

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

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерії машин, споруд та технологій

(назва факультету)

Автомобілів

(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на здобуття освітнього ступеня

Бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення технологічного процесу відновлення гальмівних дисків  
легкових транспортних засобів

Виконав: студент 4 курсу, групи МАЗ-41  
спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Василь ПАХОЛЬЧУК  
(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Роман  
РОГАТИНСЬКИЙ  
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Марія СПРАВСЬКА  
(прізвище та ініціали)

Зав. кафедри

(підпис)

Олег ЦЬОНЬ  
(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

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

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій  
(повна назва факультету)

Кафедра Кафедра автомобілів  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олег ЦЬОНЬ

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«29» січня 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Пахольчуку Василю Миколайовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення технологічного процесу відновлення гальмівних дисків легкових транспортних засобів

Керівник роботи Рогатинський Р.М., д.т.н., професор.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 29 » січня 2024 року № 4/7-75

2. Термін подання студентом завершеної роботи 03 червня 2023

3. Вихідні дані до роботи Базовий технологічний процес відновлення гальмівних дисків легкових транспортних засобів

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

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

4 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

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

Передній гальмовий механізм автомобіля – А1;

Основні дефекти гальмівних дисків – А1;

Модель стенда в SolidWorks – А1;

Основні методи для контролю гальмівних дисків – А1;

Стенд гальмовий автомобільний – А1;

Планування зони ремонту гальмівної системи автомобілів – А1;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.	к.т.н. доц. Сенчишин В.С.		

7. Дата видачі завдання 29.січня 2024р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	15.02.2024	
2	Технологічний розділ	14.03.2024	
3	Конструкторський розділ	18.04.2024	
4	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	08.05.2024	
5	Оформлення графічної частини	22.05.2024	
6	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	11.06.2024	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Василь ПАХОЛЬЧУК**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Роман РОГАТИНСЬКИЙ**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему: «Розроблення технологічного процесу відновлення гальмівних дисків легкових транспортних засобів».

Робота виконана на кафедрі автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Керівник кваліфікаційної роботи бакалавра д.т.н., професор Рогатинський Р.М.

Пояснювальна записка складається з чотирьох розділів і 52 сторінок формату А4 та 6 аркушів формату А1 графічної частини 1 сторінки додатків.

Ключові слова: відновлення, технологічний процес, надійність, контроль якості, зношування.

## ЗМІСТ

<b>Вступ.....</b>	<b>6</b>
<b>1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ.....</b>	<b>7</b>
1.1 Коротка характеристика гальмівних механізмів.....	7
1.2 Матеріали для дисків.....	13
<b>2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....</b>	<b>16</b>
2.1 Основи тертя та зносу.....	16
2.2 Трибологічна гальмівна система.....	18
2.3 Триботехнічні характеристики системи диск-колодка.....	21
2.4 Невідповідності геометрії диска та колодки.....	26
2.5 Вібрації та шум.....	31
<b>3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....</b>	<b>35</b>
3.1 Дослідження дискових гальм програмою COMSOL.....	35
3.2 Симуляція роботизованої системи у SolidWorks.....	41
<b>4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....</b>	<b>44</b>
4.1 Поняття та ознаки безпеки життєдіяльності.....	44
4.2 Основні групи причин виробничого травматизму і професійної захворюваності.....	46
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>50</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЯ.....</b>	<b>51</b>
<b>ДОДАТКИ</b>	

## ВСТУП

Гальмівні системи є вирішальними для безпеки легкових автомобілів, а гальмівні диски – ключовим компонентом цих систем. З часом диски зазнають зносу, що може знижувати ефективність гальмування та загрожувати безпеці пасажирів. Відновлення гальмівних дисків, тобто відновлення їхнього первісного технічного стану, є економічно вигідним та екологічно відповідальним рішенням, яке дозволяє продовжити термін їх служби. Розроблення ефективного технологічного процесу для такого відновлення вимагає глибокого розуміння матеріалів, механізмів зносу, а також методів діагностики та обробки.

Ця робота спрямована на розробку оптимізованого, контрольованого та високоефективного технологічного процесу відновлення гальмівних дисків, що відповідає сучасним вимогам безпеки та якості. Важливим аспектом є також зниження витрат на відновлення і зменшення впливу на довкілля, що робить процес не лише технічно доцільним, а й соціально значимим.

# 1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Коротка характеристика гальмівних механізмів

Автомобіль має бути обладнаний гальмівною системою, щоб мати змогу зупинитися або адаптувати швидкість відповідно до змін у дорожніх та транспортних умовах. Основна концепція гальмівних систем полягає у трансформації кінетичної енергії транспортного засобу у інші форми енергії. Наприклад, при фрикційному гальмуванні енергія перетворюється на тепло, а при регенеративному гальмуванні - на електричну енергію або стиснене повітря. Однак, під час гальмування не вся кінетична енергія перетворюється на потрібну форму; наприклад, у процесі фрикційного гальмування частина енергії може витрачатися у вигляді вібрацій. У документі можна знайти короткий огляд різних систем гальмування, які застосовуються в автомобілях.

