повної обкатки, коли формується стабільний експлуатаційний мікропрофіль.

Для циліндрів із аустенітною вставкою зростання мікротвердості є ще більш інтенсивним: після короткочасної обкатки у 1,9 рази, після повної у 3,3 рази. Рентгеноструктурний аналіз засвідчив, що в поверхневому шарі аустенітної структури відбуваються фазові перетворення, зумовлені дією підвищених температур у зоні контакту та високих контактних навантажень. Аустеніт є метастабільним і зазнає часткової трансформації у мартенсит під час тертя, що супроводжується зміцненням поверхні. На робочій поверхні спостерігаються сліди мікрорізання та мікрозчеплення, характерні для етапу первинного припрацювання. Повне формування експлуатаційної поверхні відбуватиметься вже у процесі нормальної роботи двигуна. Недостатня інтенсивність зношування під час обкатки пояснюється підвищенням твердості поверхні внаслідок структурних перетворень.

У гартованих циліндрах, навпаки, після короткочасної та повної обкатки спостерігається зниження мікротвердості поверхневого шару у зоні ВМТ відповідно у 1,06 та 1,3 рази. Це зумовлено недостатньою стабільністю мартенситної структури до розпаду під впливом температур, що виникають при згорянні палива та терті. Незважаючи на завершення переходу від технологічної поверхні до експлуатаційної, повне припрацювання ще не досягнуто — на поверхні видно сліди технологічного мікрорізання, а на фрактограмах — пори, сформовані під час попередньої механічної обробки.

Триботехнічні характеристики різних чавунних структур додатково досліджувалися на машині тертя за розробленою експрес-методикою. Схема випробування відповідала типу «диск — колодка» (рис. 3.1, рис. 3.2). Дисконконтртілом слугувала загартована сталь ШХ15 ($HRC \geq 62$), діаметром 52 мм та

висотою 15 мм. Колодка виготовлялася з матеріалу випробуваної гільзи. Для забезпечення статистичної достовірності досліджували не менше трьох однакових зразків кожної структури чавуну.

Тривалість одного випробування становила 80 хв, цього часу достатньо для стабілізації коефіцієнта тертя. У процесі експерименту вимірювали: момент тертя, силу тертя та коефіцієнт тертя. Для визначення крутного моменту застосовувався індуктивний датчик із торсійним ротором, який реєстрував відгук на контактні сили в електричному колі машини.

Зносостійкість зразків одного типу чавуну оцінювали за результатами серії з не менше ніж 8 однакових дослідів, що дозволяло визначити середні параметри зношування з високою достовірністю.

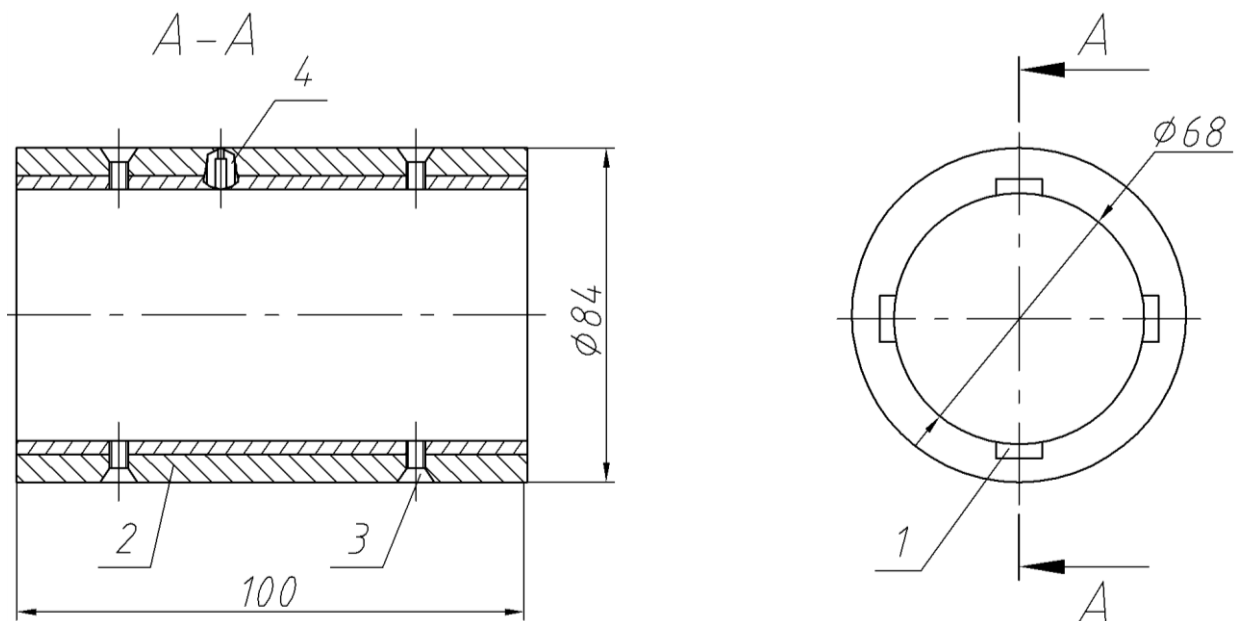


Рисунок 3.1 Робочий вузол машини тертя СМЦ-2:

1 – притискні колодки; 2 – втулка (контрзразок); 3 – затискні гвинти; 4 – досліджувані зразки гільз циліндрів

Середню ширину ямки визначали за результатами вимірювань у десяти поперечних перерізах із подальшим усередненням отриманих значень. Дослідження задиростійкості зразків циліндрів виконували за розробленою експрес-методикою на машині тертя в умовах сухого контакту, тобто без подачі мастильного матеріалу. Критерієм переходу пари тертя до режиму зчеплення та

початку задиру приймали зміну акустичних параметрів у поєднанні з появою характерної вібрації системи, що фіксувала втрату стабільності процесу тертя.

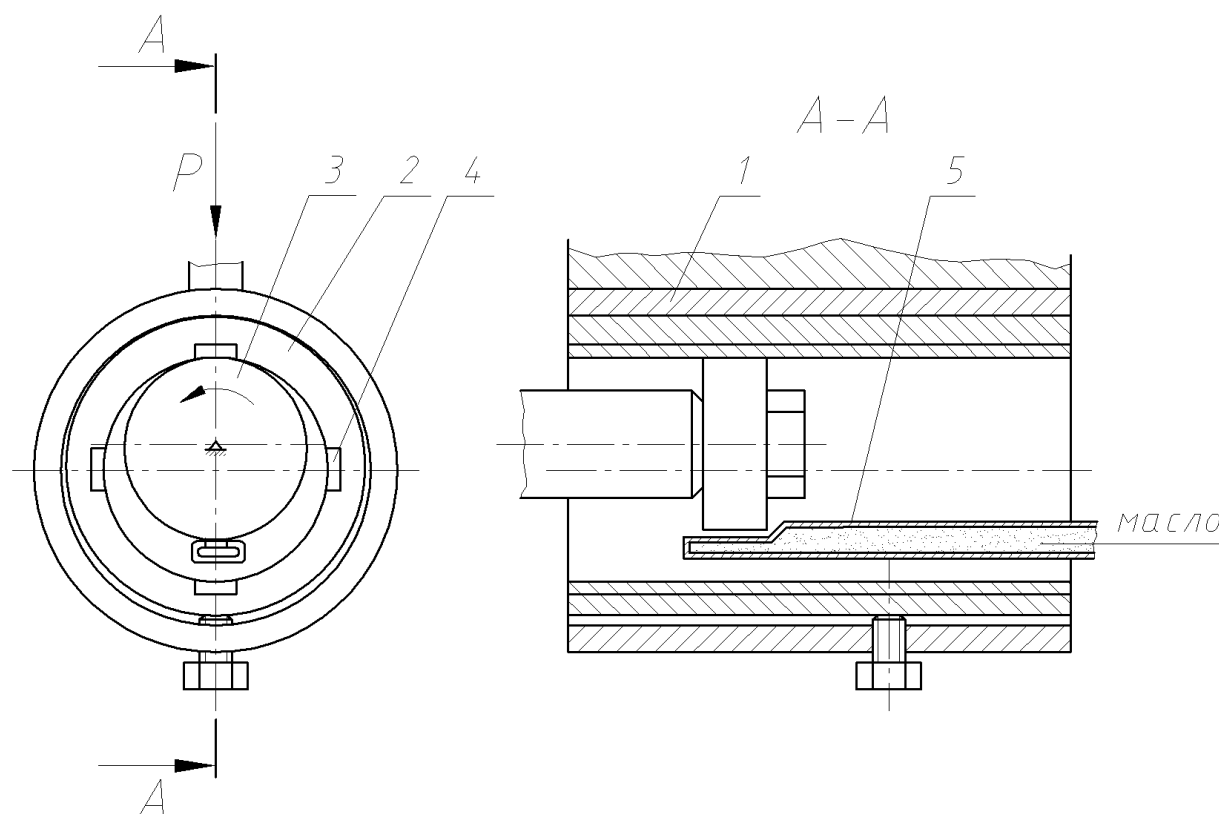


Рисунок 3.2 Загальний вигляд вузла тертя та механізму подачі масла машини тертя СМЦ-2: 1 – робоча обойма; 2 – втулка для кріплення досліджуваних зразків; 3 – вал (контртіло); 4 – досліджувані зразки гільз циліндрів; 5 – трубка для подачі масла в зону тертя.

Аналіз триботехнічних характеристик зразків циліндрів із різною структурою чавуну, визначених на машині тертя (табл. 3.2), показав, що після хонінгування негартовані циліндри з перлітною та аустенітною структурою мають істотно кращу припрацьовуваність порівняно із загартованими циліндрами мартенситного типу. Зокрема, тривалість припрацювання негартованих зразків виявилася меншою відповідно у 1,9 та 2,3 раза, що свідчить про швидше встановлення стабільного режиму тертя в парі «циліндр — контртіло». Узгоджено з цим, задиростійкість негартованих зразків перевищує аналогічний показник загартованих орієнтовно у 1,8...1,9 раза, що підтверджує їх вищу стійкість до переходу в режим зчеплення за заданих умов навантаження.

Крім того, коефіцієнт тертя для негартованих циліндрів є нижчим у 1,15...1,23 раза, ніж для загартованих, що вказує на сприятливіший характер контактної взаємодії та менші втрати на тертя. Отримані результати дають підстави стверджувати, що задиростійкість і зносостійкість у значній мірі визначаються структурним станом чавуну та можуть проявлятися як взаємно суперечливі експлуатаційні властивості: підвищення твердості й потенційної зносостійкості загартованої мартенситної структури супроводжується зниженням здатності поверхні до швидкого та безпечного припрацювання і, відповідно, зменшенням задиростійкості.

Таблиця 3.2 Триботехнічні властивості зразків матеріалів гільз циліндрів

Параметри структури та значення твердості досліджуваного чавуну	Триботехнічні властивості досліджуваних зразків гільз циліндрів одержаних на машині тертя СМЦ 2			Параметри зносостійкості гільз циліндрів		
	Період часу до припрацювання поверхні, хв	Задиростійкість поверхні, с	Коефіцієнт пари тертя, f	З використанням машини тертя, $I_{\text{тн}}$ 10^{-9} , мкм/цикл	Короткочасна обкатка двигуна, мкм/г	Повна обкатка двигуна, мкм/г
Перлітна структура HB 190...210	$\frac{12}{6}_1$	$\frac{18}{36}_1$	$\frac{0,70}{0,55}_1$	$\frac{10,8}{7,9}_1$	$\frac{1,86}{1,40}_2$	$\frac{0,08}{0,07}_2$
Аустенітна структура HB 147...197	$\frac{10}{5}_1$	$\frac{19}{40}_1$	$\frac{0,65}{0,50}_1$	$\frac{5,9}{3,4}_1$	$\frac{1,80}{1,30}_2$	$\frac{0,08}{0,06}_2$
Мартенситна структура HRC 40...45	$\frac{23}{10}_1$	$\frac{10}{35}_1$	$\frac{0,80}{0,50}_1$	$\frac{4,2}{3,7}_1$	$\frac{1,30}{1,00}_2$	$\frac{0,09}{0,04}_2$

(НВ400...460)						
---------------	--	--	--	--	--	--

Примітки:

1. Чисельник - знаменник – основні триботехнічні параметри дослідних зразків гільз циліндрів до і після обкатки двигуна;
2. Чисельник - знаменник – параметри зносостійкості гільз циліндрів та верхніх поршневих кілець.

