

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
мехатроніки і робототехніки**
Кафедра автомобілів і транспортних технологій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
освітнього ступеня
Магістр

Галузь знань 27 – «Транспорт»
Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»

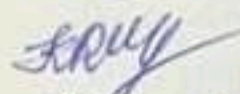
Тема: «Відновлення ефективності дискових гальм легкового
автомобіля при виконанні робіт з проточного ремонту »

Виконав:



ст. групи ААГ-22М Дмитро СВІРСЬКИЙ

Керівник:



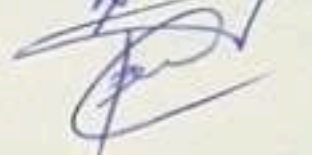
к.т.н., доц. Руслана КОЛОДНИЦЬКА

Завідувач кафедри:



к.т.н., доц. Олександр МЕЛЬНИК

Рецензент:



к.т.н. доц. Володимир ШИТЛЯКІВСЬКИЙ

Житомир 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки

Кафедра: механічної інженерії та автомобільного транспорту

Освітній ступінь: «Магістр»

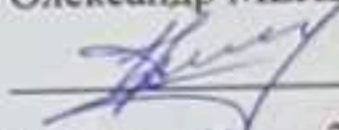
Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 274 – Автомобільний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри МІ та АТ

Олександр МЕЛЬНИК


« 06 » 10 2025р.

ЗАВДАННЯ

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня магістр

Свірського Дмитра Олегович

1. Тема роботи: «Відновлення ефективності дискових гальм легкового автомобіля при виконанні робіт з проточного ремонту» затверджена наказом вищого навчального закладу від 06 жовтня 2025р. №569-с.

2. Керівник роботи: к.т.н., доц. Руслана КОЛОДНИЦЬКА

3. Строк подання студентом завершеної роботи: 27.12.2025 р.

4. Вихідні дані до роботи: нормативно-правова документація; дані, що зібрано під час проходження переддипломної практики; власні розробки та пропозиції.

Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ, постановка задач роботи.

1. Сучасні технології ремонту дискових гальм.

2. Робота гальмівної системи автомобіля.

3. Особливості і технологія виконання робіт з проточного ремонту гальмівних дисків.

4. Економічне обґрунтування доцільності проточного ремонту гальмівних дисків.

5. Пояснювально - роздавальний матеріал (презентація) 13 слайдів

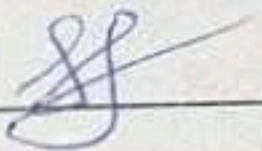
Загальні висновки. Список використаних джерел.

Дата видачі завдання « 06 » 10 2025 р.

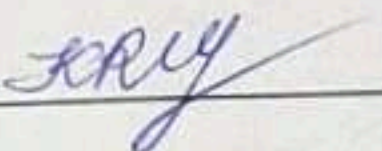
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	РОЗДІЛ 1. Сучасні технології ремонту дискових гальм	15.09.2025	виконано
2.	РОЗДІЛ 2. Робота гальмівної системи легкового автомобіля	20.10.2025	виконано
3.	РОЗДІЛ 3. Особливості і технологія виконання робіт з проточного ремонту гальмівних дисків	17.11.2025	виконано
4.	РОЗДІЛ 4. Економічне обґрунтування доцільності проточного ремонту гальмівних дисків	25.11.2025	виконано
5.	Оформлення роботи	06.12.2025	виконано
6.	Рецензування	19.12.2025	виконано
7.	Захист роботи	26.12.2025	виконано

Студент

 Дмитро СВІРСЬКИЙ

Керівник роботи

 Руслана КОЛОДНИЦЬКА

ЗМІСТ

Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ ДИСКОВИХ ГАЛЬМ.....	9
1.1. Загальні відомості про дискові гальма.....	9
1.1.1 Тенденції розвитку конструкцій дискових гальм.....	9
1.2. Типові несправності та причини зносу дискових гальм.....	11
1.2.1 Вплив дефектів диска на безпеку руху.....	11
1.3. Сучасні технології відновлення гальмівних дисків.....	12
1.4. Нові матеріали та інноваційні рішення.....	17
1.4.1 Порівняльний аналіз технологій ремонту гальмівних дисків.....	18
1.5. Висновки до першого розділу.....	19
РОЗДІЛ 2. РОБОТА ГАЛЬМІВНОЇ СИСТЕМИ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ.....	20
2.1. Призначення та принцип дії гальмівної системи.....	20
2.1.1 Фізичні основи процесу гальмування.....	21
2.1.2 Тепловий баланс у дискових гальмах під час гальмування.....	22
2.1.3 Основні компоненти гальмівної системи легкового автомобіля.....	23
2.2. Конструкція та робочі процеси дискових гальм.....	25
2.2.1 Розрахунок гальмівного шляху.....	26
2.2.2 Радіус тертя та вплив контактної площі.....	27
2.3. Вплив технічного стану гальмівних елементів на ефективність гальмування.....	28
2.3.1 Вплив DTV та осьового биття диска на роботу гальм.....	28
2.4. Показники ефективності гальмівної системи та методи їх визначення...	29
2.5 Висновки до другого розділу.....	32
РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ І ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОНАННЯ РОБІТ З ПРОТОЧНОГО РЕМОНТУ ГАЛЬМІВНИХ ДИСКІВ.....	33
3.1. Загальні положення та значення проточного ремонту.....	33
3.2. Умови та вимоги до виконання робіт.....	34
3.3. Конструктивні та матеріальні особливості гальмівних дисків.....	35
3.4. Типові дефекти гальмівних дисків і критерії відновлення.....	36
3.5. Технологічний процес проточного ремонту.....	37

3.6. Обладнання та інструмент для виконання проточного ремонту.....	41
3.7. Розрахунок ефективності гальмування після виконання проточного ремонту.....	42
3.8. Контроль якості та перевірка геометричних параметрів.....	43
3.9. Техніка безпеки та екологічні вимоги.....	44
3.10. Фізико-механічні основи роботи гальмівного диска.....	45
3.11. Трибологічні аспекти взаємодії робочих поверхонь.....	46
3.12. Аналіз дефектів гальмівних дисків за класифікаціями SAE та ДСТУ.....	47
3.13. Технологічне обґрунтування режимів різання при проточуванні.....	47
3.14. Розрахунок теплового навантаження диска після ремонту.....	48
3.15. Похибки обробки та точнісні параметри відновленого диска.....	49
3.16. Наукове обґрунтування доцільності проточного ремонту.....	49
3.17 Висновки до третього розділу.....	50
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПРОТОЧНОГО РЕМОНТУ ГАЛЬМІВНИХ ДИСКІВ.....	52
4.1. Мета та завдання економічного розрахунку.....	52
4.2. Вихідні дані для аналізу.....	52
4.3. Розрахунок вартості проточного ремонту	53
4.4. Порівняння з вартістю заміни гальмівних дисків.....	54
4.5. Економічний ефект і доцільність застосування технології.....	55
4.6 Висновки до четвертого розділу.....	56
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

ВСТУП

Розвиток автомобільного транспорту супроводжується постійним зростанням вимог до надійності та безпеки експлуатації транспортних засобів. Особливу роль у забезпеченні активної безпеки відіграє гальмівна система, від технічного стану якої безпосередньо залежить керованість автомобіля, стабільність руху та можливість своєчасної зупинки в аварійних ситуаціях.

Безпека дорожнього руху безпосередньо залежить від технічного стану гальмівної системи легкових автомобілів, яка відіграє ключову роль у забезпеченні керованості та стабільності транспортного засобу в різних дорожніх умовах. Сучасні автомобілі експлуатуються в умовах інтенсивних навантажень, змінних температурних режимів та агресивного навколишнього середовища, що призводить до прискореного зношування елементів гальмівних механізмів, зокрема гальмівних дисків.

Порушення геометрії робочої поверхні дисків у процесі експлуатації спричиняє зниження коефіцієнта тертя, появу вібрацій при гальмуванні, збільшення гальмівного шляху та нерівномірний розподіл зусиль між колесами. Такі процеси негативно впливають на надійність гальмівної системи та створюють потенційну загрозу для безпеки руху.

Традиційним способом усунення зазначених дефектів є заміна гальмівного диска на новий, однак такий підхід супроводжується значними матеріальними витратами та не завжди є технічно обґрунтованим, особливо у випадках, коли знос не перевищує гранично допустимих значень. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають технології відновлення працездатності гальмівних дисків шляхом проточного ремонту, який дозволяє відновити геометричну точність, покращити стан робочої поверхні та продовжити термін служби вузла без необхідності повної заміни.

Крім того, сучасні тенденції розвитку автомобільної техніки спрямовані на зниження експлуатаційних витрат, підвищення ресурсу агрегатів та раціональне використання матеріальних ресурсів. У цьому контексті проточування гальмівних дисків відповідає принципам технічної доцільності та економічної ефективності.

Отже, дослідження процесів відновлення ефективності дискових гальм при виконанні робіт з проточного ремонту є актуальним з огляду на необхідність підвищення безпеки експлуатації легкових автомобілів, зменшення витрат на технічне обслуговування та впровадження сучасних технологій ремонту в практику автосервісних підприємств.

Актуальність теми також обумовлена необхідністю узгодження сучасних ремонтних технологій з вимогами міжнародних стандартів безпеки та технічними регламентами щодо експлуатаційних параметрів гальмівних механізмів. У цьому контексті особливої значущості набувають дослідження, спрямовані на наукове обґрунтування доцільності проточного ремонту, оцінку його впливу на теплові процеси, контактну взаємодію та довговічність гальмівних дисків.

Метою кваліфікаційної магістерської роботи є дослідження процесів зниження ефективності дискових гальм у процесі експлуатації легкового автомобіля та обґрунтування доцільності застосування проточного ремонту як способу відновлення їх працездатності, а також розробка технічно обґрунтованих рекомендацій щодо виконання операцій з проточування гальмівних дисків з урахуванням вимог безпеки та економічної ефективності.

Об'єктом дослідження у магістерській кваліфікаційній роботі є гальмівна система легкового автомобіля в умовах експлуатації та ремонту.

Предметом дослідження є процеси збільшення ефективності дискових гальм та технологія їх відновлення шляхом проточного ремонту.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі задачі:

1. Проаналізувати призначення, конструкцію та принцип дії гальмівних систем легкових автомобілів.
2. Дослідити фізичні процеси, що відбуваються під час гальмування, та їх вплив на технічний стан гальмівних дисків.
3. Визначити основні причини зниження ефективності дискових гальм у процесі експлуатації.
4. Провести аналіз типових дефектів гальмівних дисків, які виникають в умовах реальної експлуатації.
5. Обґрунтувати доцільність застосування проточного ремонту як способу відновлення працездатності дискових гальм.
6. Розглянути технологічні особливості виконання операцій з проточування гальмівних дисків.
7. Провести економічну оцінку доцільності виконання проточного ремонту порівняно з повною заміною гальмівних дисків.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ ДИСКОВИХ ГАЛЬМ

1.1. Загальні відомості про дискові гальма

Дискові гальмівні механізми є одним із ключових елементів системи активної безпеки автомобіля. Їх основним завданням є забезпечення ефективного уповільнення або повної зупинки транспортного засобу за рахунок перетворення кінетичної енергії руху в теплову енергію тертя.

У сучасному автомобілебудуванні дискові гальма витіснили барабанні завдяки кращій тепловіддачі, стабільності характеристик, простоті обслуговування та вищій ефективності при тривалому гальмуванні.

Конструктивне дискове гальмо складається з гальмівного диска, супорта, колодок із фрикційними накладками та системи приводу. Під час натискання на педаль гальма робоча рідина у гідравлічному контурі створює тиск, який переміщує поршні супорта. Колодки стискають диск, створюючи силу тертя, що перетворює кінетичну енергію у тепло. Ефективність роботи дискових гальм визначається не лише матеріалами фрикційних пар, а й точністю геометричних параметрів, станом поверхонь тертя та рівномірністю розподілу тиску.