Зазвичай у легкових авто використовують два типи фрикційних гальм: барабанні та дискові. Порівняно з барабанними, дискові гальма ефективніше охолоджуються завдяки великій площі контакту та кращій циркуляції повітря, а також мають властивість самоочищення через дію центробіжних сил.

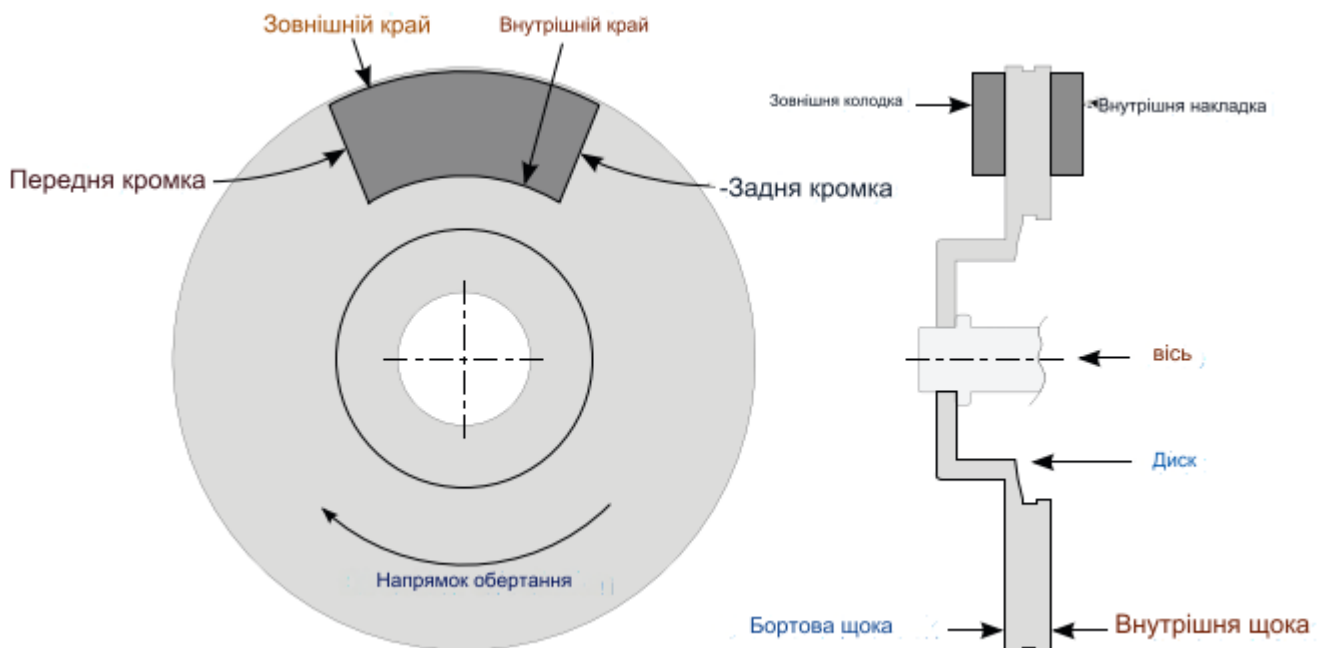


Рис. 1.1. Спрощена схема дискового гальма з використанням загальноприйнятої термінології.

Враховуючи ці переваги та інші фактори, дискові гальма стали стандартним вибором для передніх гальм легкових автомобілів і передбачається, що незабаром вони посідуть провідні позиції і на ринку

В системі дискових гальм колодки тиснуть на обертовий диск, що призводить до утворення тепла на межі диска і колодки внаслідок тертя. Це тепло потім розподіляється між автомобілем та навколишнім середовищем, забезпечуючи охолодження диска. На рисунку 1 зображено спрощену модель дискового гальма з використанням стандартної термінології. Колодка, яка знаходиться ближче до центру автомобіля, носить назву внутрішньої, в той час як віддалена колодка відома як зовнішня. Так само, частина диска, що має орієнтацію до автомобіля, відома як внутрішня щока, а частина, що орієнтована назовні, - зовнішня щока. Край колодки, що спершу зустрічається з диском, називається переднім краєм, а край, що зустрічається останнім - заднім краєм. Менший за радіус край колодки називається внутрішнім, а більший - зовнішнім краєм.

Основні компоненти дискового гальма включають гальмівний диск, колодку, підкладку, основну плиту, прокладку та супорт. Нижче ці компоненти розглядаються більш детально.