Після завершення повної технологічної обкатки двигуна триботехнічні характеристики зразків циліндрів із різними структурами чавуну істотно покращуються порівняно з їх станом після хонінгування. Зокрема, час до припрацювання на машині тертя скоротився у 2,0...2,3 рази, а задиростійкість збільшилася приблизно в два рази. При цьому негартовані циліндри продемонстрували удвічі менший час до припрацювання, ніж гартовані, тоді як значення коефіцієнта тертя та задиростійкість для обох типів стали практично однаковими.

Випробування зразків на зносостійкість показали, що одразу після хонінгування зносостійкість перлітних і аустенітних чавунів була відповідно в 2,6 та 1,4 рази нижчою, ніж у гартованих. Проте після повної технологічної обкатки ситуація змінилася: зразки гартованих циліндрів виявилися менш зносостійкими — у 1,09 рази порівняно з аустенітними та у 2,1 рази порівняно з перлітними циліндрами.

Як свідчать дані табл. 3.2, знос циліндрів та верхніх поршневих кілець після короткочасної обкатки двигуна корелює із структурою та мікротвердістю чавуну: зі зростанням твердості зменшується інтенсивність спрацювання. Аналогічні тенденції підтверджені машинними триботестами після хонінгування, що дозволяє використовувати такі випробування для попереднього прогнозування задиро- та зносостійкості циліндрів при обкатці двигуна.

Після завершення повної 60-годинної обкатки двигуна приріст

зносостійкості циліндрів із різним структурним станом становив:

- для перлітної структури у 23,5 рази;
- для аустенітної структури у 22,5 рази;
- для мартенситної структури у 14,4 рази, (табл. 3.2).

Менший приріст для мартенситної структури пояснюється розпадом мартенситу внаслідок відпускних процесів під дією тепла зони тертя, що знижує стабільність зміцнення поверхневого шару. У перлітних та аустенітних циліндрах відбувається структурна трансформація зі збільшенням мікротвердості й зносостійкості.

Зносостійкість верхніх поршневих кілець у цих циліндрах також зростає:

- у перлітних — у 20 разів;
- у аустенітних — у 22 рази;
- у мартенситних — у 25 разів.

Водночас абсолютний рівень зносостійкості кільця у гартованих циліндрах виявився вищим: у 1,75 рази порівняно з перлітними та у 1,5 рази — з аустенітними. Такі показники забезпечуються високою твердістю та зміцненням поверхні за рахунок продуктів розпаду мартенситу в процесі тертя. Разом із тим ці дані потребують подальшої перевірки в ширшому діапазоні умов експлуатації.

Оцінка частки спрацювання циліндрів із різними структурами чавуну після повної технологічної обкатки двигуна (табл. 3.3) показує їхній вплив на ресурс до капітального ремонту.

Таблиця 3.3 Частка зносу гільз циліндрів в результаті повної обкатки двигуна автомобіля

Структура чавуну гільз циліндрів	Величина зносу гільз циліндрів після повної обкатки двигуна, мкм	Регламентований ресурс гільз циліндрів до першого капітального ремонту, мкм	Частка зносу гільз циліндрів після відповідного часу обкатки двигуна, %
----------------------------------	--	---	---

Перлітна структура	10,5	150	7,0
Аустенітна структура	5.6	150	3,7
Мартенситна структура	6.4	150	4,3

Після завершення повної технологічної обкатки двигуна встановлено, що частка спрацювання циліндрів із різними структурами чавуну становить лише 3,7...7,0 % від загального ресурсу до капітального ремонту. Це підтверджує значний резерв працездатності циліндрів і високу ефективність заводського етапу припрацювання.

Дослідження властивостей структур чавуну циліндрів дозволили визначити вплив їхніх складових компонентів на задиростійкість і зносостійкість робочої поверхні. На основі аналізу експериментальних результатів сформульовано висновки: задиростійкість і зносостійкість є взаємнопротилежними експлуатаційними властивостями структури чавуну: підвищення однієї з них, як правило, викликає зниження іншої; на етапі короткочасної заводської обкатки задиростійкість і зносостійкість циліндрів визначаються насамперед початковою мікротвердістю поверхневого шару.

Перелічені властивості можна достовірно прогнозувати за результатами випробувань зразків на машині тертя; на цьому етапі лише розпочинається структурна трансформація чавуну під дією тепла й пластичних деформацій; у процесі повної технологічної обкатки визначальними факторами зносостійкості стають не лише початкова мікротвердість і структура чавуну, але й здатність поверхневого шару трансформуватися та зміцнюватися при роботі двигуна. Структура чавуну впливає на зносостійкість циліндра, тоді як твердість поверхні циліндра визначає зносостійкість верхніх поршневих кілець; залежно від структурних характеристик чавуну частка спрацювання гільз циліндрів після завершення повного циклу заводської обкатки становить 4...7 % їх ресурсу до капітального ремонту.

3.2 Характер впливу припрацьовуючих покриттів поверхонь гільз циліндрів на параметри їх задиро- і зносостійкості

З метою встановлення впливу припрацьовувального покриття на задиростійкість і зносостійкість циліндрів виконували дослідження фізико-хімічного стану та триботехнічних характеристик поверхневого шару після послідовного виконання технологічних етапів: хонінгування, нанесення припрацьовувальних покриттів, короткочасної обкатки та повної обкатки двигуна. Такий підхід дозволив простежити еволюцію поверхні на кожній стадії формування робочого мікрорельєфу й оцінити внесок покриття у стабілізацію процесів тертя.

Для аналізу змін властивостей застосовували комплекс структурно-енергетичних методів, що поєднує растрову електронну мікроскопію, мікрорентгеноспектральний і рентгеноструктурний аналізи, а також фотоелектронну спектроскопію. Фізико-хімічний стан поверхневого шару уточнювали за результатами фрактографічних досліджень на електронному мікроскопі-мікроаналізаторі «Gamscan-4DV», який забезпечує отримання тривимірної картини рельєфу завдяки електронно-променевому скануванню.

Визначення фазового складу, локального розподілу хімічних елементів і характеру включень у металічній основі чавуну здійснювали методом рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА). Первинне рентгенівське випромінювання формувалося під дією електронного променя на досліджувану ділянку поверхні, а подальшу цифрову обробку спектрів із кількісною корекцією виконували із застосуванням енергодисперсійного спектрометра LZ-5 та мікрокомп'ютерної системи «Link-860».

Рентгеноструктурні дослідження проводили відповідно до методики, наведеної у профільних літературних джерелах, з метою ідентифікації фаз, визначення параметрів кристалічної ґратки та оцінювання ступеня структурних перетворень у приповерхневій зоні тертя.

Визначення залишкових напружень I роду в циліндрах і верхніх поршневих кільцях виконували методом пошарового електролітичного травлення. Цей метод дає можливість встановити розподіл окружних залишкових напружень по товщині зразка. Для дослідження із поверхні циліндра вирізали кільцевий фрагмент шириною 10 мм (рис. 3.3), здійснювали розріз по твірній і фіксували зміну діаметра. У процесі електролітичного зняття матеріалу з поверхневими напруженнями відбувалася деформація зразка, яка неперервно реєструвалася у вигляді кривої часу (рис. 3.4).

Дослідження проводили на спеціальному пристрої (рис. 3.4), де зразок 1 встановлювався в тримачі 2 таким чином, щоб його рух передавався лапці 3, яка контактувала з пружно деформівним елементом із тензорезисторами 4. У зібраному вигляді зразок занурювався у ванну 6 з електролітом. Зразок виконував роль анода, а катодом був армований металом півциліндр із діелектрика 5. Струм подавався від джерела постійної напруги зі стабілізацією за струмом. Розбалансування тензомоста, спричинене зміною опору тензорезисторів, підсилювалося підсилювачем У і приводило в дію електродвигун РД-09, який керував самописцем (рис. 3.5). Положення пера відповідало величині деформації зразка. Нульове положення встановлювали регулювальними резисторами і.

Тарування вимірювальної системи здійснювали на спеціальному пристосуванні (рис. 3.6), яке забезпечує жорстке закріплення кільцевого зразка з можливістю контрольованого розтискання по діаметру. При цьому деформація одночасно фіксувалася мікрометричною головкою та на приладі для зіставлення результатів. Розрахунок залишкових напружень виконували на основі залежностей між товщиною знятого шару, геометрією зразка та величиною деформації відповідно до розробленої методики.

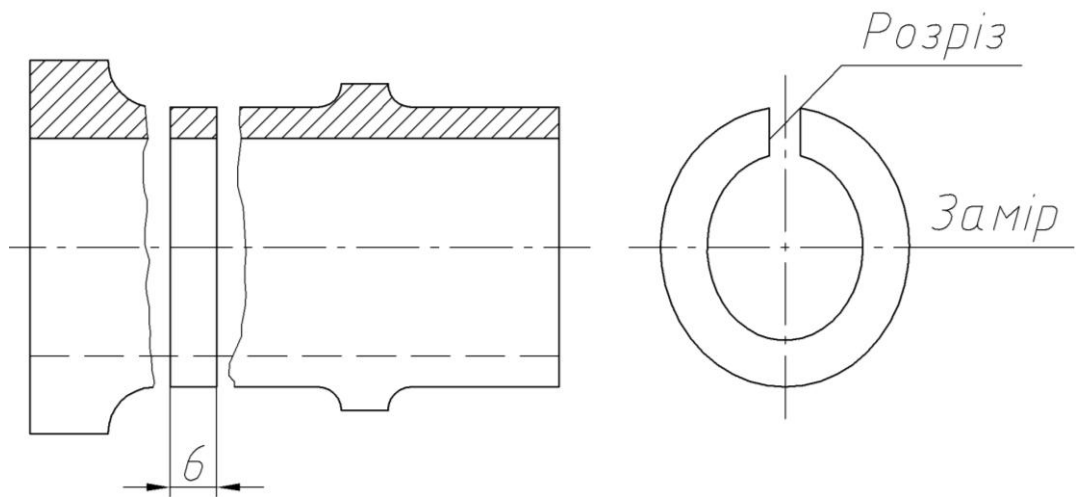


Рисунок 3.3 Загальний вигляд досліджуваного зразка гільзи циліндра.

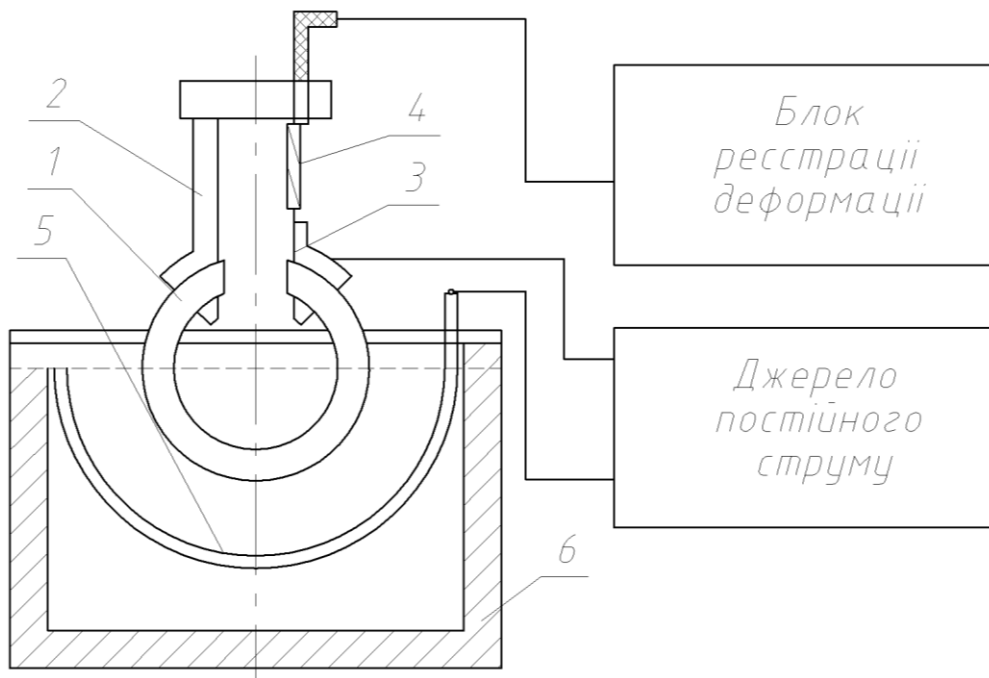


Рисунок 3.4 Принципова схема установки для дослідження величини залишкових напружень у зразках кільцевої форми:

1 – досліджуваний зразок; 2 – зразкотримач; 3 – прижимна лапка; 4 – тензорезисторна пластинка; 5 – діелектричний катод; 6 – робоча ванна.