У сучасних автомобілях дискові гальма широко застосовуються як на передній, так і на задній осі. Використовуються різні типи дисків — суцільні, вентильовані, перфоровані, з насічками тощо. Кожен тип має свої переваги щодо тепловідведення, маси та стійкості до деформацій.

1.1.1 Тенденції розвитку конструкцій дискових гальм

Сучасні тенденції розвитку дискових гальм спрямовані на підвищення термічної стійкості, зменшення маси та оптимізацію процесів тепловідведення. Основні інженерні зусилля зосереджені на вдосконаленні конструкції вентиляційних каналів, виборі сплавів із високими теплофізичними

характеристиками та розробці робочих поверхонь зі спеціальною мікрогеометрією для стабілізації коефіцієнта тертя.

Одним із перспективних напрямів є використання багат шарових дисків, у яких робоча частина виконується з термостійкого сплаву, а внутрішня структура — з легших матеріалів із високою теплопровідністю. Така конструкція забезпечує ефективніше відведення тепла та зменшення інерційних навантажень на підвіску й рульове керування. Поряд із цим активно розвиваються двокомпонентні диски з алюмінієвими маточинами, які з'єднуються з чавунною або сталеву робочою поверхнею за допомогою плаваючих з'єднань.

Покращення теплового режиму досягається також шляхом застосування спрямованої вентиляції, яка створює контрольований повітряний потік усередині диска. Це дозволяє зменшити перегрів та підвищити стабільність роботи гальмівної системи при тривалих навантаженнях. Водночас упровадження перфорованих та слотованих поверхонь зменшує імовірність утворення газових прошарків між колодкою і диском, сприяє очищенню фрикційної поверхні від продуктів зносу та покращує ефективність гальмування.

Використання композитних матеріалів і керамічних покриттів дозволяє значною мірою знизити швидкість зношування та підвищити опірність термічним деформаціям. Такі рішення забезпечують стабільні гальмівні характеристики в широкому температурному діапазоні, що особливо важливо для автомобілів із високими динамічними навантаженнями.

Розвиток електронних систем керування гальмуванням (ABS, ESP, EBD) суттєво підвищує вимоги до геометричної стабільності диска. Навіть мінімальні відхилення в товщині або битті диска можуть спричинити помилки в роботі електронних модулів керування. У зв'язку з цим зростає значення не лише точності виготовлення, а й якості ремонтно-відновлювальних операцій.

Зростання маси автомобілів, розвиток електромобілів та підвищення швидкісних характеристик призводять до значного збільшення теплових навантажень на гальмівну систему. Особливої актуальності набуває інтеграція механічних гальмівних вузлів із системами рекуперації, де дискові гальма

працюють переважно в режимах пікових перевантажень. За таких умов стандартні конструктивні рішення поступово замінюються адаптивними системами охолодження та матеріалами нового покоління.

1.2. Типові несправності та причини зносу дискових гальм

Під час експлуатації автомобіля елементи дискових гальм піддаються значним термічним і механічним навантаженням, що призводить до поступового зносу й виникнення дефектів. Найпоширенішими несправностями є:

1. нерівномірне зношування робочої поверхні гальмівного диска;
2. поява тріщин і перегрівів (так званих “синіх зон”);
3. деформація диска внаслідок термічного удару;
4. зношування фрикційних накладок і порушення паралельності колодок;
5. корозійне руйнування робочих поверхонь.

Причини цих дефектів полягають у тривалому перегріві, використанні неякісних матеріалів, нерівномірності тиску поршнів супорта, заклинюванні направляючих або неправильному монтажі колодок. Зношений диск спричиняє вібрації, зниження ефективності гальмування, збільшення гальмівного шляху та погіршення безпеки руху.

Для своєчасного виявлення несправностей необхідно проводити періодичну діагностику — вимірювання товщини дисків, биття, візуальний контроль стану фрикційних накладок і супорта.

1.2.1 Зношування гальмівних дисків та зменшення їх товщини

Для більшості легкових моделей Renault (Logan, Sandero, Clio, Megane) характерне інтенсивне зношування передніх гальмівних дисків, що зумовлено перерозподілом гальмівних зусиль на передню вісь. (до 70–75%).

Характерні ознаки зношування:

- зменшення товщини диска нижче допустимого значення (MIN TH);

- утворення бурта по краю;
- зниження рівномірності поверхні.



Рис 1.2.1 утворення бурту по краю, зниження рівномірності поверхні, зменшення товщини диска.

Вплив на ходові характеристики:

Зменшення товщини диска призводить до зниження його теплової ємності, що викликає швидкий перегрів під час інтенсивного або багаторазового гальмування. Це негативно позначається на стабільності гальмівних процесів і плавності руху автомобіля.

Вплив на безпеку руху:

Зношений диск знижує ефективність гальмування, збільшує гальмівний шлях та погіршує керуваність автомобіля в аварійних ситуаціях.

1.2.2 Нерівномірний знос робочої поверхні

Нерівномірний знос виникає внаслідок неправильного притискання гальмівних колодок або несправностей супорта.

Основні причини:

- заклинювання напрямних супорта;
- перекіс колодок;
- нерівномірний розподіл гальмівних зусиль.



Рис. 1.2.2 Гальмівний диск Renault Clio заклинювання напрямних супорта; перекіс колодок; нерівномірний розподіл гальмівних зусиль.

Неправильне встановлення гальмівних колодок також може спричинити нерівномірне зношування дисків. Якщо колодки встановлені з перекосом або не щільно прилягають до диска, це може призвести до того, що диск стиратиметься нерівномірно. Після встановлені колодок потрібно Переконатися, що колодки правильно встановлені та відповідають специфікаціям транспортного засобу.

Вплив на ходові характеристики:

Нерівномірний знос призводить до виникнення паразитних гальмівних моментів, що викликає вібрації та нестабільність руху автомобіля.

Вплив на безпеку руху:

Автомобіль може відводити вбік під час гальмування, що особливо небезпечно при русі на високих швидкостях або на слизькому покритті.

1.2.3 Термічна деформація гальмівних дисків

Термічна деформація виникає внаслідок перегріву гальмівного диска та нерівномірного розподілу температури по його поверхні.

Ознаки термічної деформації:

- биття гальмівного диска;
- вібрація керма;
- пульсація педалі гальм.

Вплив на ходові характеристики:

Деформований диск погіршує плавність руху, викликає коливання підвіски та знижує комфорт керування автомобілем.

Вплив на безпеку руху:

Зменшується ефективність екстреного гальмування, зростає ризик втрати курсової стійкості.

1.2.4 Перегрів та термічні пошкодження

Перегрів гальмівних дисків призводить до зміни фізико-механічних властивостей матеріалу. Одна з найчастіших проблем, з якими стикаються автомобілісти, — перегрів гальмівних дисків. Вона виникає через надмірне тертя колодок об поверхню компонентів під час інтенсивного або тривалого гальмування. У результаті температура деталей може перевищити допустимі 600–800°C Це призводить до різкого зниження ефективності гальмування, появи тріщини і деформації дисків.

Крім того, перегрів може бути наслідком таких факторів:

- знос гальмівних колодок;
- заклинювання супортів або поршнів;

несправності анти блокувальної системи (ABS);
часте використання гальм під час руху вгору;
агресивна манера водіння з різкими гальмуваннями;
буксирування причепа або перевантаження автомобіля;
низька якість комплектуючих;
порушення регулювання механізму стоянкового гальма;
неправильна експлуатація та недостатнє обслуговування гальмівної системи.

Для перегрітих дисків характерні запах гару під час гальмування, вібрація керма та педалі гальма, сторонні шуми, відсутність ефективного уповільнення. Візуально на деталях видно сліди корозії, кольору мінливості, викривлення.

Ознаки перегріву:

- поява термічних плям;
- зміна кольору поверхні;
- зниження коефіцієнта тертя.



Рис.1.2.3 Перегрітий гальмівний диск Renault logan

Вплив на ходові характеристики:

Автомобіль втрачає плавність уповільнення, можливі ривки та нестабільна робота гальм.

Вплив на безпеку руху:

Може виникати ефект "згасання гальм", що значно збільшує гальмівний шлях і

створює аварійні ситуації.

1.2.5 Тріщини гальмівного диска

Тріщини є критичним видом пошкоджень і повністю виключають подальшу експлуатацію диска. Це найбільш небезпечний вид пошкоджень, оскільки вони свідчать про перевищення допустимих теплових або механічних навантажень та призводять до різкого зниження міцності деталі. Утворення тріщин є наслідком дії комплексу взаємопов'язаних факторів.

Причини виникнення:

Основною причиною появи тріщини є різка зміна температури гальмівного диска. Під час інтенсивного гальмування диск нагрівається до 500–700°C; потраплянні води (калюжі, дощ, мийка) відбувається миттєве охолодження; в наслідок чого утворюється (термо шок) виникають великі термічні напруження, що перевищують межу міцності матеріалу.



Рис.1.2.4 Диски з тріщинами Renault Sandero

Результат:

утворення мікротріщин, які з часом переростають у видимі тріщини.

Перегрів змінює структуру чавуну, знижує його термостійкість та сприяє появі тріщини.

Критичне зменшення товщини диска

Зношені або надмірно проточені гальмівні диски мають знижену жорсткість.

Наслідки:

- диск швидше нагрівається;
- зростає температурний градієнт;
- зменшується здатність диска розсіювати тепло.

Це значно підвищує ймовірність утворення тріщин.

Нерівномірний розподіл температури

Локальний перегрів окремих ділянок диска спричиняє виникнення внутрішніх напружень.

Причини:

- нерівномірний притиск колодок;
- використання колодок низької якості;
- забруднення робочої поверхні.

У таких умовах тріщини зазвичай мають радіальний характер.

Конструктивні особливості вентиляційних дисків

У вентилязованих гальмівних дисках тріщини часто виникають у зоні вентиляційних каналів.

Причина:

концентрація напружень у місцях зміни геометрії та ослаблення перерізу матеріалу.

Механічні перевантаження

Тріщини можуть з'являтися внаслідок ударних навантажень.

Приклади:

- різке гальмування на нерівній дорозі;
- наїзд на бордюри;
- аварійні ситуації.

Такі навантаження викликають мікротріщини, які з часом розвиваються.

Порушення правил експлуатації та обслуговування

Неправильне технічне обслуговування суттєво прискорює появу тріщини.

Типові помилки:

- неправильне затягування колісних болтів;
- встановлення невідповідних колодок;

- ігнорування мінімальної товщини диска.

Вплив на ходові характеристики:

Порушується баланс колеса, виникають ударні навантаження та сторонні шуми.

Вплив на безпеку руху:

Існує високий ризик руйнування диска під час гальмування, що може призвести до повної втрати гальмівної здатності.

1.2.6 Корозійні пошкодження

Корозія виникає під впливом вологи, солей та агресивних реагентів, також при довгому простої автомобіля без руху. Корозія на гальмівних дисках погіршує гальмування, викликаючи ривки, збільшуючи гальмівний шлях в створюючи шум, особливо якщо іржа товста або в сукупності з брудом та сіллю (взимку), що може деформувати диск, призводити до вібрації педалі гальм та зниження загальної безпеки.

Легкий шар іржі зникає після першого гальмування, але глибока корозія потребує очищення, проточки або заміни диска для відновлення ефективності гальм.



Рис.1.2.5 Іржа на робочій поверхні диска Renault Megane

Вплив на ходові характеристики:

Підвищується рівень шуму та вібрацій, знижується комфорт руху.

Вплив на безпеку руху:

Нерівномірне гальмування негативно впливає на стабільність автомобіля, та на його безпеку руху в цілому.

1.2.7 Механічні пошкодження гальмівних дисків

Механічні пошкодження гальмівних дисків належать до дефектів, що виникають унаслідок безпосереднього фізичного впливу на робочу поверхню або конструкцію диска. На відміну від термічних пошкоджень, механічні дефекти формуються переважно через порушення нормальної роботи вузла «гальмівний диск – гальмівна колодка» або потрапляння сторонніх тіл у зону тертя.