Гальмівний диск, також відомий як гальмівний ротор, прикріплений до осі і обертається з тією ж швидкістю, що і колесо. Ефективність гальмівної системи з дисковими гальмами залежить від швидкості перетворення кінетичної енергії в тепло через тертя між колодкою і диском. Важливим аспектом ефективного гальмівного дизайну є швидке розсіювання тепла, оскільки надлишкове накопичення тепла може підвищити температуру диска і негативно вплинути на його продуктивність. Для забезпечення оптимальної роботи дискових гальм у складних умовах експлуатації застосовують вентиляцію гальмівних дисків, що покращує охолодження. Гальмівні диски поділяються на два основних типи:

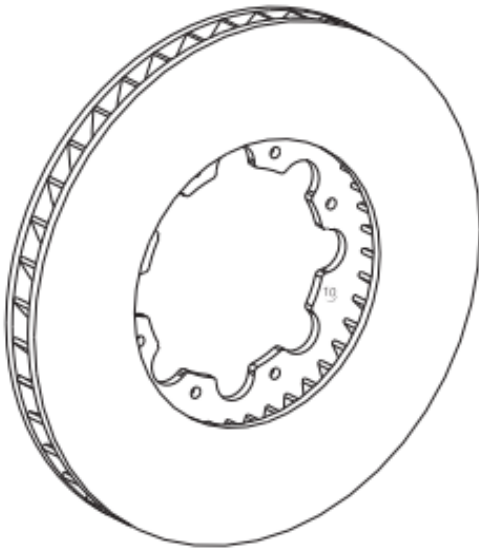
Цільні гальмівні диски.

Вентильовані гальмівні диски.

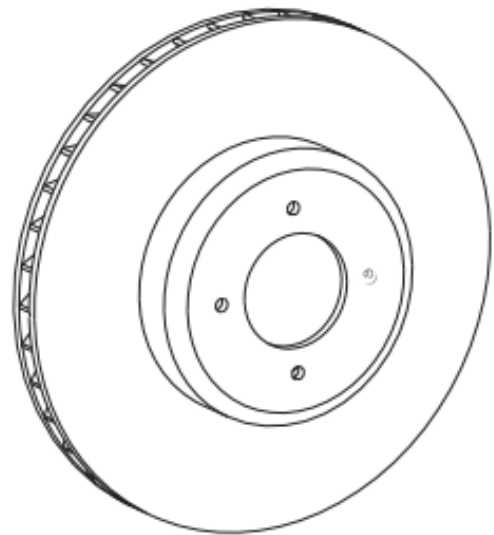
Цільний гальмівний диск представляє собою найпростішу конструкцію, що складається з єдиного цілісного диска. У вентильованому диску знаходяться



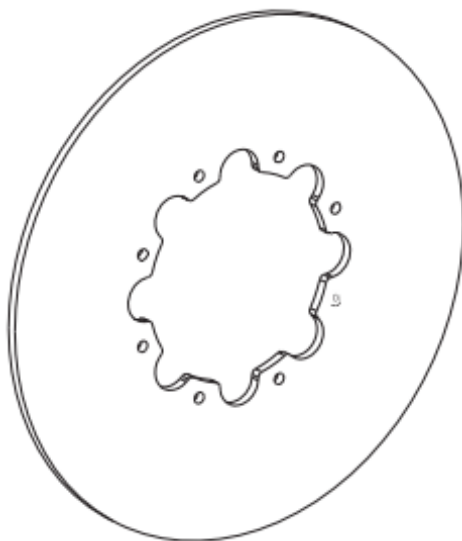
перегородки або стовпчики, які відділяють два кільцеві диски, забезпечуючи простір для проходження повітряного потоку. Вентильовані гальмівні диски покращують охолодження та знижують температуру поверхні, зменшуючи таким чином ризик втрати гальмівної ефективності та сприяючи меншому зносу диска та колодок. Ці конструкції можуть виготовлятися з монтажним дзвоном або без нього, де монтажний дзвін збільшує відстань від поверхні тертя до осі та збільшує площу поверхні диска, що сприяє кращому охолодженню і захищає підшипники колеса від високих температур, що виникають під час гальмування. На рисунку 1.2 наведено схематичний опис цих двох типів дисків.



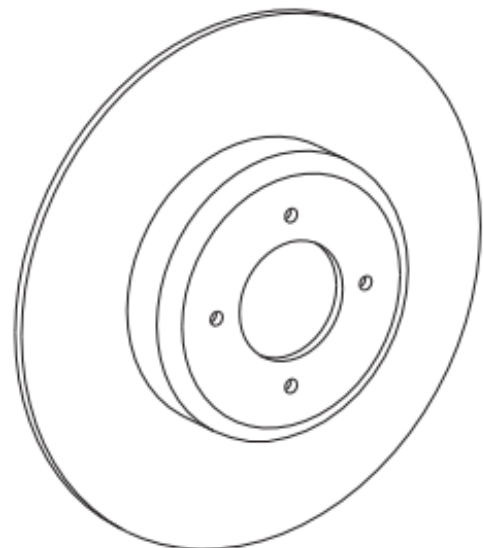
а) Вентильований диск без дзвона.



б) Вентильований диск з дзвоном.



в) Суцільний диск без дзвона.