Підготовку зразків до випробувань виконували за такою послідовністю. Вирізане кільце попередньо розмічали, проводили контрольні вимірювання, після чого розрізали по твірній. Повторні вимірювання після розрізання здійснювали за тими самими мітками, що використовувалися до розрізування (рис. 3.3), що забезпечувало коректність порівняння геометричних параметрів.

Товщину знятого шару металу визначали непрямим методом за різницею маси зразка до та після операції травлення. Перед травленням зразок знежирювали, а поверхні, які не підлягали обробці, ізолювали захисним лаком. Для електролітичного травлення чавуну та сталі застосовували електроліт складу: 100 г NaCl і 50 г ZnSO₄ на 1 л води.

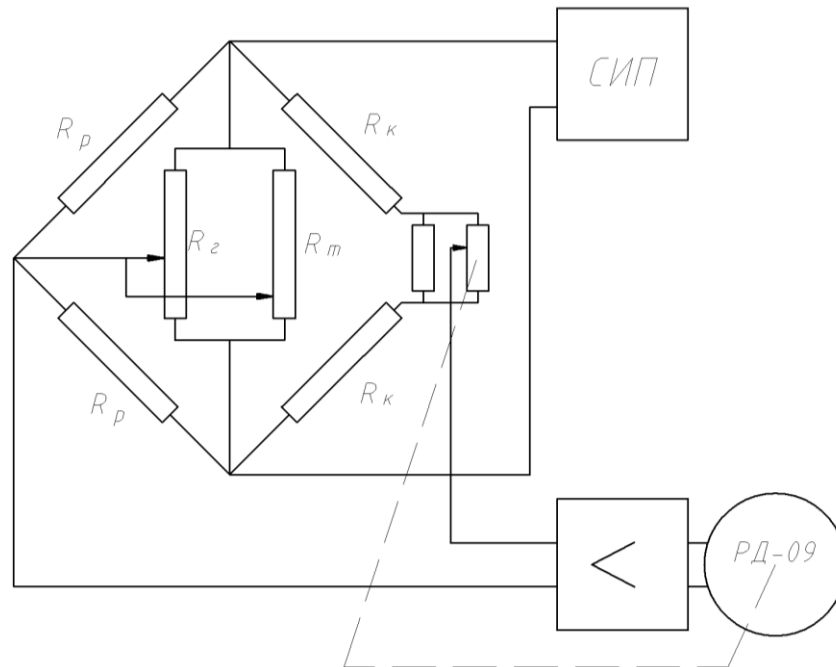


Рисунок 3.5 Принципова електрична схема контрольного пристрою для дослідження величини залишкових напружень у зразках:

R_p і R_k – підібрані типи тензорезисторів; R_z і R_m – підібрані типи резисторів; РД-09 – електричний двигун; СІП – самопишучий прилад.

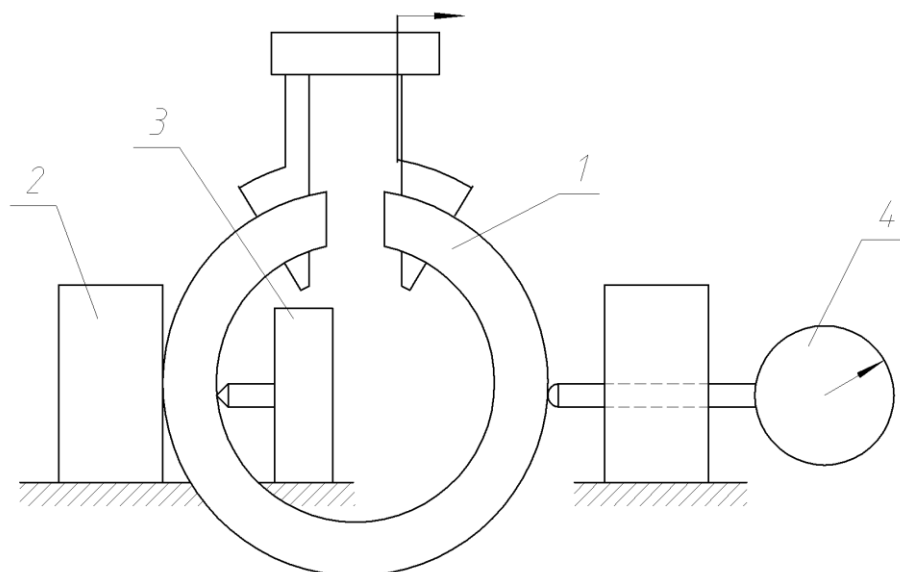


Рисунок 3.6 Схеми пристосування для тарування досліджуваного зразка:

1 – досліджуваний зразок; 2 – корпус пристосування; 3 – механізм затиску досліджуваного зразка; 4 – індикатор мікрометричного.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Дослідження характеру впливу основних хімічних елементів на трибологічні властивості перлітного чавуну для гільз циліндрів

У попередніх розділах розглянуто закономірності впливу структурних складових чавуну на задиростійкість і зносостійкість робочих поверхонь циліндрів та визначено вимоги до мікроструктури перлітних чавунів, що застосовуються для їх виготовлення. Згідно з цими вимогами металічна основа має бути гетерогенною з формуванням високодисперсного сорбітоподібного перліту — тонкопластинчастої суміші фериту та цементиту. Саме така мікроструктура забезпечує необхідний комплекс експлуатаційних і технологічних властивостей, зокрема підвищені твердість і міцність, достатні теплопровідність і теплоємність, теплостійкість, пружні характеристики, ударну в'язкість, корозійну стійкість, модуль зсуву, стабільність густини, а також прийнятні межі міцності при стиску та зрізі.

Обґрунтовано, що підвищення зносостійкості можливе за умови наявності зміцнювальної фази, яка обмежує розвиток як поверхневих, так і підповерхневих деформацій у процесі тертя. Такий ефект досягається формуванням у перлітній основі евтектичних стабільних карбідів або фосфідної евтектики з карбідами у вигляді тонкої сітки об'ємом 6...10%, що водночас є раціональним інтервалом і з позицій оброблюваності матеріалу. Додатковою необхідною умовою є присутність у структурі пластинчастого графіту, розподіленого рівномірно або з допустимою нерівномірністю, з переважно прямолінійною або слабко звивистою формою пластин довжиною 45...180 мкм у кількості 8...12%. Така графітна складова забезпечує достатню маслоємність поверхонь тертя, сприяє підвищенню теплопровідності та позитивно впливає на антифрикційні властивості матеріалу.

Експериментальні результати свідчать, що формування заданої структури чавуну забезпечується раціональним доббором хімічного складу в поєднанні з удосконаленням параметрів виплавки, процесів рафінування, модифікування та

лиття. З метою узагальнення підходів і визначення оптимального складу виконано аналіз хімічних систем чавунів, які застосовуються для виготовлення циліндрів автомобільних двигунів провідними світовими моторобудівними компаніями. Подальший вибір оптимального хімічного складу здійснювали на основі порівняльної оцінки властивостей чавунів та впливу окремих легувальних елементів, що визначалися за результатами власних експериментальних досліджень і даних, наведених у профільних наукових джерелах.

Формула для визначення кількості вуглецю, який знаходиться у чавуні в зв'язаному стані, окрім кількості вуглецю, який знаходиться у вільному стані:

$$\%C_{зв} = 0,87 - 0,12Si$$

Зниження кількості кремнію (Si) в чавуні підвищує кількість зв'язаного вуглецю. При $C_{зв} = 0,8...1,2\%$ збільшується твердість, міцність і зносостійкість чавуну, але знижується пластичність і задиростійкість. При збільшенні кількості кремнію в чавуні зростає кількість вуглецю у вільному стані, який являє собою графіт.

Основні параметри графіту вибиралися з таких умов, щоб вони забезпечили чавуну такі властивості:

- високу рідкотекучість розплавленого металу;
- мінімальну осадку при кристалізації сплаву;
- задовільну механічну обробку лезовим і абразивним інструментом;
- високу задиро- і зносостійкість, твердість і міцність.

Як підтвердили дослідження, ці вимоги виконуються в тому випадку, якщо графіт пластинчатий прямолінійний або завихрений ($\Gamma_{\phi 1}$ і $\Gamma_{\phi 2}$) рівномірно і нерівномірно розміщений ($\Gamma_p 1$ і $\Gamma_p 2$) з довжиною пластин 50...180 мкм ($\Gamma_{раз} 50...90$) в кількості 8...12% (Γ_{10}). Ці параметри графіту забезпечують високо вуглецеві перлітні чавуни з кількістю вуглецю не менше 3,0...3,6% для циліндрів карбюраторних двигунів і 3,2...4,0% для циліндрів дизелів.

Кількість, морфологія, характер розподілу та геометричні параметри пластин графіту визначаються хімічним складом чавуну, співвідношенням графіто- і карбідоутворюючих елементів, вибором шихтових матеріалів, технологією плавлення, розкислення та модифікування розплаву, режимами лиття і подальшим старінням заготовок. Кремній (Si) є одним із головних хімічних елементів, що впливають на формування графіту, стан металевої основи та зміцнювальної фази. З його збільшенням у чавуні зменшується вміст зв'язаного вуглецю та кількість карбідів у перліті, що призводить до зниження твердості та зносостійкості. Кремній зменшує концентрацію вуглецю в твердому розчині, ослаблюючи металеву основу. За вмісту Si понад 2,5% помітно знижується кількість цементитних пластин у фосфідній евтектиці — важливій зміцнювальній фазі.

Кремній підвищує активність вуглецю в рідкому розплаві, прискорює графітизацію та інтенсивність росту зародків графіту. Після кристалізації він розчиняється у α -Fe, але практично не входить до складу цементиту Fe_3C , тому сприяє зменшенню міцності, пластичності, теплопровідності та теплостійкості. При підвищених температурах Si стимулює розклад пластин цементиту у перліті ($\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{Fe}_\alpha + \text{C}_{\text{графіт}}$), викликаючи феритизацію і крихкість чавуну. Під час переходу $\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\gamma$ кремній знижує розчинність вуглецю в аустеніті, а при гартуванні його вміст понад 2% зменшує твердість мартенситу. Крім того, Si понад 1% погіршує корозійну стійкість матеріалу. Враховуючи перелічені негативні впливи, кремній частково доцільно замінювати більш ефективними графітоутворюючими елементами, зокрема міддю (Cu), що підвищує міцність, теплопровідність, в'язкість і стабільність металевої основи. Оптимальний вміст Si у чавунах для циліндрів не повинен перевищувати 2,5%, за винятком спеціальних зносо- і задиростійких хромокремнієвих сплавів.