Потрапляння сторонніх частинок у зону тертя

Однією з основних причин механічних пошкоджень є потрапляння твердих частинок між гальмівною колодкою та диском.

Джерела сторонніх частинок:

- дорожній пісок, гравій, металеві частинки;
- залишки зруйнованого фрикційного шару колодки;
- продукти корозії супорта або диска.

Тверді вclusions діють як абразив, що спричиняє локальне врізання в поверхню диска. У процесі гальмування ці частинки переміщуються разом з колодкою, утворюючи раковини і подряпини.

Утворення подряпин і раковин на робочій поверхні

Подряпини та борозни є найбільш поширеним видом механічних пошкоджень.

Характеристика дефекту:

- поздовжні або кільцеві канавки;
- нерівна поверхня контакту;
- локальне зменшення товщини диска.

Наслідки:

Порушується рівномірність контакту колодки з диском, що призводить до зниження ефективності гальмування та прискореного зношування фрикційних елементів.

Пошкодження внаслідок руйнування гальмівних колодок

При значному зношуванні або дефекті гальмівних колодок можливе оголення металевої основи.

Причини:

- несвоєчасна заміна колодок;
- використання неякісних фрикційних матеріалів;
- перегрів колодок.

Металева основа колодки безпосередньо контактує з диском, викликаючи глибокі подряпини та локальні деформації поверхні.

Локальні вм'ятини та відколи

Механічні удари можуть призводити до появи локальних пошкоджень на поверхні диска.

Джерела ударів:

- наїзд на тверді перешкоди;
- потрапляння великих каменів;
- неправильний демонтаж або монтаж колеса.

Наслідки:

Утворення концентраторів напружень, які згодом можуть сприяти появі тріщин.

Порушення геометрії гальмівного диска

Механічні навантаження можуть викликати не лише поверхневі, а й об'ємні деформації.

Прояви:

- локальне викривлення;
- збільшення осьового биття;
- нерівномірний знос колодок.

Вплив:

Порушується балансування колеса та стабільність гальмування.

Наслідки механічних пошкоджень для роботи гальмівної системи

Механічні дефекти безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики автомобіля.

Основні наслідки:

- зростання шуму та вібрацій при гальмуванні;
- нерівномірне уповільнення;

- підвищене тепловиділення в зоні контакту.

Вплив механічних пошкоджень на безпеку руху

Наявність механічних пошкоджень гальмівних дисків негативно впливає на активну безпеку автомобіля.

Основні ризики:

- збільшення гальмівного шляху;
- нестабільна робота систем ABS та ESP;
- зниження курсової стійкості при екстреному гальмуванні.

Вплив на ходові характеристики:

Зростає опір коченню та виникають вібрації.

Вплив на безпеку руху:

Зменшується ефективна площа контакту, що призводить до погіршення гальмування.

1.2.1 Вплив дефектів диска на безпеку руху

Деформації гальмівних дисків безпосередньо впливають на стабільність гальмування та керованість автомобіля. Навіть незначні відхилення в товщині або порушення осьового положення спричиняють зміну фактичного контакту між фрикційними поверхнями, що викликає коливання гальмівної сили. У реальних умовах це проявляється пульсаціями педалі гальма, биттям кермового колеса та загальним погіршенням плавності уповільнення автомобіля.

Нерівномірне прилягання колодки до диска призводить до утворення зон локального перегріву. У цих ділянках відбувається різке зростання температури, що спричиняє термічне перевантаження матеріалу диска. За таких умов активізуються процеси термічного старіння, знижується межа міцності та виникають залишкові напруження, які прискорюють пошкодження структури металу.

Тривалий вплив підвищених температур може спричинити зміни мікроструктури чавуну, включаючи зону перегартування або появу крихких фаз.

Це створює передумови для виникнення мікротріщин, які надалі можуть розвиватися у макродефекти та призводити до часткового або повного руйнування гальмівного диска. Особливо небезпечними є тріщини радіального або кільцевого характеру, оскільки вони значно послаблюють конструктивну цілісність деталі.

Окрім механічних наслідків, наявність дефектів негативно впливає на ефективність гальмівної системи в цілому. Подовжується гальмівний шлях, зростає час реакції транспортного засобу на натискання педалі гальма, а також знижується здатність до екстреного зупинення в аварійних ситуаціях. У складних дорожніх умовах це збільшує ймовірність втрати керованості та виникнення дорожньо-транспортних пригод.

Особливої небезпеки деформовані диски становлять під час руху на високих швидкостях, коли динамічні навантаження на гальмівну систему суттєво зростають. В умовах інтенсивного гальмування навіть незначні дефекти можуть викликати різке падіння коефіцієнта тертя та неконтрольовану зміну траєкторії руху.

1.3. Існуючі методи ремонту гальмівних дисків

Гальмівні диски в процесі експлуатації зазнають інтенсивних теплових, механічних і фрикційних навантажень, що призводить до появи різних видів зносу та дефектів. Вибір методу ремонту залежить від характеру пошкоджень, ступеня зносу, конструктивних особливостей диска та вимог безпеки.

Існуючі методи ремонту гальмівних дисків та їх характеристика

№	Метод ремонту	Суть методу	Усувані дефекти	Переваги	Недоліки	Вплив на безпеку руху
1	Проточування зі зняттям гальмівного диска	Механічна обробка диска на стаціонарному токарному верстаті після демонтажу	Хвилястість, осьове биття, нерівномірний знос	Висока точність обробки, контроль параметрів різання	Не враховує похибки маточини, підвищена трудомісткість	Забезпечує відновлення ефективності гальмування, але можливе залишкове биття
2	Проточування без зняття диска (на автомобілі)	Обробка мобільним верстатом, встановленим безпосередньо на маточину	Сумарне биття «маточина–диск», вібрації, нерівний знос	Висока точність у реальних умовах, скорочення часу ремонту	Обмежена глибина обробки, неможливість усунення тріщин	Значно підвищує стабільність гальмування та зменшує гальмівний шлях
3	Шліфування гальмівних дисків	Абразивна фінішна обробка поверхні	Підвищена шорсткість, поверхневі дефекти	Мінімальне знімання матеріалу, швидкість виконання	Не усуває геометричних деформацій	Покращує початковий контакт колодок, але не вирішує серйозних дефектів
4	Термічне відновлення	Контрольований нагрів і охолодження для зняття напружень	Залишкові термічні напруження	Потенційне вирівнювання структури матеріалу	Високий ризик зміни властивостей чавуну, складність контролю	Обмежене застосування, нестабільні результати
5	Відновлення наплавленням	Наплавлення металу з подальшою механічною обробкою	Теоретично – значний знос	Можливість відновлення геометрії	Порушення теплових властивостей, зниження міцності	Не рекомендований для легкових авто через ризик руйнування
6	Комбіновані методи ремонту	Поєднання кількох технологій (проточування, шліфування, заміна колодок)	Комплексні дефекти	Підвищена ефективність та контроль якості	Потребує більше часу та обладнання	Забезпечує оптимальний баланс між ефективністю та безпекою
7	Заміна гальмівного диска	Повна заміна несправного диска на новий	Тріщини, мінімальна товщина, критичні деформації	Максимальна надійність	Вища вартість	Найвищий рівень безпеки руху

1.4. Нові матеріали та інноваційні рішення

Окрім удосконалення технологій ремонту, суттєва увага у сучасному автомобілебудуванні приділяється підвищенню довговічності гальмівних дисків шляхом застосування нових матеріалів та модернізованих конструкцій. У виробництві сучасних дисків широко використовуються леговані чавуни з високим вмістом хрому, молібдену та нікелю, що забезпечують підвищену стійкість до термічних навантажень і корозійних процесів. Такі матеріали значно зменшують ймовірність утворення тріщин під час інтенсивного гальмування та подовжують міжремонтний інтервал.

Перспективним напрямом є застосування сталевих сплавів із поверхневими зміцнюючими покриттями, зокрема нітридуванням та карбонізацією. Ці методи дозволяють створити надміцний поверхневий шар, стійкий до стирання, без погіршення в'язкісних властивостей серцевини диска. У результаті підвищується зносостійкість робочої поверхні та зменшується швидкість втрати товщини диска при експлуатації.

Вуглецево-керамічні гальмівні диски є прикладом використання композитних матеріалів нового покоління. Їх основними перевагами є значно менша маса, висока термостійкість і майже повна відсутність деформацій при різких температурних перепадах. Завдяки цьому забезпечується стабільна робота гальм навіть за умов спортивної або інтенсивної міської експлуатації. Незважаючи на складність ремонту таких дисків, сучасні методи локального відновлення – зокрема лазерне напилення та дифузійне відновлення структури матеріалу – дозволяють усувати поверхневі ушкодження без необхідності заміни всього елемента.

Важливим досягненням у сфері вдосконалення гальмівних систем є інтеграція розумних датчиків, які здійснюють постійний моніторинг стану диска в реальному часі. Такі системи аналізують температуру, швидкість зносу, наявність вібрацій та перевантажень, а отримані дані передаються до електронного блоку керування. Це дозволяє прогнозувати залишковий ресурс диска та своєчасно планувати ремонтні роботи, уникаючи аварійних ситуацій.

Крім того, активно розвивається напрям використання захисних антикорозійних покриттів із високою адгезією, які перешкоджають утворенню іржі на не робочих поверхнях дисків. Це особливо актуально для автомобілів, що експлуатуються в умовах підвищеної вологості або в зимовий період із застосуванням дорожніх реагентів.

Таким чином, застосування новітніх матеріалів та інноваційних діагностичних рішень дозволяє не лише подовжити строк служби гальмівних дисків, а й підвищити рівень безпеки експлуатації автомобіля, знизити витрати на обслуговування та забезпечити стабільні гальмівні характеристики впродовж усього життєвого циклу деталі.

1.4.1 Порівняльний аналіз технологій ремонту гальмівних дисків

Сучасні технології відновлення гальмівних дисків можна умовно поділити на такі групи:

- механічні (проточування, шліфування);
- термічні (плазмова обробка, наплавлення);
- комбіновані (відновлення шару з наступною механічною обробкою).

Найбільш доступною технологією в умовах приватних майстерень є проточування, яке не потребує складного обладнання та може бути виконане без демонтажу диска з маточини.

Порівняно з повною заміною диска, проточування дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати та відновити геометричні параметри без порушення конструкції вузла. При правильному виборі режимів обробки та контролі мінімальної допустимої товщини деталі ця технологія є безпечною та економічно обґрунтованою.

У той же час термічні методи потребують висококваліфікованого персоналу та контролю структури матеріалу після обробки, що обмежує їх застосування у масовому сервісному обслуговуванні.

ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

Проведений аналіз сучасних технологій ремонту гальмівних дисків свідчить, що традиційна заміна деталей не є єдиним ефективним шляхом забезпечення працездатності гальмівної системи. Сучасні методи відновлення дозволяють відновлювати геометричні параметри, зменшувати площу дефектів та подовжувати ресурс деталі.

Особливу практичну цінність має механічне проточування як доступний і технологічно доцільний метод, адаптований до умов автосервісних підприємств. Однак, ефективність такого ремонту залежить від параметрів обробки, стану матеріалу та теплового режиму в процесі експлуатації.

Це зумовлює необхідність поглибленого аналізу фізико-механічних процесів, що відбуваються під час гальмування, та обґрунтовує актуальність подальших досліджень, наведених у наступних розділах.

РОЗДІЛ 2

РОБОТА ГАЛЬМІВНОЇ СИСТЕМИ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

2.1. Призначення та принцип дії гальмівної системи

Гальмівна система є однією з найважливіших складових активної безпеки автомобіля. Її основне призначення полягає у створенні штучного опору рухові транспортного засобу шляхом перетворення кінетичної енергії у тепло за допомогою сил тертя. Саме від ефективності гальм залежить можливість своєчасного зупинення автомобіля, утримання його на схилі, а також стабільність під час руху.