г) Суцільний диск з дзвоном.

Рис. 1.2. Схематичне зображення різних гальмівних дисків.

Коли монтажний дзвін не є частиною гальмівного диска, така багаточастинна конструкція називається гібридним або композитним гальмівним диском. В цій конфігурації диск часто відомий як гальмівне або тертьове кільце. Існує декілька методів з'єднання монтажного дзвона та тертьового кільця, залежно від матеріалу диска. На рисунку 3 демонструються два запатентованих методи, які використовують з'єднувальний елемент для сполучення тертьового кільця з монтажним дзвоном. У рисунку 1.3 а з'єднувальний елемент у вигляді спеціального різьбового болта закручується в монтажний дзвін і може ковзати у радіальному напрямку всередині тертьового кільця. Зазвичай цей болт виготовлений зі сталі, схильної до корозії, що може спричинити швидку передачу тепла до монтажного дзвона. На рисунку 1.3 б з'єднувальний елемент виготовлений з кераміки, щоб запобігти корозії та зменшити теплопередачу до дзвона. Головка керамічного штифта заливається у монтажний дзвін. У іншій запатентованій конструкції, показаній на рисунку 1.4, декілька виступаючих зубів на внутрішньому периметрі тертьового кільця фінішно обробляються, а потім монтажний дзвін відливається так, що ці зуби інтегруються в матеріал дзвона. Зазвичай монтажний дзвін виготовляється з легкого сплаву, наприклад, алюмінію або магнію. Однією з головних переваг гібридного гальмівного диска є відносна свобода розширення тертьового кільця, що знижує термічну деформацію.

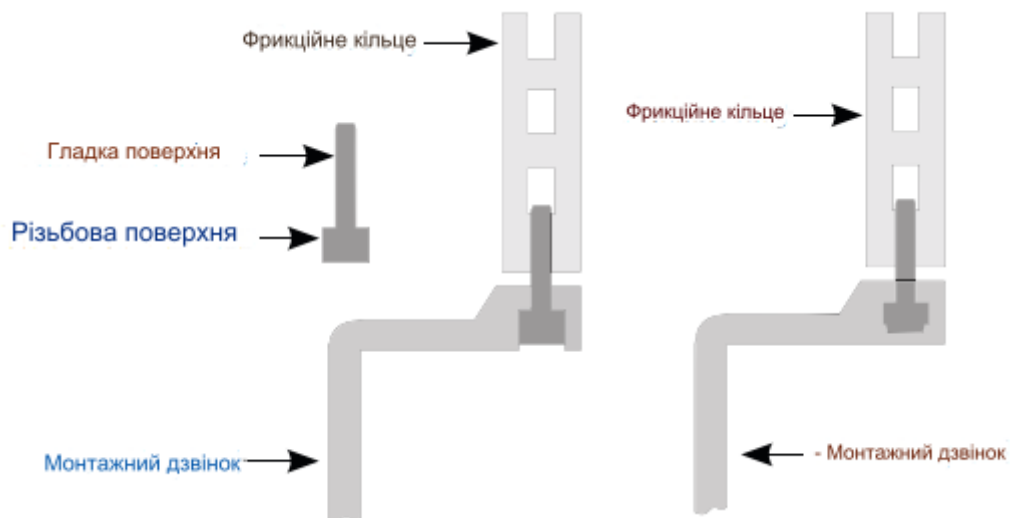


Рис. 1.3. Спрощене зображення з'єднання тертьового кільця та монтажного дзвона за допомогою з'єднувальних елементів: а) з різьбовим болтом. Б) з керамічним штифтом.

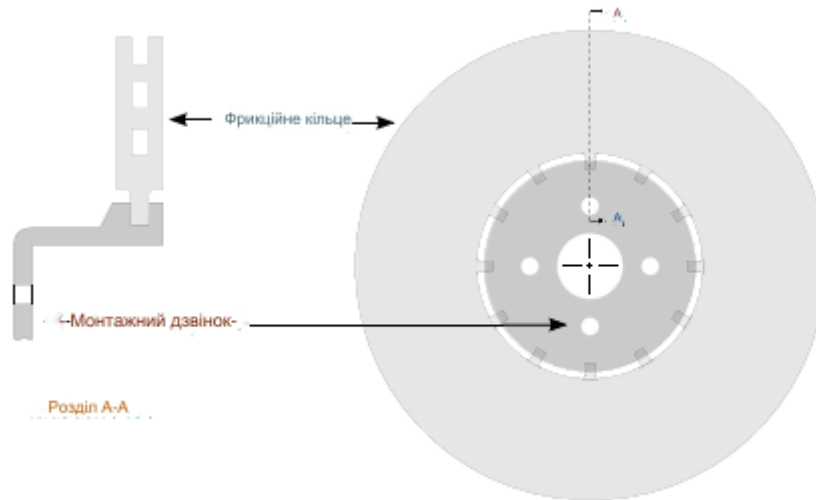


Рис. 1.4. Спрощене зображення цілісного лиття монтажного дзвона разом з тертьовим кільцем.