Марганець (Mn) є карбідоутворюючим елементом, що сприяє зменшенню міжпластинної віддалі цементиту (збільшенню дисперсності перліту) і підвищенню твердості металевої основи. Однак надмірний вміст Mn веде до зниження пластичності, антифрикційних властивостей, гарячої твердості,

модуля зсуву та збільшення довжини пластин графіту. Для циліндрів карбюраторних двигунів вміст Mn доцільний у межах 0,4...0,8%, а для дизельних — 0,3...0,7%, за винятком високомарганцевих аустенітних чавунів.

Хром (Cr) стабілізує перліт на підвищених температурах, і його вплив проявляється при вмісті не менше 0,25%. Для забезпечення необхідних властивостей зносостійкості, теплостійкості, міцності, теплопровідності та корозійної стійкості вміст Cr має бути не меншим за 0,3...0,6%. Якщо хром є єдиним карбідоутворюючим елементом, для формування комплексних карбідів у металевій основі, його кількість повинна складати 0,9...1,25%. При цьому, структура повинна бути збалансована кремнієм і міддю як графітоутворювачами. Хром підвищує модуль зсуву та, відповідно, знижує пластичність металевої основи, збільшуючи опір пластичній деформації. Також він впливає на утворення фосфідної евтектики: при 0,4...0,8% Cr формується її оптимальний вміст (4...10%), що забезпечує високу зносостійкість. У такій структурі спостерігаються цементитні пластини, які додатково підвищують твердість і опір спрацюванню.

У разі легування чавуну молібденом, ванадієм, титаном, фосфором, бором, оловом та іншими елементами оптимальний вміст хрому слід знижувати до 0,3...0,6% залежно від їх концентрації. У цих випадках Cr сприяє формуванню сорбітоподібного перліту, подрібненню графіту, стабілізації цементиту й карбідів за підвищених температур, що робить його одним із найефективніших і доступних легувальних елементів для циліндрів.

Мідь (Cu) застосовується переважно як часткова заміна кремнію, оскільки підвищує активність вуглецю у розплаві та інтенсифікує графітизацію. Це дає змогу зменшити вміст Si. Мідь збільшує твердість, міцність, теплостійкість, теплопровідність, корозійну стійкість, ударну в'язкість і опір повзучості при високих температурах, а також вирівнює твердість по перерізу циліндра, гальмує дифузійні процеси у фериті й сприяє перлітизації під час евтектоїдного перетворення. Вона є ефективним деглобулізатором графіту, знижує дифузію хрому до поверхні тертя та схильна накопичуватися у приповерхневих шарах.

Розчинність Cu у рідкому чавуні становить до 5,5%, у твердому — до 3,5%. Залежно від концентрації хрому, молібдену чи ванадію оптимальний вміст міді складає 0,25...1,25%. За ефективністю впливу на структуру Cu може частково замінювати молібден, що є важливою перевагою з економічної точки зору.

Молібден (Mo) забезпечує високі міцнісні характеристики та твердість чавуну до температури приблизно 700 °C, оскільки при його вмісті до 0,5% він рівномірно розчиняється в α -Fe, зміцнюючи металеву основу без суттєвого впливу на морфологію графіту. У таких умовах молібден підвищує теплостійкість і теплопровідність матеріалу, його корозійну та зносостійкість, а також знижує концентрацію вуглецю у твердому розчині. Оптимальний його вміст у чавунах для циліндрів становить 0,4...0,8% залежно від концентрації інших карбідоутворюючих елементів.

Якщо загальний вміст цих елементів перевищує 0,8...1,2%, то концентрація Mo понад 0,5% сприяє утворенню комплексних карбідів, які відіграють роль бар'єрів для пластичної деформації під час ковзання поршневих кілець по поверхні циліндра. У зв'язку з обмеженістю ресурсів молібдену його широке застосування є економічно не вигідним, тому доцільним розглядається заміщення його ефекту комплексним легуванням доступнішими елементами, зокрема хромом, міддю та ванадієм при мінімальному вмісті кремнію.

Ванадій (V) сприяє подрібненню пластин графіту, підвищує мікротвердість металевої основи та стабілізує перліт, формує дрібнодисперсні комплексні карбіди і підвищує їх стабільність у зоні тертя. Завдяки деглобулізаційному впливу він поліпшує розподіл графіту та зносостійкість циліндрів.

Оптимальний вміст ванадію становить 0,15...0,25%, оскільки надмірна його кількість може ускладнювати механічну обробку. На відміну від молібдену ванадій є більш доступним елементом, оскільки значна його частка міститься у поліметалічних рудах, а шлаки переробки таких руд є перспективним джерелом для легування.

Титан (Ti) утворює стійкі карбіди, підвищуючи міцність, зносостійкість,

теплостійкість та антифрикційні характеристики чавуну. Він забезпечує формування міждендритного та дрібнопластинчастого графіту, а також рівномірно розподілених у матриці карбідів титану. Оптимальна його кількість — 0,1...0,3%. Доцільність застосування титану визначається також можливістю його надходження до шихти з руди, якщо відокремлення його металургійними методами є економічно складним.

Бор (В) підвищує твердість і зносостійкість чавуну; за концентрації понад 0,01% він утворює тверді карбіди. При одночасній наявності бору (0,04...0,06%) і підвищеного вмісту фосфору ($\geq 0,3\%$) формується фосфідна евтектика, твердість якої досягає HB 800...900, що у 1,5...1,8 рази перевищує показники низьколегованих фосфористих чавунів (HB 500...600).

Невелика кількість бору (0,01...0,03%) вважається оптимальною для забезпечення оброблюваності і рівномірного зменшення довжини графітних пластин, підвищення мікротвердості металевої основи і формування карбідної евтектики, яка є дрібнішою і твердішою за фосфідну. Бор вводять до розплаву у вигляді феробору, проте його мінімальні концентрації ускладнюють точний контроль дозування.

Олово (Sb) сприяє зміцненню та підвищенню твердості чавуну, покращує рівномірність розподілу графіту, знижує розміри графітних включень і стабілізує металеву основу. Оптимальний його вміст становить 0,35...0,40%, але висока вартість і обмежені ресурси роблять широке легування оловом економічно недоцільним.

Нікель (Ni) формує однорідну структуру, підвищує міцність і корозійну стійкість чавуну, збільшує здатність металевої основи до пластичної деформації, але одночасно знижує теплостійкість і зносостійкість, якщо матриця не зміцнена карбідами або фосфідною евтектикою. Випробування чавунів із нікелем у межах 0,8...1,0% показали недостатню зносостійкість як циліндрів, так і поршневих кілець. Тому спеціальне легування нікелем для циліндрів є недоцільним, за винятком ситуацій, коли його частка надходить до сплаву зі шихти і становить 0,10...0,25%.

Фосфор (Р) підвищує текучість розплавленого чавуну, активізує графітоутворення та сприяє утворенню фосфідної евтектики, кількість якої збільшується пропорційно його вмісту. Водночас надлишок фосфору негативно впливає на механічні властивості: при його концентрації понад 0,5% суттєво знижується міцність на розтяг. Фосфор підвищує частку зв'язаного вуглецю, що спричиняє зростання твердості матеріалу. У рідкому залізі він розчиняється в певних межах, а в аустеніті за температури 950 °С — до 1,35%. Із підвищенням вмісту вуглецю розчинність фосфору зменшується, що описується залежністю: $P=1,35 - 0,2\%C$.

Якщо фактичний вміст фосфору перевищує граничну розчинність, він виділяється у структурі чавуну у вигляді фосфідної евтектики, твердість якої досягає HB 400...900. За умови її рівномірного розподілу у вигляді тонкої сітки, що формує замкнуті контури, така евтектика підвищує зносостійкість поверхні циліндра. Якщо ж її частинки сполучаються з основою недостатньо міцно, вони можуть вимиватися із поверхні тертя, створюючи ефект абразивного зносу пари циліндр—кільця.

Оптимальний вміст фосфору визначається за результатами моторно-стендових експериментів. Встановлено, що при використанні верхніх поршневих кілець з твердим хромовим покриттям оптимальна його кількість становить 0,25...0,35%. Разом з тим кільця з молібденовим покриттям не забезпечують сумісності по зносу з фосфоровмісними чавунами. У випадку підвищеного вмісту карбідоутворюючих елементів формується потрібна фосфідна евтектика (Fe_3P , Fe_3C , $Fe\gamma \rightarrow Fe\alpha$) з низькою температурою плавлення 930...960 °С, яка додатково знижує ймовірність адгезійного руйнування і утворює на поверхні мікрорельєф для утримання змащувального шару завдяки пористій капілярній структурі.

Недоліком фосфідної евтектики є її підвищена крихкість, яка може спричиняти руйнування бурту (фланця) циліндра, а також істотно ускладнювати механічну обробку: при розточуванні твердосплавним інструментом і хонінгуванні алмазними брусками евтектика розтріскується і

частково руйнується у поверхневих і підповерхневих шарах. Під час експлуатації двигуна в зонах реверсу поршневих кілець ці ослаблені ділянки інтенсивно вивільняються, що викликає різке збільшення абразивного зносу, особливо коли вміст фосфору перевищує 0,4%. Тому застосування силового різання для високофосфористих чавунів є недопустимим.

У процесі роботи двигуна, під дією теплових і механічних навантажень, а також агресивних продуктів згоряння та старіння масла, фосфідна евтектика поступово руйнується і вивільняється. На її місці формуються мікроканали і заглиблення, що з одного боку збільшують маслоємність поверхні тертя та покращують мастильний режим, але з іншого — знижують міцність металеві основи чавуну. Таким чином важливою є оптимізація кількості фосфору в складі чавуну, щоб забезпечити баланс між зносостійкістю і механічною надійністю робочої поверхні циліндра.

4.2 Розробка технології виготовлення та дослідження гільз циліндрів із перлітних чавунів

Наймасовіші двигуни вантажних автомобілів протягом тривалого часу оснащувалися циліндрами з аустенітними вставками. Попри їх високу задироту та зносостійкість, такі циліндри мають низку суттєвих технологічних і експлуатаційних недоліків. По-перше, вони потребують використання дорогих і дефіцитних легуючих елементів, передусім нікелю, міді та хрому. По-друге, виготовлення аустенітних вставок та їх подальша механічна обробка значно ускладнюють і здорожчують виробництво, оскільки вставка й корпус циліндра відливаються та обробляються як окремі деталі. По-третє, у процесі експлуатації виникають значні деформації поверхні через різницю в коефіцієнтах теплового розширення аустенітного чавуну та сірого перлітного чавуну СЧ-24, у який вставка запресовується. Це знижує геометричну стабільність поверхні та довговічність циліндра. Окрім цього, ремонтпридатність таких циліндрів значно нижча — їх розточування під ремонтний розмір ускладнене і часто недопустиме.

Під дією змінних теплових і механічних навантажень у зоні стику вставки з основним матеріалом циліндра формується зазор, що заповнюється нагаром. У результаті погіршується ущільнення надпоршневого простору, посилюється нерівномірність зношування вставки, збільшується прорив газів у картер, зростають витрати масла на вигорання та токсичність відпрацьованих газів. При надмірній овальності вставки формується сходинка, яка може спричиняти поломку кілець, пошкодження поршня та інтенсивне спрацювання поверхонь тертя.

Аналіз експлуатаційних властивостей свідчить, що заміна аустенітних вставок на монометалеві перлітні циліндри можлива лише за умови формування у перлітному чавуні відповідної структури, що забезпечує високу задиро- і зносостійкість. Це досягається оптимальним співвідношенням графіту, карбідів або фосфідної евтектики з карбідами, які повинні бути рівномірно розташовані по границях евтектичних комірок.

Таке структуроутворення забезпечували завдяки використанню явища мікроліквації — при евтектичній кристалізації графітоутворюючі елементи концентрувалися у центрі комірок, а карбідоутворюючі — на їх периферії, що сприяло вибіркового зміцненню меж зерен і покращенню протизносних властивостей. Для розширення можливостей регулювання структури застосовували графітизуюче модифікування, яке інтенсифікувало ріст пластин графіту та сприяло формуванню оптимальної мікроструктури.