Гальмівна система виконує три основні функції:

робоче гальмування — забезпечує контрольоване уповільнення руху або повну зупинку;

стоянчне гальмування — утримує автомобіль у нерухомому стані;

допоміжне (екстрене) гальмування — використовується при відмові основного приводу.

Принцип дії гальмівної системи базується на гідравлічному або електромеханічному передаванні зусилля від водія до гальмівних механізмів коліс. У більшості сучасних легкових автомобілів застосовується гідравлічний привід, у якому натискання на педаль створює тиск у головному гальмівному циліндрі. Робоча рідина передає цей тиск через трубопроводи до колісних циліндрів або супортів, де він перетворюється у механічну силу, що притискає гальмівні колодки до поверхні диска. Утворюється сила тертя, яка уповільнює обертання колеса і, відповідно, рух автомобіля.

Ефективність гальмівної системи залежить від низки факторів: передаточного відношення педального механізму, площі робочих циліндрів, стану гальмівної рідини, коефіцієнта тертя між колодками і диском, а також від рівномірності розподілу зусиль між колесами. Надмірна різниця у тиску або нерівномірність

спрацьовування призводить до втрати курсової стійкості та збільшення гальмівного шляху.

Сучасні гальмівні системи оснащуються додатковими електронними системами — ABS (антиблокувальна), EBD (розподіл гальмівних зусиль), ESP(стабілізація руху). Їхнє призначення полягає у забезпеченні максимальної ефективності гальмування без втрати керованості автомобілем, особливо під час екстрених ситуацій або на слизьких дорогах.

2.1.1 Фізичні основи процесу гальмування

Процес гальмування легкового автомобіля ґрунтується на перетворенні механічної енергії руху в теплову внаслідок сил тертя між гальмівними колодками та диском. Кінетична енергія автомобіля визначається виразом:

$$E_k = \frac{mV^2}{2} , \quad (2.1)$$

де:

m – маса автомобіля, кг

V – швидкість руху, м/с.

Гальмівна сила, що створюється на одній осі, визначається за формулою:

$$F_r = \frac{M}{r} , \quad (2.2)$$

де:

M – гальмівний момент, Н · м

r – ефективний радіус диска, м.

Гальмівний момент формується за рахунок сили тертя:

$$M = \mu \cdot F_n \cdot r, \quad (2.3)$$

де:

μ – коефіцієнт тертя

F_n – сила притискання колодок.

Таким чином, ефективність гальмування безпосередньо залежить від геометрії диска, стабільності коефіцієнта тертя та величини притискної сили.

2.1.2 Тепловий баланс у дискових гальмах під час гальмування

Під час гальмування практично вся кінетична енергія транспортного засобу переходить у теплову, яка виділяється в зоні тертя «колодка–диск». Кількість теплоти, що виникає за одне гальмування, може бути оцінена за енергетичним балансом:

$$Q = \frac{mv^2}{2}, \quad (2.4)$$

де:

m – маса автомобіля, кг

v – початкова швидкість руху, м/с

Частина цієї енергії акумулюється гальмівним диском, що призводить до підвищення його температури:

$$\Delta T = \frac{Q \cdot \eta}{m_d \cdot c}, \quad (2.5)$$

де:

η – частка теплоти, що переходить у диск

m_d – маса диска, кг

c – питома теплоємність матеріалу (для чавуну $c = 460$ Дж/(кг · °С))

Нерівномірний температурний розподіл по радіусу та товщині зумовлює виникнення термічних напружень, які можуть спричиняти короблення диска та утворення мікротріщин. Це безпосередньо впливає на стабільність гальмівного моменту та спричиняє биття педалі при гальмуванні.

2.1.3 Основні компоненти гальмівної системи легкового автомобіля

Гальмівна система сучасного легкового автомобіля є багатокomпонентною інженерною системою, призначеною для зменшення швидкості руху, повної зупинки транспортного засобу та утримання його у нерухомому стані. Вона поєднує в собі механічні, гідравлічні та електронні елементи, робота яких координується в реальному часі.

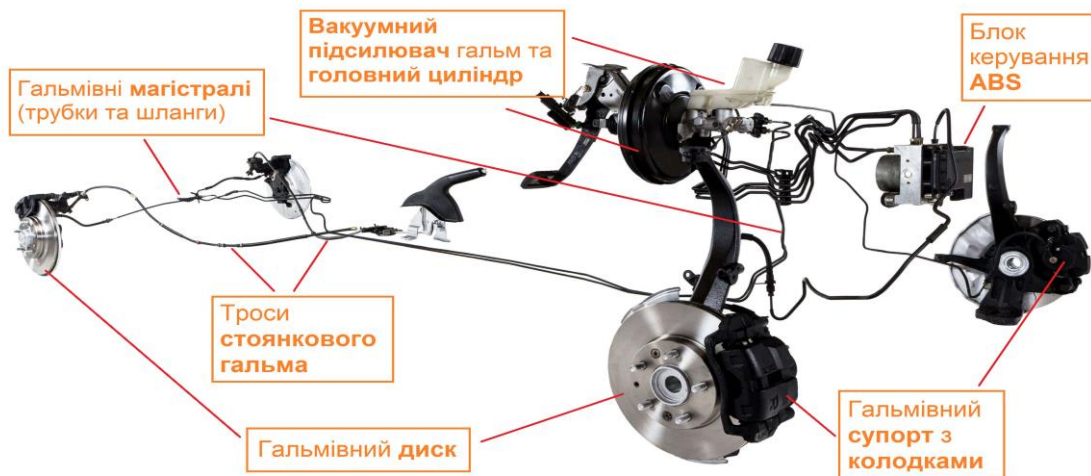


Рис 2.1. Основні компоненти гальмівної системи

До складу гальмівної системи входять такі основні функціональні вузли.

Педальний механізм

Служить засобом передавання керуючого зусилля від водія до гальмівного приводу. Конструкція педального вузла забезпечує початковий механічний виграш сили, що дозволяє формувати необхідний тиск у гальмівній системі.

Підсилювач гальм

У переважній більшості легкових автомобілів застосовується вакуумний підсилювач, робота якого ґрунтується на різниці тисків між впускним колектором і атмосферою. У сучасних автомобілях з електрифікованими силовими установками використовуються електровакуумні або електричні підсилювачі, які забезпечують незалежність роботи гальмівної системи від режимів роботи двигуна.

Головний гальмівний циліндр

Перетворює механічне зусилля від педалі у гідравлічний тиск, який передається трубопроводами до колісних механізмів. Як правило, циліндр має двоконтурну будову, що дозволяє зберігати часткову працездатність системи у випадку відмови одного з контурів.

Гальмівна рідина

Виконує функцію передавання тиску до виконавчих механізмів. До неї висувуються підвищені вимоги щодо температури кипіння, в'язкості та стійкості до старіння. Наявність повітря або вологи в системі знижує ефективність гальмування та може спричиняти провали педалі.

Трубопроводи та гнучкі шланги

Металеві трубки забезпечують герметичність та міцність системи, тоді як гнучкі шланги компенсують переміщення елементів підвіски та кермового керування.

Колісні гальмівні механізми

Саме в них безпосередньо реалізується перетворення енергії руху в теплову. До їх складу входять гальмівні диски, фрикційні колодки, супорти з поршнями та ущільнюючі елементи. Взаємодія цих складових визначає ефективність гальмівного процесу та довговічність вузлів.

Електронні системи керування гальмуванням

Антиблокувальна система (ABS), система розподілу гальмівних сил (EBD) і система курсової стабілізації (ESP) забезпечують оптимізацію гальмівного моменту залежно від дорожніх умов, навантаження та режиму руху автомобіля.

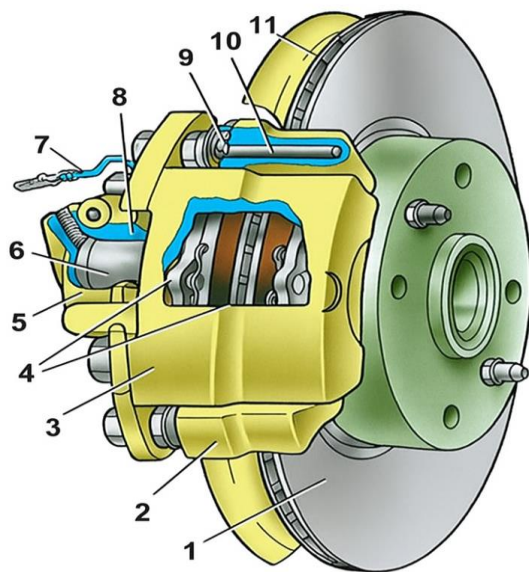
Стоянкове гальмо

Призначене для фіксації транспортного засобу в нерухомому стані. У сучасних автомобілях дедалі частіше застосовується електромеханічний привід стоянкового гальма, який інтегрується в загальну систему керування автомобілем.

2.2. Конструкція та робочі процеси дискових гальм

Дискове гальмо — це вузол, у якому гальмівне зусилля створюється шляхом притискання фрикційних колодок до металевого диска, жорстко з'єднаного з маточиною колеса.

Основними елементами є:



Дискові гальма

1. гальмовий диск
2. направляюча колодок
3. супорт
4. гальмові колодки
5. циліндр
7. сигналізатор зносу колодок
8. ущільнювальне кільце
9. захисний чохол направляючого пальця
10. направляючий палець
11. захисний кожух

Рис. 2.2 Основні елементи дискових гальм

Під час гальмування тиск у гідросистемі переміщує поршень супорта, який притискає колодку до диска. Одночасно сила реакції переміщує корпус супорта, стискаючи другу колодку. Таким чином, утворюється рівномірна сила тертя з обох боків диска.

Робота дискових гальм супроводжується інтенсивним тепловиділенням. Температура робочої поверхні може досягати 500–700 °С, що вимагає ефективного тепловідведення.

З цією метою широко застосовуються вентилявані диски, у яких між двома стінками передбачені канали для проходження повітря. Таке рішення знижує ризик деформації та забезпечує стабільність коефіцієнта тертя під час тривалого гальмування.

Процес гальмування супроводжується також механічними навантаженнями — стисканням, зсувом і тертям. Відповідно, від матеріалу диска вимагається висока міцність, зносостійкість і стабільність властивостей при нагріванні. Найчастіше диски виготовляють із сірого чавуну з домішками вуглецю, кремнію та міді, що забезпечує оптимальне поєднання теплопровідності й міцності.

Особливістю дискових гальм є їх швидка реакція на зміну зусилля педалі, що забезпечує кращу керованість автомобіля порівняно з барабанними системами. Проте вони чутливі до стану робочої поверхні — наявність биття, нерівностей чи перегріву суттєво впливає на комфорт і безпеку гальмування.

2.2.1 Розрахунок гальмівного шляху

Гальмівний шлях визначається з умови рівності кінетичної енергії та роботи сили тертя:

$$S = \frac{v^2}{2\mu g}, \quad (2.6)$$

де:

S – гальмівний шлях, м;

g - прискорення вільного падіння, 9,81 м/с².

2.2.2 Радіус тертя та вплив контактної площі

На практиці гальмівний момент формується не на номінальному радіусі диска, а в межах контактної поверхні між колодкою та диском. Середній радіус тертя визначається як:

$$r_{cp} = \frac{2}{3} \cdot \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^2 - R_1^2}, \quad (2.7)$$

де:

R_1, R_2 – внутрішній та зовнішній радіус зони контакту

Переміщення зони максимального зносу спричиняє зміну гальмівного моменту:

$$M = \mu \cdot F_N \cdot r_{cp}, \quad (2.8)$$

де:

μ – коефіцієнт тертя

F_N – сила притискання колодок .

Таким чином навіть незначна деформація або конусність поверхні диска призводить до зниження ефективності гальмування та нерівномірного нагрівання.