У вентиляваних гальмівних дисках застосовують різноманітні конфігурації перегородок і стовпців. Кожна з цих конфігурацій формує свій особливий малюнок руху повітря. Серед найпоширеніших конфігурацій на вентиляваних дисках можна виділити такі як прямі радіальні перегородки, криволінійні перегородки, алмазні та сльозоподібні стовпці (DTDP), а також дугообразні перегородки. Рисунок 1.5. демонструє три різні конфігурації, що використовуються для вентиляції. В усіх зазначених варіантах, охолоджувальне повітря потрапляє в диск на внутрішньому периметрі і виходить на зовнішньому. Основним недоліком цих конфігурацій є виникнення високих напруг біля внутрішнього периметра, що часто пов'язано з наявністю вхідних отворів. Це може стати серйозною проблемою при використанні диска у складних умовах.

Прямі радіальні перегородки представляють собою основний тип конструкції для вентиляваних дисків. Хоча вони не надто ефективні у плані охолодження, ці перегородки можуть встановлюватися на будь-якій стороні автомобіля, оскільки напрямок обертання не має значення.

Диски з криволінійними перегородками забезпечують кращий насосний ефект, ніж диски з прямими радіальними перегородками. Однак недоліком такої конструкції є необхідність використання різних дисків для правої та лівої сторони автомобіля, оскільки їх ефективність залежить від напрямку обертання.

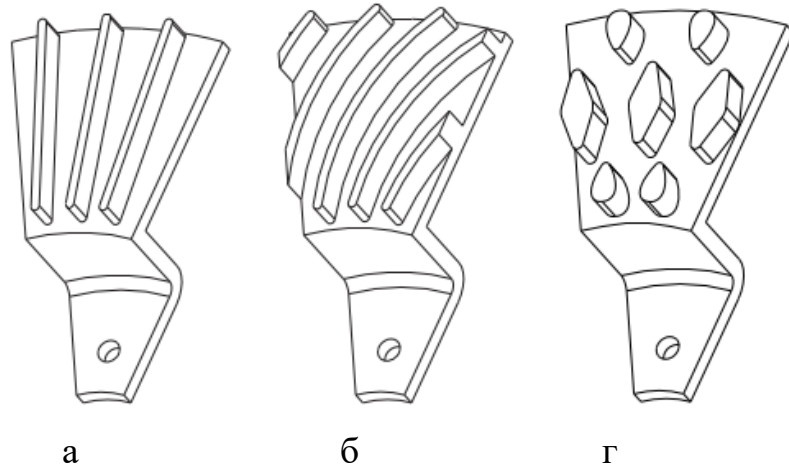


Рис. 1.5. Схематичне зображення різних конфігурацій, що використовуються для вентилюваних дисків, де показано лише  $30^\circ$  сегменти та одне кільцеве кільце, що видалено: а) пряма лопатка. б) вигнуті лопатки. г) стовпи.

В конфігурації DTDP використовуються стовпці у формі алмазу та сльози, що дозволяє регулювати їхню форму, розмір та розташування для оптимальної передачі тепла.

У цьому запатентованому дизайні охолоджувальне повітря проходить через диск на зовнішньому периметрі, як зображено на рисунку 1.6. Така конфігурація вирішує проблему недостатньої міцності диска на внутрішньому периметрі. Перегородки та стовпці розміщені таким чином, що диск можна використовувати з будь-якого боку. Шліці на внутрішньому периметрі служать для кріплення диска до ступиці колеса, зачіпляючись з аналогічними шліцями на ступиці. У деяких моделях диск може бути просвердлений або має надрізи для підвищення швидкості охолодження, однак це може спричинити зосередження напруг навколо отворів і надрізів, що створює додаткові ризики.

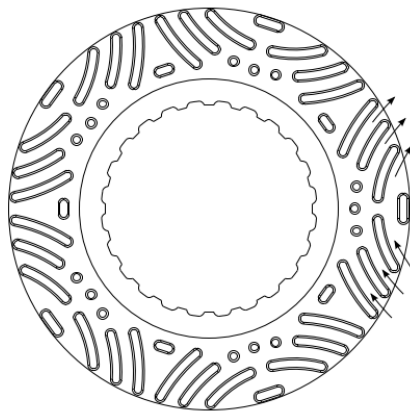


Рис. 1.6. Дизайн дугообразних перегородок, стрілки показують напрямок потоку повітря для обертання диска проти годинникової стрілки.

## 1.2 Матеріали для дисків

Різні компоненти системи дискових гальм вимагають використання різних матеріалів, вибір яких залежить від конкретного застосування та необхідних властивостей.

Для виготовлення гальмівних дисків часто використовується сірий чавун з перлітною структурою. Такий матеріал має високі ливарні та механічні якості, високу теплопровідність і теплоємність, стійкість до втрати гальмівних властивостей і є відносно дешевим.