Найефективнішими доступними легувальними елементами для отримання стабільного високодисперсного перліту і зміцнюючих фаз виявилися хром, мідь, ванадій, бор, фосфор, кремній та вуглець. Для встановлення їх оптимального співвідношення було використано методи математичного планування експерименту з визначенням верхніх і нижніх меж концентрацій елементів. На основі отриманих результатів були розроблені та виготовлені дослідні монометалеві перлітні циліндри для випробувань на двигунах із метою повної відмови від вставок.

- 1) $\frac{C}{3,0...4,0}; \frac{Si}{2,6...4,5}; \frac{Mn}{0,4...0,8}; \frac{Cr}{1,6...4,0}; \frac{V}{0,03...0,9}; \frac{Ti}{0,01...0,4};$ решта Fe;
- 2) $\frac{C}{3,1...3,8}; \frac{Si}{2,3...3,5}; \frac{Mn}{0,4...1,0}; \frac{Cr}{0,7...1,5}; \frac{Ni}{0,05...0,5}; \frac{Cu}{0,70...1,51}; \frac{V}{0,03...0,31};$ решта Fe;
- 3) $\frac{C}{3,3...3,6}; \frac{Si}{2,2...2,5}; \frac{Mn}{0,5...0,7}; \frac{Cr}{0,5...0,75}; \frac{Cu}{0,5...0,8}; \frac{P}{0,3...0,4}; \frac{B}{0,01...0,05}; \frac{Ti}{0,05...0,15};$
решта Fe;
- 4) $\frac{C}{3,0...4,0}; \frac{Si}{1,8...2,5}; \frac{Mn}{0,4...0,6}; \frac{Cr}{0,1...0,3}; \frac{V}{0,15...0,25}; \frac{Ti}{0,3...0,4};$ решта Fe.

На першому етапі досліджень було виготовлено і випробувано на двигуні дві партії монолітних циліндрів із перлітних чавунів з такими хімічними складами в %:

$$a) \frac{C}{3,0...4,0}; \frac{Si}{3,0...4,0}; \frac{Mn}{0,3...0,6}; \frac{Cr}{2,0...4,0};$$
 решта Fe.

Твердість HB 265...300. Структура: металічна основа – перліт зернистий і пластинчастий; зміцнююча фаза – евтектичні карбіди 5...10 об.%; графіт компактний.

$$б) \frac{C}{3,2...3,6}; \frac{Si}{3,6...4,5}; \frac{Mn}{0,4...0,7}; \frac{Cr}{1,7...2,5};$$
 решта Fe.

Твердість дослідних циліндрів становила HB 220...255, а їх мікроструктура характеризувалась тонкопластинчастим і пластинчастим перлітом у металічній основі, що забезпечувало високу стабільність при навантаженнях. Зміцнююча фаза була представлена дрібними евтектичними карбідами у кількості 5...8 об.% рівномірного розподілу, а графіт мав пластинчасту форму з оптимальною геометрією для утворення масляної плівки в процесі тертя.

Випробування таких дослідних циліндрів показали, що за задиростійкістю вони практично не поступаються серійним аналогам із вставками, однак мають значно вищу зносостійкість в 1,7...4,0 рази. Крім того, знос верхніх

компресійних кілець зменшився в 1,1...1,7 рази порівняно з базовими варіантами, що свідчить про ефективнішу взаємодію пари тертя «циліндр–поршневе кільце» та кращу стабільність мікропрофілю поверхні в умовах двигуна внутрішнього згорання.

Попри вагомні технічні переваги, впровадження таких перлітних чавунів у серійне виробництво на той час виявилось обмеженим. Основними перешкодами стали незадовільні ливарні властивості, зумовлені підвищеною усадкою металу під час кристалізації, що погіршувало заповнення форми та спричиняло внутрішні дефекти литва. Крім того, підвищена твердість та наявність зміцнюючих фаз у структурі призводили до зростання трудомісткості механічної обробки — зокрема, розточування та хонінгування, що істотно збільшувало собівартість виготовлення.

З урахуванням отриманих результатів було продовжено оптимізацію хімічного складу з метою підвищення технологічності без втрати триботехнічних властивостей. Коригування концентрації легуючих елементів дозволило розробити новий підхід до формування структури чавуну з покращеною придатністю до литва та обробки, що створило передумови для появи більш ефективного й економічно вигідного матеріалу для монометалевих циліндрів.

$$\frac{\text{C}}{3,3...3,6}; \frac{\text{Si}}{2,2...2,6}; \frac{\text{Mn}}{0,4...0,7}; \frac{\text{Cr}}{0,8...1,2}; \frac{\text{Cu}}{0,8...1,2}; \frac{\text{V}}{0,15...0,25}; \text{ решта Fe.}$$

Для відливки дослідної партії циліндрів був приготовлений чавун такого хімічного складу в %:

$$\frac{\text{C}}{3,3...3,5}; \frac{\text{Si}}{2,25...2,6}; \frac{\text{Mn}}{0,45...0,6}; \frac{\text{Cr}}{0,8...0,9}; \frac{\text{Cu}}{0,9...1,0}; \frac{\text{V}}{0,18...0,20}; \text{ решта Fe.}$$

Твердість дослідного чавуну становила HB 241...255. Його структура повністю відповідала заданим вимогам і формувалася дрібнопластинчастим та сорбітоподібним перлітом із наявністю зміцнюючої фази у вигляді карбідів у кількості 6...8 об.% та пластинчастим графітом довжиною 45...180 мкм у

кількості 8...10 об.%, що забезпечувало оптимальний баланс задиростійкості та зносостійкості. За механічними властивостями випробуваний чавун відповідав характеристикам матеріалу СЧ 24, при цьому кількість ливарного браку не перевищувала допустимих норм, що свідчить про достатньо високі технологічні властивості сплаву. Механічна обробка заготовок здійснювалася на серійному обладнанні лише з мінімальними змінами режимів різання та хонінгування, а робоча поверхня гільз оброблялась методом плосковершинного хонінгування з подальшим нанесенням припрацьовуючого покриття.

Основною метою випробувань було порівняння задиростійкості та абразивної зносостійкості дослідних монометалевих циліндрів з серійними циліндрами, оснащеними аустенітними вставками, на форсованому двигуні. Для цього у випробувальний двигун встановлювали по черзі у блок по чотири серійні та дослідні циліндри, комплектуючи їх однаковими серійними поршнями та поршневыми кільцями. За результатами випробувань на задиростійкість, проведених за стандартною заводською методикою, встановлено, що дослідні циліндри не поступаються серійним за стійкістю до мікрозчеплення і руйнування пари тертя на початкових етапах роботи двигуна. Після закінчення першого етапу випробувань виконувалося повторне мікрометрування деталей циліндро-поршневої групи для визначення початкових змін геометричних параметрів.

Другий етап випробувань передбачав визначення інтенсивності абразивного зношування в умовах навмисно ускладненої роботи двигуна: частота обертання колінчастого вала відповідала номінальній; на вал накладалося встановлене навантаження; температура охолоджувальної рідини та масла підтримувалася на рівні 80...90 °С; загальна тривалість становила 100 годин, під час яких у впускний трубопровід щогодини подавали по 2,3 г кварцового пилу. Після завершення циклу двигун розбирали для аналізу якості поверхонь тертя та вимірювання зношування циліндрів і поршневих кілець.

Огляд підтвердив, що за станом робочих поверхонь дослідні циліндри не відрізняються від серійних, але результати кількісних замірів продемонстрували

їхню підвищену довговічність. Швидкість зношування серійних гільз склала 2,08 мкм/год, тоді як для дослідних — 1,81 мкм/год, що свідчить про 13% приріст їх зносостійкості. Поршневі кільця також продемонстрували кращу роботу в дослідних циліндрах: зношування перших компресійних кілець зменшилося на 25%, других — на 26%, третіх — на 13%, а дисків маслознімних кілець — на 4%. Такі результати підтверджують перспективність використання монометалевих перлітних циліндрів як заміни конструкцій із аустенітними вставками без втрати ресурсу та надійності двигуна.

Таблиця 4.1 Середнє значення зносу поверхонь гільз циліндрів та поршневих кілець двигуна при випробуванні на абразивне зношування в результаті 100 годинного дослідження

Варіанти досліджуваних циліндрів	Середні циліндри із відповідною вставкою	Зразки досліджуваних циліндрів	Характер збільшення параметра зносостійкості в %
Деталь циліндро-поршневої групи			
Досліджувані циліндри, мкм	208	181	13
Перші компенсаційні кільця, мкм	1650	1237	25
Другі компенсаційні кільця, мкм	673	500	26
Треті компенсаційні кільця, мкм	897	780	13
Поверхні дисків маслознімних кілець, мкм	846	811	4

Таблиця 4.2 Величини зносу гільз циліндрів відносно площини їх максимального зносу, мкм

Серійні типи циліндрів				Дослідні типи циліндрів			
1	2	3	4	5	6	7	8
268	140	148	274	252	222	86	162

Після стендових випробувань проведено експлуатаційні випробування двигунів з дослідними і серійними циліндрами. Всі випробування підтвердили, що дослідні циліндри мають вищу зносостійкість від серійних. Знос поршневих кілець у дослідних циліндрах був не вищий, як у серійних циліндрах. На основі проведених випробувань дослідний чавун впроваджений у виробництво циліндрів для двигунів.

Для заміни біметалевих циліндрів із аустенітною вставкою на монометалеві в менш форсованих карбюраторних двигунах розроблено ряд перлітних чавунів, із яких найбільш технологічним і зносостійким виявився чавун такого хімічного складу:

$$\frac{\text{C}}{3,0...3,4}; \frac{\text{Si}}{2,0...2,5}; \frac{\text{Mn}}{0,5...0,7}; \frac{\text{Cr}}{0,3...0,5}; \frac{\text{Cu}}{0,4...0,6}; \frac{\text{P}}{0,25...0,4}; \frac{\text{B}}{0,03...0,05}; \frac{\text{Ti}}{0,05...0,15};$$

Fe

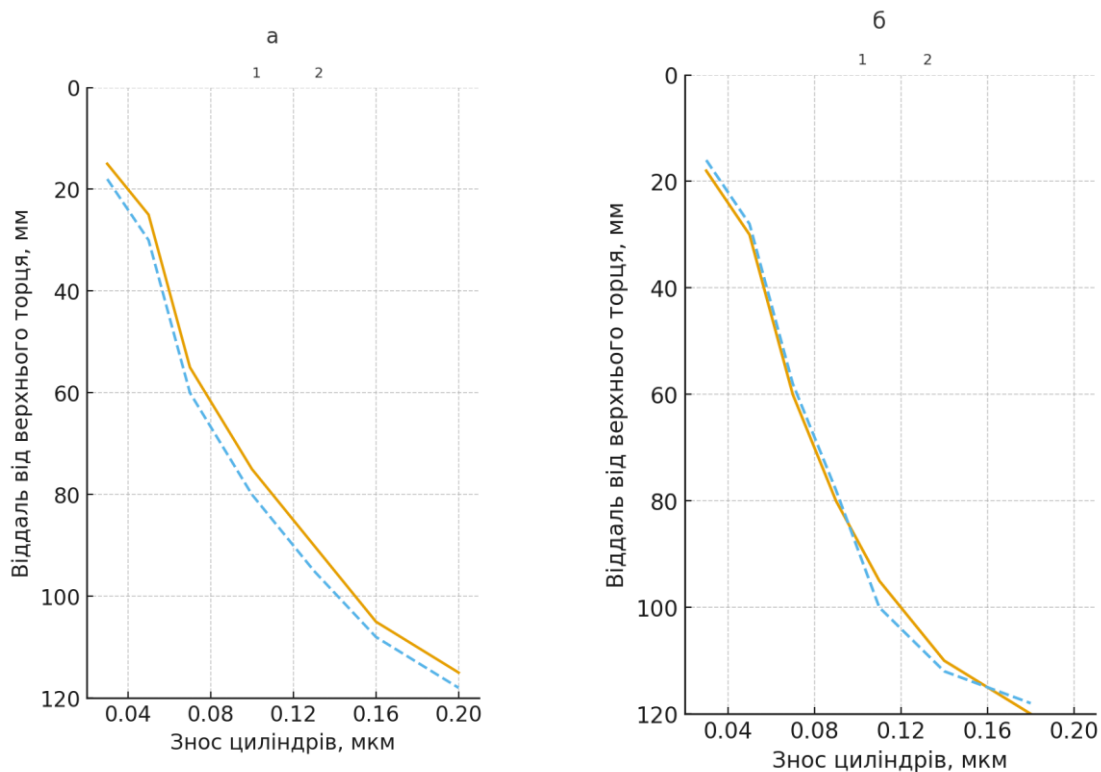


Рисунок 4.1 Характер впливу абразивного зношування на величину середнього зносу поверхонь гільз циліндрів двигуна автомобіля після 100 годинної експлуатації двигуна

а, б – відповідно в площинах, які перпендикулярні і паралельні відносно осі колінчастого вала; *1, 2* – серійні і дослідні типи циліндрів.