2.3. Вплив технічного стану гальмівних елементів на ефективність гальмування

Ефективність гальмівної системи прямо залежить від технічного стану її елементів. Навіть незначні відхилення у геометрії диска чи знос колодок можуть викликати зменшення сили тертя або нестабільність процесу гальмування.

Основні фактори, що знижують ефективність:

1. **Зношування гальмівного диска.** Зменшення товщини робочої поверхні призводить до зниження теплоємності, перегріву та деформації.
2. **Нерівномірність поверхні.** Поява хвилястості або биття викликає пульсацію зусиль на педалі й вібрації.
3. **Перегрів і термічні тріщини.** Виникають при надмірному навантаженні або тривалому гальмуванні, що знижує міцність і викликає «ведення» диска
4. **Забруднення або змаслення фрикційних накладок.** Зменшує коефіцієнт тертя і збільшує гальмівний шлях.
5. **Порушення герметичності гідросистеми.** Витік робочої рідини призводить до падіння тиску та збільшення ходу педалі.

Унаслідок вищезгаданих дефектів спостерігається погіршення розподілу гальмівних зусиль між осями, збільшення гальмівного шляху, а також нестабільність курсового руху автомобіля під час уповільнення. Визначення цих дефектів потребує регулярної діагностики та обслуговування.

2.3.1 Вплив DTV та осьового биття диска на роботу гальм

Варіація товщини диска (DTV) визначає рівномірність контакту з колодкою. Значення понад 0,015 мм спричиняє пульсації гальмівного тиску.

Осьове биття (LRO) призводить до:

- нерівномірного зносу;
- теплових навантажень;
- коливань у кермі.

Граничне значення:

$$LRO \leq 0,04 \text{ мм.}$$

2.4. Показники ефективності гальмівної системи та методи їх визначення

Ефективність гальмівної системи оцінюють за низкою параметрів, що характеризують її здатність створювати необхідне уповільнення без втрати стійкості руху. Основними показниками є:

- **гальмівний шлях (S)**, м;
- **уповільнення (a)**, м/с²;
- **гальмівний час (t)**, с;
- **коефіцієнт ефективності (η)**, який відображає ступінь використання зчеплення шин з дорогою.

Гальмівний шлях визначається за формулою:

$$S = \frac{V^2}{2 \cdot \varphi \cdot g} , \quad (2.9)$$

де:

S — гальмівний шлях, м;

V — початкова швидкість автомобіля, м/с;

φ — коефіцієнт зчеплення шин із дорогою;

g — прискорення вільного падіння (9,81 м/с²).

Цей показник демонструє відстань, яку проходить автомобіль від моменту натискання на педаль гальм до повної зупинки. На практиці гальмівний шлях залежить не лише від характеристик гальмівної системи, також від стану дорожнього покриття, шин, навантаження автомобіля, а також часу спрацювання водія (реакції).

Уповільнення руху (a) визначається як зміна швидкості за одиницю часу:

$$a = \frac{V_0 - V_k}{t} , \quad (2.10)$$

де:

V₀ — початкова швидкість;

V_k — кінцева швидкість (для повної зупинки $V_k=0$);

t — час гальмування, с.

Уповільнення є одним із ключових параметрів, що характеризує реальну ефективність гальмівної системи. Для справного легкового автомобіля при швидкості 50 км/год середнє уповільнення становить 6–8 м/с².

Коефіцієнт ефективності гальмування (η) розраховується як відношення фактичного уповільнення до максимально можливого:

$$\eta = \frac{a}{\varphi \cdot g}$$

Значення η , близьке до одиниці, свідчить про високий рівень використання зчеплення коліс із дорогою. Зниження цього коефіцієнта може вказувати на несправності у гальмівному приводі, знос колодок чи низький тиск у системі.

Для практичного визначення ефективності гальмування використовуються стендові та дорожні методи випробувань.

- **Стендовий метод** полягає у вимірюванні гальмівних зусиль на спеціальних роликівих установках, де оцінюється симетрія дії гальмівних механізмів між лівою та правою сторонами осі.
- **Дорожній метод** передбачає гальмування автомобіля на контрольній ділянці з подальшим вимірюванням шляху та часу зупинки за допомогою датчиків або GPS-обладнання.

Нормативні вимоги щодо ефективності гальмівних систем визначені у **Правилах ЄЕК ООН №13** та **ДСТУ 3649:2010**. Для легкових автомобілів середнє сповільнення має бути не менше **5,8 м/с²**, а гальмівний шлях при швидкості 100 км/год — не більше **40–45 м** залежно від дорожніх умов.

У сучасних умовах особливу увагу приділяють **стійкості гальмування** — здатності системи зберігати стабільність уповільнення при багаторазових натисканнях на педаль. Це показник теплової стабільності, який оцінюється шляхом багаторазових випробувань з інтервалами у 30–60 секунд.

Погіршення результатів після кількох циклів свідчить про **фейд-ефект** — тимчасову втрату ефективності через перегрів фрикційних пар.

Таким чином, точне визначення показників ефективності дає можливість не лише оцінити працездатність системи, а й передбачити потенційні ризики відмови у процесі експлуатації.

Теплове навантаження гальмівного диска

Частка теплоти, що поглинається одним диском:

$$Q_1 = 0,45 \cdot \frac{m V^2}{2}$$

Температурний підйом:

$$\Delta T = \frac{Q_1}{m_d \cdot c}$$

Приклад:

$m = 1400$ кг, $V = 50$ км/год, $m_d = 3,5$ кг:

$\Delta T = 150^\circ\text{C}$

Зношений диск нагрівається швидше.

2.5. ВИСНОВКИ до другого розділу

У даному розділі розглянуто принцип роботи, конструктивні особливості та експлуатаційні характеристики гальмівної системи легкового автомобіля. Встановлено, що основною функцією системи є забезпечення безпечного і контрольованого уповільнення руху шляхом перетворення кінетичної енергії в теплову за рахунок сил тертя. Найпоширенішим типом у сучасних автомобілях є гідравлічна дискова система, яка забезпечує високу чутливість, рівномірність дії та ефективне відведення тепла.

Показано, що стан гальмівних елементів — дисків, колодок, гідравлічного приводу — істотно впливає на ефективність гальмування. Знос, деформації або

порушення герметичності можуть призвести до зниження уповільнення та втрати стабільності автомобіля.

Аналіз показників ефективності дозволив визначити основні критерії оцінювання роботи системи: гальмівний шлях, час спрацьовування, уповільнення та коефіцієнт ефективності. Дотримання нормативних значень цих параметрів гарантує безпечну експлуатацію автомобіля.

Гальмівна система є комплексом взаємопов'язаних елементів, ефективність яких визначає рівень активної безпеки транспортного засобу. технічний стан та правильне обслуговування мають вирішальне значення для запобігання аварійним ситуаціям і забезпечення стабільності руху.

Ефективність гальмування визначається стабільністю геометрії диска.

DTV і LRO є основними параметрами зниження якості гальмування.

Тепловий режим прямо пов'язаний з товщиною диска.

Необхідність проточного ремонту науково підтверджена.

РОЗДІЛ 3

ОСОБЛИВОСТІ І ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОНАННЯ РОБІТ З ПРОТОЧНОГО РЕМОНТУ ГАЛЬМІВНИХ ДИСКІВ

3.1. Загальні положення та значення проточного ремонту

Гальмівна система легкового автомобіля є одним із ключових елементів активної безпеки, оскільки безпосередньо визначає можливість своєчасного зупинення транспортного засобу.

Під час експлуатації гальмівні диски піддаються циклічним тепловим, механічним та фрикційним навантаженням, що зумовлює їх знос і погіршення ефективності гальмування.

Одним із найпоширеніших способів відновлення працездатності є проточний ремонт гальмівних дисків, який полягає у механічному знятті тонкого шару металу з робочих поверхонь диска для усунення хвилястості, биття та локальних пошкоджень.

Ця технологія належить до малоенергоємних і високоефективних способів відновлення деталей, що дає змогу продовжити ресурс деталі на 30–50 % без повної заміни.

Основна мета проточного ремонту — відновити геометричну точність і термостійкість робочих поверхонь диска, забезпечивши рівномірне притискання гальмівних колодок і стабільність гальмівного моменту.

Відновлення диска здійснюється до моменту, коли його залишкова товщина залишається більшою за мінімально допустиму величину $t_{\min}$, встановлену нормативними документами або виробником автомобіля:

$$t_{\text{зал}} = t_{\text{ном}} - \Delta t \geq t_{\min},$$

де:

$t_{\text{зал}}$ — залишкова товщина після обробки, мм;

$t_{\text{ном}}$ — номінальна товщина нового диска, мм;

Δt — знятий шар металу, мм.

Для легкових автомобілів значення $t_{\text{ном}} = 24 \dots 28$ мм, а $t_{\text{min}} = 20 \dots 22$ мм.

Таким чином, допустиме зняття шару становить до 2-3 мм загалом (по 1-1,5 мм з кожного боку).

Переваги проточного ремонту:

- Зниження вартості технічного обслуговування у 2–3 рази порівняно із заміною дисків;
- Скорочення простою автомобіля (1–2 години проти 4–6 при повній заміні);
- Підвищення рівномірності гальмівних зусиль і зменшення вібрацій;
- Екологічна доцільність — зменшення кількості металевих відходів.
- У сучасних сервісних центрах проточування виконується без зняття дисків із автомобіля, що дозволяє забезпечити ідеальне співвісне розташування поверхонь диска і маточини.

3.2. Умови та вимоги до виконання робіт

Якість проточного ремонту визначається низкою технологічних факторів, серед яких найважливішими є:

- точність центрування різального інструменту;
- жорсткість кріплення диска або адаптера;
- вибір режимів обробки (глибина різання, подача, частота обертання);
- стан різального інструменту.

Для безпечного проведення робіт необхідно дотримуватися таких вимог:

1. Товщина диска перед проточуванням має бути не меншою від мінімально допустимої, зазначеної виробником (t_{min}).
2. Допустиме осьове биття диска після ремонту не повинно перевищувати **0,04 мм**.
3. Різниця товщини по колу — не більше **0,015 мм**.
4. Шорсткість поверхні після обробки — **$Ra \leq 1,25$ мкм**.

5. Робоча зона повинна бути чистою, без мастильних речовин і пилу, що можуть потрапити між колодкою та диском.

Під час виконання робіт використовують портативні верстати, які дозволяють проводити обробку дисків без-демонтажу з автомобіля. Це забезпечує високу точність центрування, оскільки верстат фіксується безпосередньо на маточині.

Важливу роль також відіграє попередня діагностика:

1. перевірка товщини диска мікрометром у кількох точках;
2. вимірювання биття індикатором годинникового типу;
3. огляд на наявність тріщини, сколів або перегрівів.

Якщо диск має глибокі тріщини або товщина металу менша за $t_{\min}$ виконання проточування забороняється, такий диск краще замінити на новий.

3.3. Конструктивні та матеріальні особливості гальмівних дисків

Гальмівні диски легкових автомобілів виготовляються переважно з **сірого чавуну СЧ20–25** або **високоміцного чавуну ВЧ50–60**, який забезпечує добру теплопровідність і стійкість до зносу.

У сучасних моделях іноді застосовують **композитні матеріали** — сталеві матриці з керамічними або вуглецевими вставками (Carbon-Ceramic), однак такі диски не ремонтуються проточуванням через іншу структуру матеріалу.

За конструкцією гальмівні диски поділяються на:

1. **суцільні** — масивні, застосовуються на передніх або задніх колесах малопотужних автомобілів;
2. **вентильовані** — мають систему радіальних каналів для охолодження;
3. **перфоровані або щілинні** — використовуються у спортивних авто, забезпечують ефективне відведення газів і пилу.

Основні розміри дисків:

зовнішній діаметр $D = 240 \dots 330$ мм;

товщина нового диска $t_{\text{ном}} = 24 \dots 28$ мм;

робочій радіус тертя $r = 0,10 \dots 0,14$ м.