У автомобільній промисловості існує тенденція до використання більш легких матеріалів для дисків, що допомагає знизити загальну вагу автомобіля та покращити економічність витрати палива. Також, оскільки гальмівні диски входять до складу непідвісної маси автомобіля, їх легшість сприяє підвищенню комфорту при водінні.

Один із методів зниження ваги полягає у використанні алюмінієвого монтажного дзвона та чавунного гальмівного кільця в конструкції гібридного гальмівного диска. Ці компоненти можна з'єднувати шляхом цілісного лиття чавуну з алюмінієвим дзвоном або за допомогою механічних з'єднань, таких як радіальні сталеві вставки. Гальмівне кільце з чавуну використовується через його високі тертяльні та теплові характеристики, тоді як монтажний дзвін з алюмінію дозволяє знизити загальну вагу.

Для подальшого зменшення ваги потрібно застосовувати більш легкі матеріали для виробництва гальмівних кілець, що мають відповідні властивості. Оскільки тепло виникає на поверхні диска через тертя, ідеально, щоб матеріал мав якомога менше температурне підвищення при заданому тепловому навантаженні, тобто повинен мати високу об'ємну теплоємність. Це особливо важливо під час короткочасних гальмувань, коли зберігається значна кількість тепла. При тривалих гальмуваннях також критично, щоб тепло швидко передавалося від поверхні тертя до центру диска, тобто матеріал диска повинен мати високу теплопровідність. Під час тривалих та повторюваних гальмувань важливо, щоб тепло передавалося швидше порівняно з збереженим теплом, тобто матеріал повинен мати високу теплову дифузійність.

Також бажані такі властивості як стабільність тертя, стійкість до корозії, мінімальне зношування та низький коефіцієнт теплового розширення.

Алюмінієві композитні матеріали стають альтернативою для виготовлення гальмівних кілець. Вони пропонують ефективний опір зношуванню та корозії та дозволяють істотно зменшити вагу у порівнянні з чавуном. Ці матеріали також характеризуються вищою теплопровідністю та дифузійністю, але мають недолік у вигляді вищого коефіцієнта теплового розширення порівняно з чавуном. Ще одним значним недоліком є їх обмежена термостійкість, що перешкоджає їх широкому впровадженню.

Композити на основі керамічної матриці (СМС), створені з вуглецевих волокон і карбїду кремнію, є ще одним варіантом для гальмівних дисків завдяки їхнім винятковим трибологічним властивостям у порівнянні з сірим чавуном. Їхні основні переваги включають нижчу щільність та коефіцієнт теплового розширення порівняно з чавуном, високі та стабільні коефіцієнти тертя, а також велику стійкість до фейдингу. Однак СМСs мають меншу об'ємну теплоємність, що компенсується за рахунок використання дещо більших дисків. Вони застосовуються у високопродуктивних автомобілях, але їх ціна наразі значно вища у порівнянні з чавунними дисками.

### **1.3 Постановка завдання на виконання кваліфікаційної роботи бакалавра**

З проведеного аналізу було поставлено таке завдання.

В технологічному розділі розглянути наступне. Основи тертя та зносу. Описати фізичні основи тертя та зносу. Навести приклади матеріалів з різними властивостями тертя та зносу. Трибологічна гальмівна система. Описати конструкцію трибологічної гальмівної системи. Проаналізувати принцип роботи цієї системи та її ефективність. Триботехнічні характеристики системи диск-колодка. Визначити основні триботехнічні характеристики системи диск-колодка. Провести аналіз впливу цих характеристик на продуктивність гальмівної системи. Невідповідності геометрії диска та колодки. Визначити можливі причини невідповідностей геометрії диска та колодки. Проаналізувати

вплив цих невідповідностей на роботу гальмівної системи. Вібрації та шум.  
Описати механізми виникнення вібрацій та шуму у гальмівних системах.  
Запропонувати методи зниження вібрацій та шуму.

В конструкторському розділ розглянути дослідження дискових гальм програмою COMSOL. Створити модель дискових гальм у програмі COMSOL. Провести симуляцію роботи моделі та проаналізувати результати. Симуляція роботизованої системи у SolidWorks. Створити модель роботизованої системи у SolidWorks. Провести симуляцію роботи системи та проаналізувати ефективність.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Основи тертя та зносу

Трибологічна система визначається за допомогою сил тертя та зносу на контактних поверхнях. Хоча у більшості інженерних застосувань тертя вважається небажаним, у системі гальмування воно відіграє ключову роль. Основний принцип роботи гальма базується на опорі, який створюється сухим тертям між ротором і колодкою, тому цьому аспекту приділяється значна увага.

Тертя може бути визначене як опір, що виникає при відносному ковзанні між контактуючими тілами. Навіть поверхні, які здаються гладенькими та рівними, насправді мають нерівності при детальному розгляді під мікроскопом. Ці нерівності часто являють собою виступи та западини, відомі як асперитети та долини відповідно. Коли одне тверде тіло стискається з іншим, контакт формується лише в окремих точках. Загальна площа цих точок становить фактичну площу контакту, яка, як правило, є лише малою частиною видимої площі контакту.