Структури чавуну: дрібнопластинчастий і сорбітоподібний перліт, зміцнений потрійною фосфідною евтектикою з включенням карбідів в кількості 6...8%; графіт пластинчастий рівномірного і нерівномірного розміщення розміром пластин 45...180 мкм в кількості 8...10%. Твердість чавуну НВ 217...241. За механічними властивостями дослідний чавун відповідає чавуну СЧ 21 і СЧ 24.

Було виготовлено дослідну партію циліндрів такого хімічного складу в %:

$\frac{C}{3,0...4,0}; \frac{Si}{1,8...2,5}; \frac{Mn}{0,4...0,6}; \frac{Cr}{0,1...0,3}; \frac{V}{0,15...0,25}; \frac{Ti}{0,3...0,4};$ решта Fe.

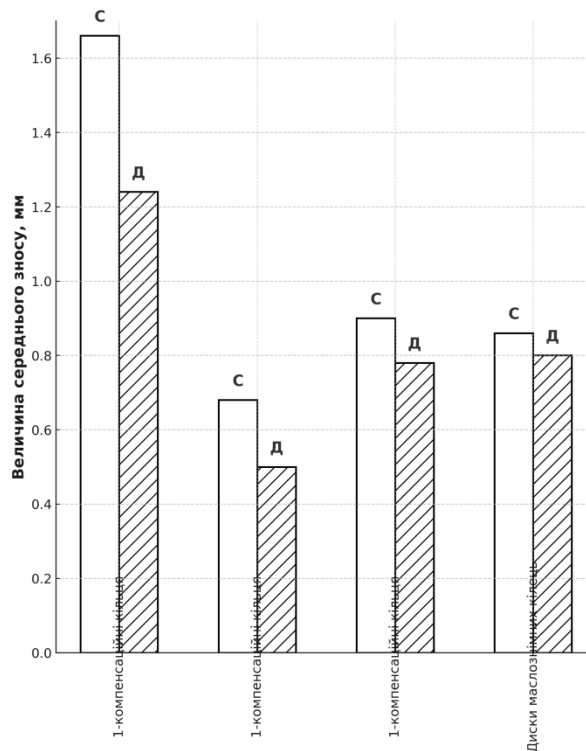


Рисунок 4.2 Вплив характеру абразивного зношування на значення середніх зносів поверхонь поршневих кілець по радіальній товщині після 100 годинної експлуатації двигуна:

С, Д – відповідно серійні і дослідні типи гільз циліндрів

Мікроструктура чавуну: дрібнопластинчастий і сорбітоподібний перліт, зміцнений карбідною евтектикою у вигляді розірваної сітки; графіт пластинчастий, завихрений, нерівномірно розподілений з довжиною пластин 25...90 мкм в кількості 8...10 об.%. Твердість чавуну HB 229...241. Механічні властивості відповідають чавуну СЧ 21 і СЧ 24. Результати випробувань показали, що по задиро- і зносостійкості дослідні циліндри значно кращі від серійних.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили теоретичні вимоги до структури перлітних чавунів для циліндрів карбюраторних двигунів, які по задиро- і зносостійкості не нижчі від серійних циліндрів із аустенітною

вставкою. Ці вимоги досягнуто завдяки науково обґрунтованому вибору структури чавуну, легуючих елементів у його хімічному складі, технології плавлення, модифікування і литва.

4.3 Шляхи підвищення параметрів зносостійкості негартованих гільз циліндрів

Для підвищення ресурсу і потужності дизелів сімейства Д-240 необхідно покращити задиро- і зносостійкість циліндрів, які виготовлялись із перлітного чавуну такого хімічного складу в %:

$$\frac{\text{C}}{3,1...3,4}; \frac{\text{Si}}{2,0...2,5}; \frac{\text{Mn}}{0,6...0,9}; \frac{\text{Cr}}{0,4...0,6}; \frac{\text{Cu}}{0,25...0,35}; \frac{\text{Ni}}{0,15...0,25}; \frac{\text{P}}{\text{до } 0,12}; \frac{\text{S}}{\text{до } 0,12};$$

$$\frac{\text{Cb}}{0,03...0,07}; \text{Fe} - \text{решта.}$$

Твердість HB 197...217. Структура: дрібнопластинчатий перліт, графіт пластинчатий нерівномірного розподілення з довжиною пластин 45...180 мкм в кількості 6...8 об.%. Для випробування на задиро- і зносостійкість було виготовлено циліндри з перлітних чавунів різних хімічних складів:

1. Хромокремнієвий чавун (ХКВ) в %:

$$\frac{\text{C}}{3,12}; \frac{\text{Si}}{3,5}; \frac{\text{Mn}}{0,8}; \frac{\text{Cr}}{2,1}; \frac{\text{Cu}}{0,75}; \frac{\text{Ni}}{0,2}; \frac{\text{V}}{0,12}; \frac{\text{P}}{0,10}; \text{Fe} - \text{решта.}$$

Твердість HB 244. Мікроструктура: металічна основа – тонкопластинчатий і сорбітоподібний перліт; зміцнююча фаза – евтектичні карбіди в кількості 8...10 об.%; графіт пластинчатий рівномірно і нерівномірно розміщений з довжиною пластин 45...180 мкм в кількості 8...10 об.%.
 2. Хромобористий чавун (ХКБ) в % :

$$\frac{\text{C}}{3,31}; \frac{\text{Si}}{2,65}; \frac{\text{Mn}}{0,9}; \frac{\text{Cr}}{0,91}; \frac{\text{Cu}}{0,71}; \frac{\text{Ni}}{0,33}; \frac{\text{B}}{0,06}; \text{Fe} - \text{решта.}$$

Твердість HB 220. Мікроструктура: металічна основа – тонкопластинчатий і сорбітоподібний перліт; зміцнююча фаза – евтектичні

карбіди в кількості 6...8 об.%; графіт тонкопластинчатий рівномірно і нерівномірно розміщений з довжиною пластин 45...180мкм в кількості 8...10 об.%.
3. Хромобористованадієвий чавун (ХКБВ) в %:

$$\frac{C}{3,2}; \frac{Si}{3,2}; \frac{Mn}{0,75}; \frac{Cr}{0,8}; \frac{Cu}{0,8}; \frac{Ni}{0,2}; \frac{B}{0,05}; \frac{V}{0,15}; Fe - \text{решта.}$$

Твердість дослідних циліндрів становила HB 250. Мікроструктура характеризувалася тонкопластинчастим та сорбітоподібним перлітом у металічній основі, наявністю дрібнозернистих евтектичних карбідів у кількості 8...10 об.% та пластинчастим графітом рівномірного і нерівномірного розміщення з довжиною пластин 45...180 мкм у кількості 8...10 об.%. Таке поєднання структурних складових забезпечувало високі показники міцності, зносостійкості та сприятливі умови для формування оптимального мікрорельєфу поверхні циліндрів у процесі припрацювання.

Дослідження задиростійкості проводилися на дизельному двигуні Д-240, який має стабільні техніко-економічні показники і широко застосовується як базовий об'єкт під час стендових випробувань. Двигун монтували на випробувальному стенді, оснащеному електробалансованою машиною типу САК-Н-670 і комплексом вимірювальних приладів у відповідності до чинних стандартів. При цьому у блоці гільзи чергувалися: два серійних та два дослідних циліндри; кожна гільза комплектувалася новими поршнями та поршневыми кільцями однакової конструкції.

Після складання двигун проходив заводську технологічну обкатку тривалістю 95 хвилин згідно з програмою-методикою підприємства-виробника, після чого виводився на режим номінальної потужності 75 к.с. при номінальній частоті обертання $n = \dots\dots\dots \text{хв}^{-1}$ та роботі протягом однієї години при температурі охолоджувальної рідини і масла $90 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Після завершення циклу обкатки виконували контроль техніко-економічних показників, розбирали двигун і здійснювали оцінку якості робочих поверхонь деталей циліндропоршневої групи.

Проведені візуальні та металографічні дослідження підтвердили, що дослідні циліндри пройшли припрацювання без пошкоджень, характерних для початкових режимів спрацювання. Мікросліди тертя мали значно меншу інтенсивність, ніж на серійних циліндрах: на поверхні дослідних гільз практично не спостерігалось мікрозчеплень із поршковими кільцями, а поздовжні риси були слабо вираженими, тоді як на серійних гільзах вони мали помітний характер. Таким чином, за показником задиростійкості дослідні циліндри продемонстрували покращені результати.

Після завершення першого етапу було проведено дослідження абразивної зносостійкості. Перед випробуваннями виконувалися точні вимірювання геометричних параметрів циліндрів і поршкових кілець згідно з мікрометричними картами, а також зважування кілець. Після проведення випробувального циклу виконували аналогічні вимірювання для визначення величини спрацювання.

Зібраний двигун повторно проходив технологічну обкатку за попередньою методикою, після чого проводили випробування на абразивний знос упродовж 80 годин згідно з програмою-методикою, наведеною в табл. 4.3. Після завершення циклу двигун розбирали для аналізу трибологічного стану поверхонь тертя та визначення показників зношування деталей циліндро-поршневої групи.

Таблиця 4.3 Основні силові режими експериментальних випробувань як дослідних та і серійних циліндрів і поршкових кілець на параметр зносостійкості

Режими роботи стенда	Тривалість експлуатації двигуна, хв	Тепловий режим експлуатації двигуна, °С			
		Холодний режим		Гарячий режим	
		вода	масло	вода	масло
Холості оберти; $n = 2300 \text{ хв}^{-1}$	10	25	25	85	85

Максимальне значення крутного моменту; $M_{кр} = 28 \text{ кгм}$, $n = 1800 \text{ хв}^{-1}$	10	30	30	90	90
Значення номінальної потужності; $N_{ном} = 55 \text{ кВт}$ при $n = 300 \text{ хв}^{-1}$	210	30	30	90	90

Тепловий режим роботи двигуна мінявся через кожні чотири години. Випробовування велося на пальному «Л» з добавкою 1% обкаточної присадки АЛП-4Д. Ця програма враховувала роботу двигуна при різних теплових і навантажених режимах в умовах абразивного зношування. Результати випробовувань показано в табл. 4.4. Видно, що дослідні циліндри в 1,14...2,67 раз мають вищу зносостійкість від серійних. Знос поршневих кілець в серійних і дослідних циліндрах був практично однаковий.

Таблиця 4.4 Результати дослідження зносостійкості, як дослідних, так і серійних гільз циліндрів, а також верхніх поршневих кілець після 80 годинного експериментального випробування з використанням пального «Л» і добавкою 1% присадки АЛП-4Д

Величина зносу поверхонь гільз циліндрів, мкм/год		Величина зносу верхніх поршневих кілець, г/год	
Серійні гільзи	Дослідні гільзи	Серійні гільзи	Дослідні гільзи
0,5	хромокремнієві-0,187	0,0185	0,02
1,0	хромобористі-0,875	0,0156	0,0153
0,625	хромобористованадієві-0,5	0,0103	0,0111

Для виявлення впливу абразивних частинок із оксиду алюмінію (Al_2O_3), які утворюються при згорянні пального з присадкою АЛП-4Д, на знос циліндрів і поршневих кілець проводились додаткові випробування двигуна Д-240 на номінальній потужності при температурі охолоджуючої рідини і масла $90 \pm 50^\circ\text{C}$ тривалістю 86 годин. При цьому використовувалося пальне без присадки АЛП-4Д.