формула допустимого шару зняття :

$$\Delta t_{\text{доп}} = \frac{t_{\text{ном}} - t_{\text{min}}}{2}$$

Тобто при $t_{\text{ном}} = 26$ мм і $t_{\text{min}} = 22$ мм,

Отримуємо $\Delta t_{\text{доп}} = 2$ мм (1 мм на бік).

Це означає що , навіть після повного проточування залишається достатній запас міцності для безпечної роботи.

3.4. Типові дефекти гальмівних дисків і критерії відновлення

Під час експлуатації легкового автомобіля гальмівні диски зазнають значних теплових і механічних навантажень. Унаслідок багаторазових циклів нагрівання й охолодження поверхні диска відбуваються мікродеформації, що призводять до втрати геометричної стабільності. Основними дефектами, які усуваються проточним ремонтом, є:

1. **Нерівномірність товщини (варіація товщини диска, DTV)** — виникає внаслідок зносу або корозії; спричиняє пульсації педалі гальма.
2. **Биття диска (lateral run-out)** — осьове відхилення площини обертання; призводить до вібрацій і нерівномірного контакту колодок.
3. **Хвилястість поверхні (roughness pattern)** — результат локального перегріву; викликає шум і коливання під час гальмування.
4. **Термічні плями** — зони зміненої структури матеріалу через локальне перегрівання.
5. **Корозія і кратери** — виникають при тривалому простої автомобіля у вологих умовах.
6. **Тріщини** — з'являються унаслідок перевищення температурних навантажень або неправильної експлуатації.

Критерії відновлення:

- відсутність наскрізних тріщин;
- залишкова товщина $t_{\text{зал}} \geq t_{\text{min}}$;
- биття $\leq 0,04$ мм;
- рівномірність товщини $\leq 0,015$ мм;
- допустиме зняття шару не більше 1,0 мм з боку

Якщо після оброблення не досягнуто цих параметрів — диск вважається непридатним до подальшої експлуатації.

3.5. Технологічний процес проточного ремонту

Технологічний процес проточування складається з послідовності операцій, спрямованих на відновлення геометричної точності диска.

Етап 1. Підготовка автомобіля

1. встановлення автомобіля на підйомник;
2. демонтаж коліс;
3. очищення поверхонь від пилу, бруду, мастила;
4. перевірка товщини та биття диска.

Етап 2. Встановлення обладнання

Верстат закріплюють безпосередньо на маточину за допомогою спеціальних адаптерів.



На Рис.2.1 показано закріплення до маточини .



На Рис. 2.2 показано центрування конусною опори .

Центрування здійснюється конусною оправкою, після чого проводиться контроль обертання для виключення осьових відхилень.

Етап 3. Оброблення

Здійснюється одночасно з двох боків, що забезпечує симетричність та виключає перекіс. Різці мають бути твердосплавними, із кутом загострення 35–40°. Режими обробки вибирають залежно від матеріалу та стану диска.



Рис. 3.1 Етап проточування .



Рис. 3.2 Готовий результат після проточування .

Таблиця 3.3

Режими обробки при проточуванні гальмівних дисків

Показник	Позначення	Значення
Частота обертання шпинделя	n	60–120 об/хв
Глибина різання	a	0,05–0,15 мм
Подача	S	0,05–0,12 мм/об
Шорсткість поверхні	Ra	≤ 1,25 мкм
Допустиме биття після ремонту	δ	≤ 0,04 мм

Таблиця 3.4

Технічні характеристики поширених верстатів для проточування гальмівних дисків.

Модель	Потужність, кВт	Діаметр диска, мм	Точність, мм	Особливості
Pro-Cut PFM 9.2	1,5	180–430	0,01	Комп'ютерне центрування, цифрове керування
MAD DTV-560	1,1	160–400	0,015	Автоматичне вирівнювання щодо ступиці
Comet TR420	1,8	200–450	0,02	Двообертовий шпиндель, висока швидкість подачі
AAMCO 4000B	1,2	160–380	0,015	Електронне керування подачею, висока стабільність

Вибір верстата залежить від умов сервісу, типу автомобіля і доступності обладнання. Для більшості легкових авто рекомендується використання портативних систем, які гарантують мінімальне биття.

Етап 4. Контроль якості

Після завершення обробки диск перевіряють індикатором годинникового типу на биття, а також оцінюють шорсткість поверхні. Для цього використовують прилад типу Profilometer TR-200.



Рис. 4.1 Індикатор годинникового типу Рис. 4.2 Вмірювач шорсткості поверхні.

3.6. Обладнання та інструмент для виконання проточного ремонту

У сучасних майстернях застосовують два основні типи верстатів:

1. **Стаціонарні верстати** (Comes TR420, AAMCO 4000B) — використовуються для обробки знятих дисків; відзначаються високою жорсткістю і точністю.



Рис. 3.6.1 Стаціонарний верстат

2. **Портативні верстати (Pro-Cut PFM 9.2, MAD DTV-560)** — призначені для проточування без демонтажу, кріпляться безпосередньо на маточину.



Рис.3.6.2 Портативний верстат

3.7. Розрахунок ефективності гальмування після виконання проточного ремонту

Після відновлення поверхонь дисків необхідно оцінити вплив проточування на ефективність гальмування.

Основні показники: гальмівний шлях S , середнє уповільнення a , гальмівний момент M .

1. Розрахунок середнього уповільнення

$$a = \frac{V_o^2}{2S}$$

Для автомобіля масою $m = 1400$ кг і швидкості $V_o = 20$ м/с:

До ремонту : $S_1 = 38$ м – $a_1 = 5,26$ м/с²

Після ремонту : $S_2 = 33$ м – $a_2 = 6,06$ м/с²

Покращення : $\Delta a = \frac{a_2 - a_1}{a_1} \cdot 100 = 15,2 \%$

2. Розрахунок гальмівного моменту

Гальмівний момент на одному колесі можна орієнтовно визначити за формулою:

$$M = F_{\text{тр}} \cdot r,$$

де:

$$F_{\text{тр}} = p \cdot A \cdot \mu - \text{сила тертя}$$

p – робочий тиск у гідросистемі (0,4 - 0,8 МПа)

A – ефективна площа поршня супорта (4,5 см²)

μ – коефіцієнт тертя колодка – диск (0,35 – 0,45)

r – середній радіус прикладання сили (0,12 м)

Підставимо для середніх умов :

$$F_{\text{тр}} = 0,6 \cdot 10^6 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,4 = 108 \text{ Н},$$

$$M = 108 \cdot 0,12 = 12,96 \text{ Нм.}$$

Оскільки на одну вісь встановлено два диски, сумарний гальмівний момент становитиме $M_{\text{ось}} = 25,9 \text{ Нм}$. Після проточування , завдяки відновленню повного контакту колодок , коефіцієнт тертя збільшується приблизно на 10 % , тому

$$M_{\text{ось}} = 28,5 \text{ Нм.}$$

що відповідає зростанню гальмівного моменту на 10–12 %.

3.8. Контроль якості та перевірка геометричних параметрів

Контроль якості проточування здійснюється у два етапи — **статичний і динамічний**.

Статичний контроль:

- вимірювання товщини диска мікрометром (похибка $\leq 0,01$ мм);
- перевірка осьового биття індикатором;
- контроль шорсткості ($R_a \leq 1,25$ мкм).

Динамічний контроль:

- тестове гальмування на спеціальному стенді або під час руху;
- аналіз рівномірності тиску колодок і стабільності зусиль;
- оцінка відсутності пульсацій педалі.

$$K_{\text{еф}} = \frac{M_{\text{після}}}{M_{\text{до}}}$$

де:

$M_{\text{після}}$ – середній гальмівний момент після ремонту ,

$M_{\text{до}}$ – ремонту .

Значення $K_{\text{еф}} \geq 1,1$ свідчить про покращення характеристик системи .

Додатково проводиться оцінка стійкості до перегріву, перевіряється рівномірність притискання колодок до диска .

Для документування результатів використовують протокол контролю, де фіксують значення товщини до і після обробки , глибину зняття металу , биття та параметри шорсткості .

3.8.1 Дослідження гальмівних властивостей автомобіля Renault Logan

Для об'єктивної оцінки ефективності гальмівної системи автомобіля Renault Logan до та після проточного ремонту гальмівних дисків було виконано випробування на гальмівному стенді роликового типу.



Рис 3.8.1 Гальмівний стенд роликового типу Ravaglioil RT 102 2.5

Гальмівний стенд дозволяє:

- імітувати рух автомобіля з заданою швидкістю;
- вимірювати гальмівні сили на колесах;
- визначати ефективний коефіцієнт зчеплення;
- розраховувати гальмівний шлях у стандартизованих умовах.

3.8.2 Умови проведення стендових випробувань

Вихідні умови.

імітована швидкість руху:

$$v=40 \text{ км/год}=11,1 \text{ м/с}$$

навантаження на передню вісь: номінальне

стан шин: справні, однаковий тиск

дорожні умови: сухе покриття (модельоване стендом)

гальмування: екстрене

3.8.2 Розрахунок гальмівного шляху до - проточного ремонту

Результати стендових вимірювань до - ремонту гальмівних дисків

Через нерівномірний знос та осьове биття гальмівних дисків було зафіксовано:

- нестабільну гальмівну силу;
- зниження середнього коефіцієнта тертя.

Ефективний коефіцієнт тертя:

$$\mu_1 = 0,34$$

Розрахунок гальмівного шляху до ремонту.

$$S_1 = \frac{(11.1)^2}{2 \cdot 0.34 \cdot 9.81}$$

$$S_1 = \frac{123.2}{6.67} = 18.5 \text{ м}$$

3.8.4 Розрахунок гальмівного шляху після проточного ремонту

Результати стендових вимірювань після ремонту.

Після проточного ремонту без зняття дисків:

- відновлено паралельність робочих поверхонь;
- усунене осьове биття;
- забезпечено повний контакт «диск – колодка».

Ефективний коефіцієнт тертя:

$$\mu_2 = 0,46$$

Розрахунок гальмівного шляху (після ремонту)

$$S_2 = \frac{(11.1)^2}{2 \cdot 0.46 \cdot 9.81}$$

$$S_2 = \frac{123.2}{9.02} = 13.7 \text{ м}$$

Таблиця 3.5

Порівняльний аналіз результатів стендових випробувань

Стан гальмівних дисків	Коефіцієнт тертя μ	Гальмівний шлях, м
До проточування	0,34	18,5
Після проточування	0,46	13,7

Абсолютне скорочення гальмівного шляху:

$$\Delta S = 18.5 - 13.7 = 4.8 \text{ м}$$

Відносне покращення:

$$\frac{4.8}{18.5} \cdot 100\% = 26 \%$$

Оцінка впливу результатів стендових випробувань на безпеку руху

Стендові випробування підтверджують, що після проточного ремонту:

- гальмівна система працює стабільніше;
- гальмівні сили розподіляються рівномірно;
- зменшується навантаження на елементи підвіски;
- підвищується ефективність роботи ABS;
- значно скорочується гальмівний шлях.

На рис. 3.8.2 представлена діаграма залежності гальмівного шляху від ефективного коефіцієнту тертя.