Точне моделювання тертя має велике значення для розуміння роботи гальмівної системи, оскільки воно суттєво впливає на її продуктивність. Мета будь-якої моделі тертя полягає в точному прогнозуванні поведінки на основі експериментальних спостережень. Хоча було запропоновано численні моделі тертя, жодна з них не отримала широкого визнання. Тому у багатьох застосуваннях все ще широко використовуються класичні столітні закони тертя.

На рисунку 3.1. показано тіло, яке ковзає по плоскій поверхні нерухомої твердої опори в напрямку  $t$  зі швидкістю  $v_t$ . Тут  $F$  є результуючою нормальною силою, яка діє від ковзаючого тіла до опори, а  $F_r$  - сила тертя. Класичні закони тертя описані так:

Сила тертя пропорційна нормальній контактній силі,

$$\|F_r\| = \mu F. \quad (2.1)$$



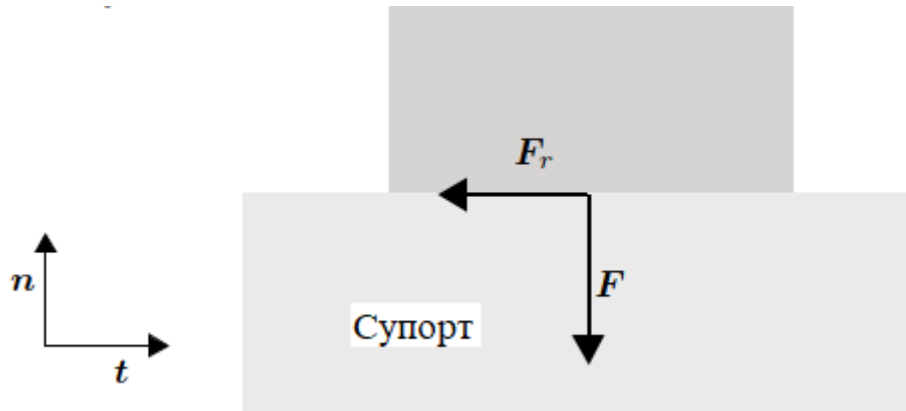


Рис. 2.1. Схема тіла, що ковзає по плоскій поверхні жорсткої опори.

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя (CoF). Перед початком ковзання він відомий як статичний коефіцієнт тертя ( $\mu_s$ ), а під час руху - кінетичний коефіцієнт тертя ( $\mu_k$ ).

Коефіцієнт тертя не пов'язаний з видимою площею контакту.

$\mu_s$  завжди вищий за  $\mu_k$ .

$\mu_k$  є незалежним від швидкості ковзання.

Коли відбувається ковзання, сила тертя працює проти напрямку руху.

$$F_r = -\mu F \frac{v_t}{\|v_t\|}. \quad (2.2)$$

Перші два закони відомі як закони тертя Амонтона, а четвертий закон називають законом тертя Кулона. У певних випадках було зафіксовано відхилення від деяких з цих законів. Реальна площа контакту майже лінійно пропорційна навантаженню. Загалом можна сказати, що тертя збільшується зі зростанням реальної площі контакту.

Сухе тертя призводить до зносу поверхонь тертьових пар. Це спричиняє утворення третього тіла та змінює топографію поверхонь тертя. Таким чином, для певної системи знос відіграє важливу роль у зміні коефіцієнта тертя (CoF). Типові механізми зносу включають: адгезію, абразію, втому, корозію, хімічний знос тощо. Для порівняння різних тертьових матеріалів у літературі часто використовується специфічна швидкість зносу, яка визначається як кількість зносу, нормована за енергією тертя.

Раніше було запропоновано багато моделей зносу, але більшість з них є специфічними для певної системи, тобто для конкретного матеріалу тертьових пар, геометрії контакту, робочих та навколишніх умов. Менг і Людема провели

грунтовний огляд моделей зносу та проаналізували їхню застосовність. На сьогодні немає моделі, яка б могла точно передбачити знос за заданих трибологічних умов і властивостей матеріалу. На практиці зазвичай використовується рівняння для узагальнення даних з експериментів зносу, і це рівняння з його параметрами може слугувати моделлю зносу. Однією з найпопулярніших моделей зносу є закон зносу Арчарда.

Згідно із законом зносу Арчарда, швидкість зносу пропорційна нормальній силі та відстані ковзання. Цей закон виражається так:

$$\Delta W = kF_s s.$$

де  $\Delta W$  - об'єм зносу,  $k$  - коефіцієнт зносу,  $F$  - прикладене навантаження, а  $s$  - відстань ковзання.