Результати випробувань показали (табл. 4.5), що зносостійкість дослідних циліндрів в 1,05...1,23 рази вища, ніж серійних, а кілець в них 1,08...1,4 рази. Треба врахувати, що абсолютні значення цих зносів малі. Одержані результати показують, що абразивні продукти згорання присадки в пальному інтенсифікують знос циліндрів і поршневих кілець. Незважаючи на ці зміни у величині зносу циліндрів і поршневих кілець, зносостійкість дослідних циліндрів і кілець в них вища, ніж в серійних циліндрах.

Таблиця 4.5 Величини зносу дослідних і серійних гільз циліндрів, а також верхніх поршневих кілець після 86 годинної експлуатації з використанням пильного без присадки АЛП-4Д

Величини зносу поверхонь гільз циліндрів, мкм/год		Величини зносу верхніх поршневих кілець, г/год	
Серійні гільзи циліндрів	Дослідні гільзи циліндрів	Серійні гільзи циліндрів	Дослідні гільзи циліндрів
0,0546	хромокремнієві-0,0441	0,163	0,116
0,0546	хромобористі-0,0523	0,163	0,151
0,0546	хромобористованадієві-0,0465	0,163	0,139

4.4 Розробка технології виготовлення та дослідження негартованих гільз циліндрів для заміни гартованих гільз циліндрів

Серії сучасних дизельних двигунів — у стандартному виконанні комплектуються гартованими циліндрами. Такі гільзи ефективно забезпечують високу зносостійкість поршневих кілець в умовах інтенсивного абразивного спрацювання, що характерне для експлуатації на підвищених теплових і навантажувальних режимах. Водночас їх виготовлення пов'язане зі складнішою технологією обробки порівняно з негартованими циліндрами, що суттєво впливає на собівартість і виробничий цикл. Саме тому постала задача розробити оптимальні негартовані гільзи, які б за показником зносостійкості поршневих

кілець не поступалися гартованим аналогам.

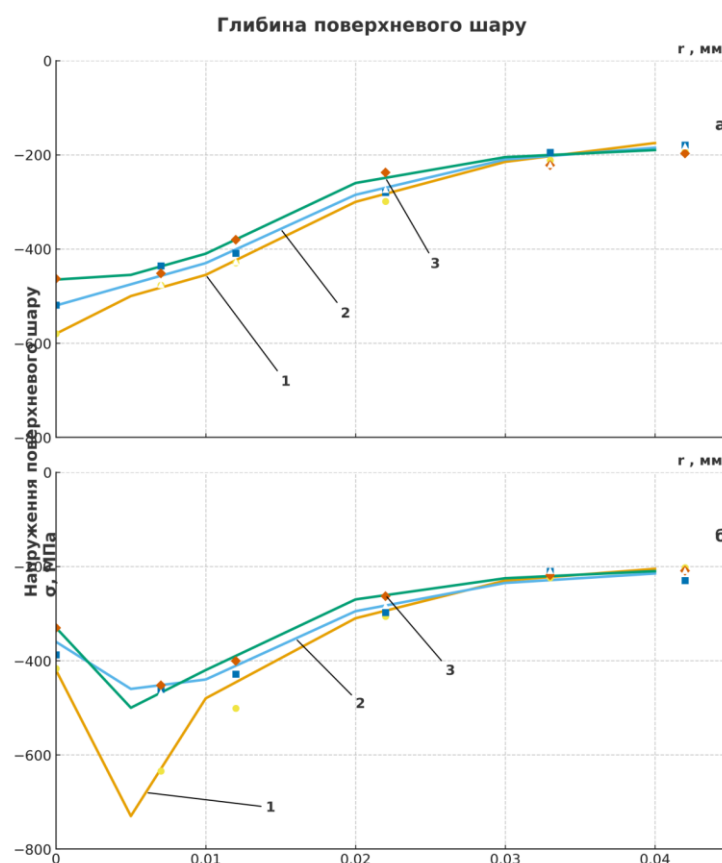
Для визначення чинників, що забезпечують високу довговічність пар тертя в гартованих циліндрах, виконано комплекс досліджень із випробуванням дизельних двигунів на різних рівнях форсування — від середнього ефективного тиску $P_e = 0,644$ МПа до $P_e = 1,23$ МПа. Аналізували вплив структури та твердості чавуну, ступеня форсування двигуна і характеру поверхневого зміцнення на знос циліндрів і поршневих кілець, як при контрольованому абразивному зношуванні, так і без подачі абразивних частинок у камеру згоряння.

У випробуваннях використовувалися циліндри із різними типами структур: перлітною твердістю HB 240...260, аустенітною з вмістом Mn 9,0...11% і твердістю HB 260...280, а також мартенситною структурою з твердістю HRC 42...45 та HRC 55...62. Для підвищення зносостійкості частина перлітних, аустенітних і мартенситних циліндрів додатково зміцнювалася методом механічного насичення поверхні надтвердими частинками карбіду кремнію та карбіду бору. У всіх варіантах двигуни комплектувалися верхніми компресійними кільцями з твердим полірованим хромовим покриттям.

Процес шаржування поверхневого шару здійснювався після формування плато поверхні шляхом модернізованого хонінгування, де робочою головкою з 12-ма твердосплавними підпружиненими брусками-притирами створювалися умови для вдавлювання абразивних частинок у поверхню циліндра (рис. 4.3). Головка одночасно виконувала обертовий рух зі швидкістю 160 хв^{-1} та зворотно-поступальний рух із частотою 40 подвійних ходів за хвилину; тиск притирання становив 0,8...1,2 МПа. Робоче середовище — абразивна суспензія, до складу якої входив карбід кремнію у концентрації 55...82%, карбід бору 3...10% з розміром зерна 60...80 мкм, а також спеціальне мінеральне масло 15...32%, яке забезпечувало стійку дисперсність частинок і запобігало їх осіданню.

В умовах навантаженого механічного контакту абразивні частинки проникали в підповерхневий шар гільзи та надійно там закріплювалися,

формуючи дисперсне армувальне середовище, здатне суттєво протистояти пластичним деформаціям при терті. Тривалість даної стадії обробки становила 120 с. Після припинення обертання головки та подачі суспензії здійснювали очищення поверхні протягом 30 секунд лише зворотно-поступальним рухом, що дозволяло видалити залишки суспензії та незакріплені частинки, зберігаючи необхідну концентрацію впроваджених зміцнювальних фрагментів металокерамічної природи.



Рисунку 4.3 Характер розподілу значень залишкових напружень в матеріалах поверхневих шарів гільз циліндрів для різних видів технологічних операцій (а) і після періоду повної обкатки дизельного двигуна (б):

1 – режим плосковершинного хонінгування; 2 – процес механохімічної обробки; 3 – процес хімічної обробки поверхні.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Розрахунок звукоізолюючої здатності дільниці

Визначити середню звукоізолюючу можливість дільниці, якщо рівень інтенсивності шуму досягає 110дБ, стіни боксу цегляні товщиною 53см, звукоізоляцію стелі приймаємо рівною звукоізоляції стін.

Середня звукоізоляція визначається за формулою:

$$R_{cp} = 231 \cdot \lg S_s - 9;$$

де S_s – значення поверхневої густини стін, для цегляної штукатуреної стіни товщиною 53см.

$$S_s = 950 \text{ кг/м}^3;$$

$$R_{cp} = 231 \cdot \lg 950 - 9 = 60 \text{ дБ}.$$

Середньо часова максимально допустима концентрація газових шкідливих складових в повітрі робочої зони не повинна перевищувати санітарно-технічних норм, мг/м^3 :

- окис вуглецю – 20;
- аерозолі свинцю - 0,01;
- окиси азоту – 5;
- альдегіди – 0,5;
- акролеїни – 0,7;

Загальна вентиляція, розраховується в залежності від розчину газових домішок до максимально допустимої концентрації. При цьому проточне повітря подається в кімнату розгалужено.

При розрахунку загально обмінної вентиляції кількість при точного повітря повинна бути достатньою для компенсації повітря видаленого місцевими підсосами.

5.2 Розрахунок заземлення дільниці

Захисне заземлення повинно відповідати вимогам електробезпеки ДСТУ 12.1030-81 ССБТ і ДСТУ 12.1.009-92. Захисному заземленню підлягають металеві неструмопровідні частини обладнання, які внаслідок несправності ізоляції можуть бути під напругою.

Захисне заземлення електроустановок необхідно застосовувати:

- при номінальній напрузі 380 В і вище змінного струму, а також 440В і вище постійного струму;
- при номінальній напрузі вище 42 В змінного струму і вище 110 В постійного струму тільки в приміщеннях з підвищеною небезпекою, особливо небезпечних і зовнішніх установках;
- при встановленні електрообладнання у вибухонебезпечних зонах.

Захисне заземлення застосовується:

- в електроустановках до 1кВ змінного струму з ізолюваною нейтраллю або з ізолюваним виводом джерела однофазного струму, а також в електроустановках постійного струму з ізолюваною середньою точкою;
- в електроустановках вище 1 кВ.

Мета розрахунку захисного заземлення – визначення основних параметрів заземлюючого пристрою.

Розрахунок проводиться для випадку розміщення заземлюючого пристрою в однорідній землі за допустимим опором розтікання струму заземлювача методом коефіцієнта використання заземлювачів.

5.3 Організація і порядок проведення робіт по знезараженню на об'єкті

Забезпечення безпеки людей і здійснення заходів по дезактивації і дезинфекції – складна задача, успішне вирішення якої можливе при умові організованого використання завчасно підготовлених сил і технічних засобів.

Всі заходи по захисту населення від засобів масового ураження в тому

числі і заходів по знезараженню і ліквідації інших можливих наслідків нападу противника, організовують і проводять керівники (начальники цивільної оборони) підприємств.

Для проведення рятувальних і відновлювальних робіт в осередках масового ураження на об'єкті створюється формування цивільної оборони. Для цього на об'єкті створюються ланки знезараження, санітарно-обшивочні пункти, станції знезараження техніки, станції знезараження одягу.

Для контролю за якістю проведення робіт по знезараженню крім штатних сил і засобів можуть залучатися різні хімічні лабораторії (об'єктів, учбових, науково-дослідницьких інститутів та інших установ), які завчасно в мирний час по планах штатів цивільної оборони забезпечуються всіма необхідними пристроями і реактивами. Проведення робіт по знезараженню можна умовно поділити на три етапи.

До робіт першого етапу відносяться роботи, що виконуються в індивідуальному порядку кожною людиною з метою знезараження уражених ділянок: тіла, одягу, взуття, особистого інструменту і оснащення. Ці роботи повинні усунути або максимально знизити небезпеку ураження людей і дати можливість продовжувати роботу або виконувати поставлені завдання.

Роботи другого етапу здійснюються особистим складом формувань цивільної оборони під керівництвом спеціалістів і проводиться в окремих ділянках і в тих заражених об'єктах, які представляють найбільшу небезпеку для людей.

Роботи третього етапу виконуються спеціальними формуваннями (частинами) з допомогою табельних технічних засобів і передбачають забезпечення повної дезактивації, дегазації і дезінфікації території споруд і будівель.

Подібна постановка загальні принципи знезараження повністю правильні. В реальних умовах підготовка, визначення об'єктів і послідовність проведення робіт по дезактивації, дегазації і дезінфікації повинні бути ґрунтовані на всебічному аналізі обставин з обов'язковим обліком можливості досягнення

головної цілі – своєчасного забезпечення рятівних і аварійно-відновлюваних робіт, що підлягають виконанню у першу чергу.