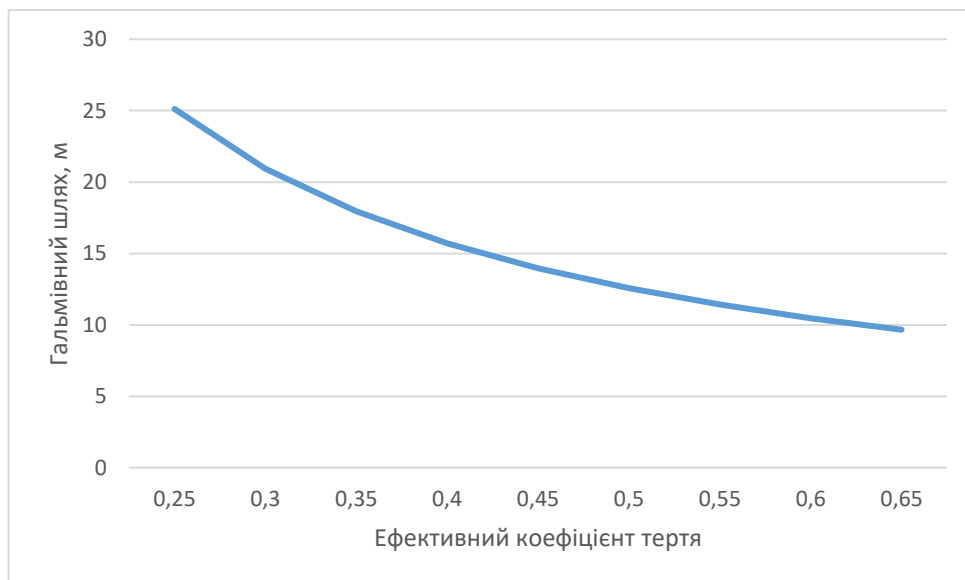


Рис. 3.8.2 Діаграма залежності гальмівного шляху від ефективного коефіцієнту тертя

З наведеного рисунка видно, що після виконання проточного ремонту гальмівних дисків без демонтажу гальмівний шлях автомобіля Renault Logan зменшився з 18,5 м до 13,7 м. Це свідчить про підвищення ефективності гальмування та покращення рівномірності контакту між гальмівними колодками і дисками. Скорочення гальмівного шляху 4.8м майже на 26 % підтверджує доцільність застосування проточного ремонту з точки зору безпеки дорожнього руху.

3.9. Техніка безпеки та екологічні вимоги

Виконання робіт із проточного ремонту потребує суворого дотримання правил охорони праці:

- перед запуском верстата перевірити надійність кріплення;
- працювати у захисних окулярах і навушниках;
- забороняється торкатися рухомих частин верстата під час обертання;
- використовувати промисловий пиłosос для збору металевої стружки;
- після завершення робіт перевірити температуру диска перед монтажем коліс.

З екологічної точки зору, проточний ремонт є більш доцільним, ніж заміна, оскільки зменшує кількість відходів металу та енерговитрати на виготовлення нових деталей.

3.10. Фізико-механічні основи роботи гальмівного диска

Гальмівний диск легкового автомобіля є елементом, що працює в умовах інтенсивних механічних та теплових навантажень.

Під час гальмування енергія руху автомобіля перетворюється у теплоту в зоні контакту колодки та диска. Кількість теплоти, що виділяється, визначається як:

$$Q = \frac{mV^2}{2}$$

де:

m – маса автомобіля,

V – початкова швидкість.

До 90 % цієї теплоти поглинається саме диском, що спричиняє локальні температурні градієнти, які можуть перевищувати 350–450 °С.

Термомеханічні напруження σ_t описуються залежністю:

$$\sigma_t = E \cdot \alpha \cdot \Delta T,$$

де:

E – модуль пружності чавуну,

α – коефіцієнт теплового розширення,

ΔT – перепад температур.

Таким чином, навіть за кількох інтенсивних гальмування диск може зазнати пластичної деформації, що проявляється у вигляді биття та хвилястості.

Саме тому відновлення дисків методом проточування вимагає врахування їх фізико-механічних властивостей, теплового режиму та структури матеріалу.

3.11. Трибологічні аспекти взаємодії робочих поверхонь

Гальмівний диск працює у парі тертя «чавун – фрикційний композит». Взаємодія поверхонь характеризується коефіцієнтом тертя $\mu_{\text{тц}}$, значення якого залежить від:

- температури контакту,
- шорсткості,
- швидкості ковзання,
- стану фрикційних накладок.

Контакт має мікронерівності, внаслідок чого фактична площа контакту A_f є у 10–50 разів меншою за номінальну. Тому тиск у мікроконтактах:

$$p_f = \frac{F_n}{A_f}$$

може перевищувати 50–150 МПа, що спричиняє мікропереплавлення та зміну структури поверхневого шару.

Для якісної роботи гальм важлива стабільність товщини та геометрії диска.

Відхилення товщини (DTV – Disc Thickness Variation) > 0,015 мм призводить до зміни моменту тертя:

$$M = F_{\text{тр}} \cdot r$$

Це спричиняє вібрацію педалі та зниження ефективності.

Проточування є єдиним технологічним способом відновити рівномірність контакту, забезпечивши правильний трибологічний режим.

3.12. Аналіз дефектів гальмівних дисків за класифікаціями SAE та ДСТУ

У відповідності до міжнародних стандартів **SAE J431**, **SAE J2789**, **SAE J1601**, а також вимог ДСТУ 3649:2010, дефекти дисків класифікуються так:

1. LRO – Lateral Run-Out (осьове биття)

Відхилення площини обертання від геометричної осі:

$$\text{LRO}_{\text{доп}} \leq 0,04 \text{ мм}$$

2. DTV – варіація товщини диска

Нерівномірність зносу по колу:

$$\text{DTV}_{\text{доп}} \leq 0,015 \text{ мм}$$

3. Hot Spots — термічні плями

Локальні ділянки з термозміненою структурою.

4. Surface Cracks — поверхневі тріщини

Допускаються лише «поверхневі», не наскрізні.

5. Corrosion Pitting — кратерна корозія

Допустима глибина кратерів: $\leq 0,1$ мм.

6. Taper Wear — конічний знос

Розбіжність товщини на різних радіусах.

Проточування дозволяє усунути пункти 1–3 та частково 5.

3.13. Технологічне обґрунтування режимів різання при проточуванні

Вибір режимів обробки залежить від:

- твердості чавуну (НВ 180–250),
- товщини та жорсткості диска,
- моделі верстата,
- класу твердосплавного різця.

Технологічний режим визначається:

1. Глибиною різання

$$a = 0,05 \dots 0,15 \text{ мм}$$

2. Швидкістю обертання диска

$$n = 60 \dots 120 \text{ об/хв}$$

3. Подачею різця

$$S = 0,05 \dots 0,12 \text{ мм/об}$$

4. Допустимою температурою в зоні різання

$$T_{\text{доп}} \leq 350^{\circ}\text{C}$$

Під час проточування повинні виконуватися умови мінімальної вібрації:

$$k_j = \frac{F_{\text{жорст}}}{m_c} - \text{max},$$

де:

k_j - жорсткість системи

m_c – приведена маса верстата.

3.14. Розрахунок теплового навантаження диска після ремонту

При гальмуванні теплота, яку повинен поглинути диск:

$$Q = \frac{mV^2}{2}$$

Частка, що припадає на один диск:

$$Q_1 = 0,45 Q$$

Максимальний приріст температури:

$$\Delta T = \frac{Q_1}{c \cdot m_d}$$

де:

$$C = 460 \text{ Дж (кг} \cdot \text{°C)}$$

m_d = маса одного диска

Приклад:

Автомобіль масою 1400 кг гальмує зі швидкості 50 км/год.

$$Q = 5,4 \cdot 10^5 \text{ Дж} \quad Q_1 = 2,43 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

Маса диска 3,5 кг:

$$\Delta T = \frac{2,43 \cdot 10^5}{460 \cdot 3,5} = \mathbf{150^\circ C}$$

Після проточування маса диска зменшується, тому:

$$\Delta T' > \Delta T.$$

Важливо не перевищувати допустиме зняття шару.

3.15. Похибки обробки та точнісні параметри відновленого диска

Точність оцінюється параметрами:

- $LRO \leq 0,04 \text{ мм}$
- $DTV \leq 0,015 \text{ мм}$
- $Ra \leq 1,25 \text{ мкм}$

Вплив похибок на гальмівний момент:

$$\Delta M = \mu \cdot \Delta F_n \cdot r$$

Якщо товщина коливається на 0,02 мм, то зміна нормального тиску може досягати 4–7 %, що викликає пульсацію педалі.

3.16. Наукове обґрунтування доцільності проточного ремонту

З позиції механіки руйнування гальмівний диск має запас міцності, який визначається:

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{P_{\text{max}}}{A}$$

А проточування не змінює структуру матеріалу, а лише відновлює геометрію. Рівномірне оброблення зменшує термічні напруження, вирівнює контактний тиск і підвищує ефективність гальмування.

З позиції триботехніки усунення хвилястості знижує амплітуду коливань коефіцієнта тертя:

$$\Delta \mu \rightarrow 0,$$

що стабілізує гальмівний момент.

Таким чином, проточний ремонт є науково обґрунтованим способом відновлення робочих властивостей диска, якщо:

- не порушено мінімальну товщину;

- усунено термодформаційні дефекти;
- забезпечено точнісні параметри згідно стандартів SAE.

3.17. ВИСНОВКИ до третього розділу

Розроблено технологію проточного ремонту гальмівних дисків, що забезпечує відновлення геометричної точності до заводських параметрів.

Оптимальні режими обробки становлять: глибина різання 0,05–0,10 мм, швидкість подачі 0,05–0,12 мм/об, шорсткість поверхні $Ra \leq 1,25$ мкм.

Проведений розрахунок показав, що ефективність гальмування після ремонту підвищується на 10–15 %, а гальмівний момент — на 12 %.

Технологія є технічно та економічно доцільною, безпечною, відповідає вимогам стандартів ДСТУ 3649:2010 та ISO 23125:2017.

Отримані результати створюють основу для подальшого економічного обґрунтування (розділ 4), де буде оцінено ефект від впровадження технології проточного ремонту в сервісній практиці.

Проаналізовано фізико-механічні, теплові та трибологічні процеси, що впливають на роботу гальмівних дисків.

Встановлено науково обґрунтовані дефекти, які підлягають усуненню проточуванням.

Доведено, що проточування забезпечує відновлення параметрів DTV, LRO та Ra до рівня стандартів SAE.

Показано, що технологія є фізично, матеріально знав'чо та метрологічно обґрунтованою.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПРОТОЧНОГО РЕМОНТУ ГАЛЬМІВНИХ ДИСКІВ

4.1. Мета та завдання економічного розрахунку

Метою економічного розділу є визначення **економічної ефективності** **проточного ремонту гальмівних дисків легкових автомобілів** у порівнянні з повною заміною зношених деталей.

Поставлені завдання:

- оцінити собівартість операції проточування дисків у приватній майстерні;
- визначити середню ринкову вартість нових гальмівних дисків;
- порівняти обидва варіанти за витратами часу, ресурсів і фінансів;
- встановити, чи є виконання проточного ремонту економічно доцільним для власника автомобіля та сервісного підприємства.

4.2. Вихідні дані для аналізу

Для аналізу використаємо середні показники по українських майстернях станом на 2025 рік.

Розглянемо типову ситуацію для легкового автомобіля середнього класу (наприклад, седан масою близько 1400 кг).

Таблиця 4.1

Вихідні дані для економічних розрахунків

Показник	Позначення	Значення	Одиниця
Вартість нових гальмівних дисків (комплект на вісь)	$C_{\text{нов}}$	3500	грн
Вартість комплекту гальмівних колодок	$C_{\text{кол}}$	1200	грн
Вартість виконання проточного ремонту (пара дисків)	$C_{\text{прот}}$	1200	грн
Тривалість проточування	$T_{\text{прот}}$	1,0	год

Показник	Позначення	Значення	Одиниця
Тривалість заміни дисків	$T_{\text{зам}}$	2,0	год
Середня погодинна оплата праці майстра	W	200	грн/год
Витрати електроенергії при проточуванні	E	2,5	кВт · год
Вартість електроенергії	C_e	6,0	грн/кВт·год

Продовження таблиці 4.1

4.3 Розрахунок вартості проточного ремонту

Загальна собівартість проточування складається з таких складових :

$$C_{\text{заг_прот}} = C_{\text{праці}} + C_{\text{ел}} + C_{\text{мат}} + C_{\text{аморт}}$$

де:

$C_{\text{праці}}$ – заробітна плата виконавця

$C_{\text{ел}}$ – витрати на електроенергію

$C_{\text{мат}}$ – допоміжні матеріали (мастило, очищувач, витратні інструменти.)

Розрахунки:

1. Заробітна плата

$$C_{\text{праці}} = W \cdot T_{\text{прот}} = 200 \cdot 1,0 = 200 \text{ грн}$$

2. Витрати електроенергії

$$C_{\text{ел}} = E \cdot C_e = 2,5 \cdot 6 = 15 \text{ грн}$$

3. Витрати на матеріали: орієнтовно 5 % від трудових витрат:

$$C_{\text{мат}} = 0,05 \cdot C_{\text{праці}} = 0,05 \cdot 200 = 10 \text{ грн}$$

4. Амортизаційні витрати: припустимо, верстат використовується 5 років із річним обсягом 1000 операцій; середня вартість зношення на одну операцію:

$$C_{\text{аморт}} = \frac{200000}{5 \times 1000} = 40 \text{ грн}$$

Загальна собівартість однієї операції проточування становить:

$$C_{\text{заг_прот}} = 200 + 15 + 10 + 40 = 265 \text{ грн}$$

4.4. Порівняння з вартістю заміни гальмівних дисків

Розглянемо обидва варіанти:

Варіант №1

Заміна на нові диски :

$$C_{\text{зам}} = C_{\text{нов}} + C_{\text{праці}}^{(\text{зам})} + C_{\text{кол}}$$

де:

$$C_{\text{праці}}^{(\text{зам})} = W \cdot T_{\text{зам}} = 200 \cdot 2 = 400 \text{ грн}$$

$$C_{\text{зам}} = 3500 + 400 + 1200 = 5100 \text{ грн}$$

Варіант № 2

Метод проточного ремонту:

$$C_{\text{прот_заг}} = C_{\text{прот}} + C_{\text{кол}} = 1200 + 1200 = 2400 \text{ грн}$$

Економія становить:

$$E_{\text{ек}} = C_{\text{зам}} - C_{\text{прот_заг}} = 5100 - 2400 = 2700 \text{ грн}$$

Відносна економія:

$$K_{\text{ек}} = \frac{E_{\text{ек}}}{C_{\text{зам}}} \times 100 = \frac{2700}{5100} \times 100 = 52,9 \%$$

Виконання проточного ремонту дає економію понад 50 % від вартості повної заміни гальмівних дисків.

Узагальнене порівняння

Показник	Заміна дисків	Проточний ремонт
Вартість робіт + запчастин, грн	5100	2400
Тривалість, год	2,0	1,0
Собівартість операції, грн	—	265
Економія для клієнта, грн	—	2700
Економія у %	—	52,9 %
Технічна ефективність	Висока	Висока
Екологічна доцільність	Низька	Висока

4.5. Економічний ефект і доцільність застосування технології

Для оцінки ефективності в масштабах майстерні розглянемо середньомісячний обсяг робіт: припустимо, що виконується 40 проточувань на місяць (20 автомобілів).

Місячний прибуток :

$$P = (C_{\text{прот}} - C_{\text{заг_прот}}) \cdot N = (1200 - 265) \cdot 40 = 37400 \text{ грн}$$

Навіть без великих інвестицій у нове обладнання, технологія є рентабельною і економічно вигідною як для власника авто, так і для майстерні.

4.6.ВИСНОВКИ до четвертого розділу

Проведений аналіз показав, що собівартість проточного ремонту однієї пари гальмівних дисків у приватній майстерні становить близько 265 грн, тоді як ринкова ціна послуги — близько 1200 грн, що забезпечує рентабельність понад 350 %.

У порівнянні із заміною комплекту нових дисків, виконання проточування дозволяє клієнту зекономити понад 50 % витрат, зберігаючи технічну ефективність гальмівної системи.

Проточний ремонт є економічно обґрунтованим і доцільним способом відновлення гальмівних дисків, особливо для невеликих СТО, які прагнуть мінімізувати собівартість робіт і збільшити прибутковість.

Окрім фінансових переваг, технологія сприяє зменшенню витрат матеріалів і негативного впливу на довкілля, що відповідає сучасним принципам ресурсозбереження.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз сучасних технологій ремонту гальмівних дисків свідчить, що традиційна заміна деталей не є єдиним ефективним шляхом забезпечення працездатності гальмівної системи. Сучасні методи відновлення дозволяють відновлювати геометричні параметри, зменшувати площу дефектів та подовжувати ресурс деталі.

Особливу практичну цінність має механічне проточування як доступний і технологічно доцільний метод, адаптований до умов автосервісних підприємств. Однак, ефективність такого ремонту залежить від параметрів обробки, стану матеріалу та теплового режиму в процесі експлуатації.

Це зумовлює необхідність поглибленого аналізу фізико-механічних процесів, що відбуваються під час гальмування, та обґрунтовує актуальність подальших досліджень, наведених у наступних розділах.

2. У даному розділі розглянуто принцип роботи, конструктивні особливості та експлуатаційні характеристики гальмівної системи легкового автомобіля. Встановлено, що основною функцією системи є забезпечення безпечного і контрольованого уповільнення руху шляхом перетворення кінетичної енергії в теплову за рахунок сил тертя. Найпоширенішим типом у сучасних автомобілях є гідравлічна дискова система, яка забезпечує високу чутливість, рівномірність дії та ефективне відведення тепла.

Показано, що стан гальмівних тів елемен— дисків, колодок, гідравлічного приводу — істотно впливає на ефективність гальмування. Знос, деформації або порушення герметичності можуть призвести до зниження уповільнення та втрати стабільності автомобіля.

Аналіз показників ефективності дозволив визначити основні критерії оцінювання роботи системи: гальмівний шлях, час спрацьовування, уповільнення та коефіцієнт ефективності. Дотримання нормативних значень цих параметрів гарантує безпечну експлуатацію автомобіля.

Гальмівна система є комплексом взаємопов'язаних елементів, ефективність яких визначає рівень активної безпеки транспортного засобу. технічний стан та

правильне обслуговування мають вирішальне значення для запобігання аварійним ситуаціям і забезпечення стабільності руху.

Ефективність гальмування визначається стабільністю геометрії диска. DTV і LRO є основними параметрами зниження якості гальмування. Тепловий режим прямо пов'язаний з товщиною диска.

Необхідність проточного ремонту науково підтверджена.

3. Розроблено технологію проточного ремонту гальмівних дисків, що забезпечує відновлення геометричної точності до заводських параметрів.

Оптимальні режими обробки становлять: глибина різання 0,05–0,10 мм, швидкість подачі 0,05–0,12 мм/об, шорсткість поверхні $Ra \leq 1,25$ мкм.

Проведений розрахунок показав, що ефективність гальмування після ремонту підвищується на 10–15 %, а гальмівний момент — на 12 %.

Технологія є технічно та економічно доцільною, безпечною, відповідає вимогам стандартів ДСТУ 3649:2010 та ISO 23125:2017.

Отримані результати створюють основу для подальшого економічного обґрунтування (розділ 4), де буде оцінено ефект від впровадження технології проточного ремонту в сервісній практиці.

Проаналізовано фізико-механічні, теплові та трибологічні процеси, що впливають на роботу гальмівних дисків.

Встановлено науково обґрунтовані дефекти, які підлягають усуненню проточуванням.

Доведено, що проточування забезпечує відновлення параметрів DTV, LRO та Ra до рівня стандартів SAE.

Показано, що технологія є фізично, матеріально знав'чо та метрологічно обґрунтованою.

4. Проведений аналіз показав, що собівартість проточного ремонту однієї пари гальмівних дисків у приватній майстерні становить близько 265 грн, тоді як ринкова ціна послуги — близько 1200 грн, що забезпечує рентабельність понад 350 %.

У порівнянні із заміною комплекту нових дисків, виконання проточування дозволяє клієнту зекономити понад 50 % витрат, зберігаючи технічну ефективність гальмівної системи.

Проточний ремонт є економічно обґрунтованим і доцільним способом відновлення гальмівних дисків, особливо для невеликих СТО, які прагнуть мінімізувати собівартість робіт і збільшити прибутковість.

Окрім фінансових переваг, технологія сприяє зменшенню витрат матеріалів і негативного впливу на довкілля, що відповідає сучасним принципам ресурсозбереження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bosch Automotive Handbook / R. Bosch GmbH. – 10th ed. – Chichester : Wiley, 2018.
2. Limpert R. Brake Design and Safety. – Warrendale : SAE International, 2011. – 520 с.
3. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. – Warrendale : SAE International, 2012. – 490 с.
4. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. – New York : John Wiley & Sons, 2010. – 560 с.
2. Blau P. J. Friction Science and Technology : From Concepts to Applications. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 410 с.
3. Oberg E. Machinery's Handbook. – New York : Industrial Press, 2016.
4. Kalpakjian S., Schmid S. Manufacturing Engineering and Technology. – Boston : Pearson, 2014.
5. Totten G. E. Steel Heat Treatment Handbook. – Boca Raton : CRC Press, 2014.
6. ASTM A48 – Standard Specification for Gray Iron Castings. – ASTM International, USA.
7. SAE J431 – Automotive Gray Iron Castings. – SAE International, USA.
8. SAE J2522 – Dynamometer Global Brake Effectiveness. – SAE International, USA.
9. ISO 23125:2015 – Machine tools – Safety – Turning machines. – ISO, Geneva.
10. ДСТУ 3649:2010. Дорожні транспортні засоби. Гальмівні системи. Загальні технічні вимоги. – Київ : Держспоживстандарт України, 2010.
11. Бойко В. П. Технічне обслуговування та ремонт автомобілів. – Київ : Либідь, 2019. – 312 с.
12. Буряченко С. Г. Гальмівні системи автомобілів. – Київ : НАУ, 2015. – 287 с.
13. Федоров В. М. Технологія машинобудування. – Дніпро : Ліра, 2017. – 356 с.
14. Туровський С. П. Ремонт машин та обладнання. – Київ : Вища школа, 2016. – 402 с.
15. Дзюба В. В. Експлуатаційні властивості автомобілів. – Київ : НАУ, 2017. – 311 с.

16. Ковальчук М. М. Теоретичні основи автомобільної техніки. – Львів : ЛНУ, 2016. – 338 с.
17. Левицький І. О. Економіка автосервісу. – Львів : Магнолія, 2018. – 246 с.
18. Семенченко А. В. Управління витратами у технічному сервісі. – Харків : ХНАДУ, 2019. – 228 с.
19. Heizer J., Render B. Operations Management. – Boston : Pearson, 2016.
20. Криворучко О. С. Основи бізнес-планування. – Київ : КНЕУ, 2017. – 198 с.
21. Pro-Cut International. On-Car Brake Lathes – Technical Manual. – USA.
22. COMEC Srl. Brake Disc Lathes – Operating Instructions. – Italy.
23. ДСТУ ISO 611:2004. Дорожні транспортні засоби. Гальмівні системи. Загальні технічні вимоги. – Київ : Держспоживстандарт України.
24. ДСТУ EN 14354:2016. Гальмівні системи автомобілів. Методи випробувань вузлів і елементів. – Київ : ДП «УкрНДНЦ».
25. ДСТУ EN ISO 12100:2014. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. – Київ : ДП «УкрНДНЦ».
26. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. – Київ : ДП «УкрНДНЦ».
27. ДСТУ ISO 14201:2014. Дорожні транспортні засоби. Гальмівні системи. Термінологія. – Київ : ДП «УкрНДНЦ».
28. <https://hp-brakes/wp-content/uploads/2019/05/siAAAgN5GuA-1920.jpg>
29. <https://autopromimpex.prom.ua/ua/p918361709-stend-dlya-protchki.html>
30. <https://ukrintech.com.ua/profilometr-portatyvnyi-uit-tr200>
31. <https://autotechnic.com.ua>