Організація і послідовність проведення робіт:

1. Знезаражені території, проїздів і проходів, необхідних для проведення рятівних робіт, надання допомоги потерпілим, а також вивезення або виведення працівників, службовців і населення із небезпечних регіонів.

2. Знезараження ділянок місцевості і споруд для забезпечення успішної роботи формувань цивільної оборони і в першу чергу тих, які зайняті виконанням термінових аварійно-відновлювальних заходів, гасіння пожеж і надання медичної допомоги людям.

3. Знезараження території і обладнання найбільш важливих ділянок, транспорту і зв'язку, а також території продовольчих і матеріальних сховищ джерел водопостачання і під'їзних шляхів до них.

4. Знезараження будівель, обладнання і майна адміністративних установ, відповідні роботи у житловому секторі.

Одночасно з послідовним проведенням вказаних заходів завжди проводиться знезараження машин і матеріальної частини формувань цивільної оборони, що приймали участь в роботах в зараженому регіоні індивідуальних засобів захисту працюючих людей та санітарна обробка особистого складу. Крім того, після виведення або вивезення населення із осередків ураження у випадку необхідності приймають міри по знезараженню одягу і санітарної обробки.

У випадку одночасного ураження радіоактивними і отруйними речовинами і бактеріальними засобами порядок і послідовність проведення способів знезараження наступні. Спочатку проводять дегазацію, яка одночасно виконує деякі функції дезінфікації і частково дезактивацію, а потім по мірі необхідності після дозиметричного контролю повну дезактивацію.

Дезактивації, дегазації і дезінфікації підлягають тільки обмежені і найбільш важливі ділянки території об'єкту.

Дезактивацію території можна проводити декількома способами.

Змиванням радіоактивних речовин водою проводять при дезактивації площ, вулиць і доріг з твердим покриттям. Цей спосіб найбільш зручний. Дезактивацію змиванням можна проводити поливно-миючими і пожежними машинами, мотопомпами, іншими засобами, що дозволяють оброблювати заражені поверхні направленим струменем води під тиском. Повнота дезактивації при цьому головним чином залежить від тиску водяного струменя. Чим більші витрати і вищий тиск під яким викидається струмінь води тим швидше і надійніше вилучаються радіоактивні речовини.

Зрізання і вилучення зараженого шару ґрунту (снігу) призводять до дезактивації ділянок місцевості і доріг без твердого покриття.

Оскільки процес зрізання зараженого ґрунту або снігу трудомісткий, то знезаражувати великі ділянки таким способом недоцільно. Застосовують цей спосіб при устрої поїздів і проходів. Ґрунт зрізають на глибину 5...10 см, втоптаний сніг – 6 см, рихлий сніг – до 20 см. Після цього заражений ґрунт або сніг викидають вбік. При цьому для зниження рівня радіації у 5 разів ширина полоски, що дезактивується повинна складати 35 м, а для зниження рівня радіації у 10 разів – 90 м.

Роботи по зрізання і вилученню зараженого шару можна з успіхом виконувати за допомогою бульдозерів, скреперів, грейдерів та інш. Найбільші ділянки доріг і проходів можна також дезактивувати в ручну лопатами.

Переорювання або перекопування ґрунту на ділянках місцевості обмежених розмірів без твердого покриття проводять наступним чином. Верхній заражений шар ґрунту товщиною 20см піднімають і перевертають зараженою стороною вниз для того, щоб закопати радіоактивні речовини і ізолювати їх нижнім незараженим шаром землі. Переорюють тракторами з плугами, а перекопують лопатами на невеликих ділянках і тільки у випадку крайньої необхідності, засипку (ізоляцію) зараженої поверхні шаром незараженого ґрунту або матеріалу проводять для проходів і поїздів. При цьому із землі, піску, щебеню та інших незаражених речовин створюють щільний шар ізолюючого матеріалу рекомендується зволожувати водою. Незаражені

матеріали підвозять на автомашинах самоскидах і деяких видах землерийних та інших машинах.

Вилучення радіоактивних речовин вимітанням застосовують тільки для дезактивації твердих і відносно гладких поверхонь. Цю операцію здійснюють підметально-прибиральними машинами та вручну (мітлами, віниками). Такий спосіб не можна широко застосовувати, оскільки радіоактивні речовини вилучаються не повністю і при цьому створюється велика кількість пилу. Основні способи дезинфекції та дегазації території – хімічні і механічні. На ізольованих і віддалених ділянках не в заселених місцях заражену територію можна залишити для природної дегазації і дезінфікації, при якій отруйні речовини або бактеріологічні засоби розпадаються і знищуються в результаті впливу сонячної радіації, вологи та інших метеорологічних факторів.

При дегазації і дезінфікації території застосовують наступні хімічні засоби.

Дегазацію і дезінфікацію поливанням дегазуючими речовинами виконують авторозливними станціями, поливно-миючими машинами рівномірно розбризкуючи дегазуючі розчини.

Для дегазації площ, вуличних покриттів, доріг і ділянок місцевості заражених отруйними речовинами типу іприт і 2-х в'язкими рецептурами, використовують водні суспензії хлорного вапна і дегазуючих засобів при температурі не нижче +50С. Якщо територія заражена отруйними речовинами типу зарін, то крім водної суспензії, хлорною ванною і дегазуючих засобів при температурі -50С і вище застосовують 10% і водні розчини їдкого натрію (калію), сірчаного натрію і 10 – 12% - го розчину аміаку, а при температурі нижче -50С для ділянок місцевості без снігового покриву, або з вкратим снігом 20 – 25% аміачну воду.

Для дезактивації території застосовують в основному аналогічні розчини. Для руйнування токсинів найбільш ефективні розчини лугів і сірчаного натрію.

При дегазації території необхідно враховувати, що суспензії і розчини забезпечують головним чином поверхневу дегазацію, тобто розчиняють тільки

ті отруйні речовини, які знаходяться на зовнішніх шарах поверхні, що обробляються, а отруйні речовини, що потрапили у глибинні шари повному знешкодженню не підлягають.

Тому, безпосередньо після закінчення дегазації вилучається лише небезпека ураження людей краплерідинними отруйними речовинами в той час, як небезпека ураження парами отруйних речовин, що сподіваються, внаслідок випаровування частини отруйних речовин, що поглинулися зберігається ще на протязі 1...2 год, а інколи і більше. Тому знаходитись в той час на продегазованій території без протигаза не рекомендується.

Дегазацію розсіванням сипучих дегазуючих речовин виконують на автомашинах обладнаних пристроями ПДП – 53, сільськогосподарських розкидачів типу РПТМ – 2,0, піскорозкидувачами, самоскидах, а на території малих розмірів вручну (лопатами). Для дегазації території і ділянок місцевості заражених отруйними речовинами (ОР) типу іприт та їх в'язкими рецептурами в якості основних дегазуючих речовин при температурі не нижче 5 0С застосовують хлорне вапно і ДТС ГК.

ВИСНОВКИ

Проведений детальний огляд технічної та патентної літератури по проблемі підвищення надійності та зносостійкості автомобільних двигунів підтвердив актуальність вибраного напрямку дослідження та правильність сформульованих основних задач для досягнення поставленої мети. В якості об'єктів дослідження вибрано деталі циліндро-поршневої групи двигуна автомобіля, ефективність експлуатації яких зумовлює загальну надійність та довговічність двигуна та автомобіля в цілому.

Співставивши по технологічних можливостях, та проаналізувавши їх переваги та недоліки запропоновано шляхи підвищення основних параметрів задиро- та зносостійкості робочих поверхонь гільз циліндрів, які в подальшому підтвердили свою ефективність. Комплексний характер вирішення даної проблеми включав в себе вибір матеріалів для гільз циліндрів та поршневих кілець, методів нанесення відповідних покриттів на їх поверхні, способів формоутворення поверхонь методом механічної обробки.

Приведена детальна інформація по характеристиках методів плосковершинного та рівновершинного хонінгування із аналізом масло ємності утворених поверхонь, структурного стану матеріалів поверхневих шарів. Підібрано конструкції високопродуктивних хонінгувальних головок, матеріалів абразивних брусків, режимів обробки. Одержано дані по впливу даних методів обробки на задиро- та зносостійкість робочих поверхонь гільз циліндрів.

Лабораторні дослідження зносостійкості запропонованих марок чавунів для гільз циліндрів проводилися по спеціальній методиці на машині тертя СМЦ-2 і підтвердили раніше одержані результати стендових досліджень двигунів при виготовленні деталей циліндро-поршневої групи із даного чавуну.

Як показали результати впровадження у виробництво триботехнологій нанесення припрацьовуючого покриття на робочі поверхні гільз циліндрів скорочують тривалість періоду технологічної обкатки двигунів у 1,5 рази із підвищенням періоду задиростійкості гільз циліндрів в 1,5-4,0 рази і зносостійкості 1,5-2 рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткаченко І. Г., Левкович М. Г. Конспект лекцій з дисципліни «Надійність транспортних засобів». Тернопіль : ТНТУ, 2024. 118 с.
2. Aulin, V., Lyashuk, O., Gupka, A., Tson, O., Dmitro, M., Sokol, M., ... & Yarema, I. (2024). Tribodiagnosis of the surface damage of tribo-coupling parts materials during machine operation. *Procedia Structural Integrity*, 59, 428-435.
3. Lyashuk O., Gupka A., Pyndus Y., Gupka V., Sipravska M., Stashkiv M. (2019) The tribology of the car: Research methodology and evaluation criteria. *Proceedings of ICCPT 2019 (Tern., May 28-29, 2019)*, pp. 231-237.
4. Дембіцький В. М., Павлюк В. І., Придюк В. М. Технічна експлуатація автомобілів : навчальний посібник. Луцьк : Луцький НТУ, 2018. 473 с.
5. Чабанний В. Я. (упор.). Ремонт автомобілів : навчальний посібник. Кіровоград : Кіровоградська районна друкарня, 2007. 720 с.
6. Кукурудзяк Я. М. Технічна експлуатація автомобілів. Технологія обслуговування : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2023. 241 с.
7. Огневий В. Ф., Фалько Ю. М., Блажко Д. О., Кіпенко Д. О., Березюк О. С. Сучасні технологічні процеси ремонту транспортних засобів : навчальний посібник. Харків : Форт, 2024. 290 с.
8. Технічний сервіс автомобілів та проєктування авторемонтних підприємств : методичні рекомендації до лабораторних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» / О. П. Бабак, О. В. Диха, А. А. Вичавка. Хмельницький : ХНУ, 2024. 26
9. Гевко І. Б., Ляшук О. Л. Технікоєкономічне обґрунтування інженерних рішень : навч. посіб. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 264 с.
10. Красота О. В., Верьовкіна О. В., Шатковський О. П., Панасенко М. О. Технологічне обладнання для обслуговування та ремонту автомобілів : навч. посіб. Київ : Видавничий дім «Слово», 2023. 208 с.

11. Тригуб О. В. Технологічне обладнання для обслуговування та ремонту автомобілів : навч. посіб. Черкаси : ЧДТУ, 2021. 187 с.
12. Домущі Д. П., Мельник О. В. Ремонт тракторів і автомобілів : навчальний посібник. Одеса : Одеський державний аграрний університет, 2020. 252 с.
12. Прокопович І. В. Металознавство : навчальний посібник. Одеса : Екологія, 2020. 308 с.
13. Вакуленко І. О. Теорія та практика термічної обробки : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт. Кам'янське : ДДТУ, 2024. 75 с.
14. Хоменко О. М., Бережний В. М. Діагностика та контроль технічного стану транспортних засобів. Вінниця : ВНТУ, 2021. 254 с.
15. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. частина «Цивільна безпека»» / автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.
16. Lyashuk, O., Gypka, A., Maiak, M., Mironov, D., & Levkovych, M. (2025). Methodology for the Investigation and Evaluation Criteria of Oxidation-Metal Plating Processes During Friction and Wear. Key Engineering Materials, 1035, 15-26.