## 2.2 Трибологічна гальмівна система

Абразивний знос має ключове значення для еволюції трибологічної системи гальмівних дисків. Через різноманітність процесів зношування, фрагменти різних розмірів відокремлюються від поверхонь гальмівних колодок і дисків, подрібнюються та перетворюються на менші частинки, коли вони застрягають між сполучними поверхнями. Це суміш та окислення часток формує новий матеріал, відомий як третє тіло. Тверді фрагменти зберігають свій оригінальний розмір, у той час як м'якіші фрагменти розмелюються в крихту з дуже дрібними зернами. Деяка кількість третього тіла залишається в зоні дотику, тоді як інша частина випускається з системи. Наявність третього тіла пов'язана з підвищенням коефіцієнту тертя (CoF). У було видалено третє тіло шляхом обдування колодки, що призвело до зниження CoF. Якщо ж процедура обкатування виконується знову, що призводить до повторного формування третього тіла, CoF зазвичай знову підвищується. Загалом вважається, що через орання третього тіла CoF зростає в системі, але також може знизитися, якщо деякі частинки діють як кочені підшипники, сприяючи зменшенню тертя.

Третє тіло може включати всі компоненти тертьового матеріалу і диска, а також їхні оксиди. Крім того, його хімічний склад значною мірою залежить від умов навантаження під час недавніх гальмувань.

Консистенція третього тіла впливає на коефіцієнт тертя (CoF) в рамках даної трибологічної системи. Зокрема, переміщення окисдованих залізних частинок у тертьовий матеріал змінює CoF трибологічної системи, як це продемонстрували Северін та Дьорш. Кеммер також зазначив, що CoF має зв'язок із кількістю часток оксиду заліза у зоні контакту. Він вважав, що товщина третього тіла впливає на функціональність тертя, хоча в дослідженні Вірта та інших цього ефекту не було виявлено.

Через велику варіативність матеріалів, що застосовуються для тертьових елементів, а також через обмежені можливості спостереження під час гальмування, адже більшість опублікованих досліджень аналізують поверхні після зупинки транспортного засобу, спостерігаються розходження у думках науковців щодо розвитку контактної поверхні. Зазвичай виокремлюють два методи дослідження подій, що відбуваються на межі між колодкою та диском. Перший метод, описаний у, зв'язує ефективність гальм з утворенням, зростанням та руйнуванням контактних платформ. Як зазначає Еріксон та інші, ці платформи утворюються внаслідок видалення матеріалу, що менш стійкий до зношування, з поверхні колодки, що спричиняє безпосередній контакт більш стійких складових, зазвичай армуючих добавок, з диском. Згодом, область прямого контакту може збільшуватись завдяки ущільненню зношених часток (третього тіла) проти первинних платформ, формуючи вторинні платформи, як це показано на схемі рисунка 2.2. Ці платформи становлять приблизно 10-20% загальної видимої площі поверхні колодки. Вважається, що основне перетворення енергії відбувається саме на цих платформах. Другий метод пов'язує функціональність гальм з формуванням шарів третього тіла під час гальмування між колодкою та диском. Цей підхід базується на припущенні, що колодка та диск відділені шаром третього тіла, який складається з дрібнозернистих часток зносу та деяких більш крупних часток, як видно на рисунку 2.3.

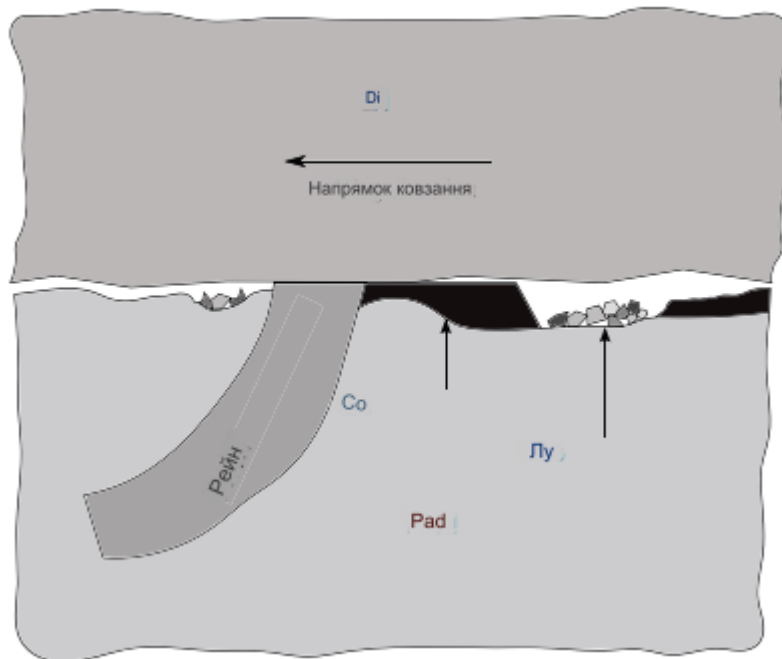


Рис. 2.2. Схематичне зображення першого підходу, що показує первинні та вторинні контактні платформи, згідно з даними.

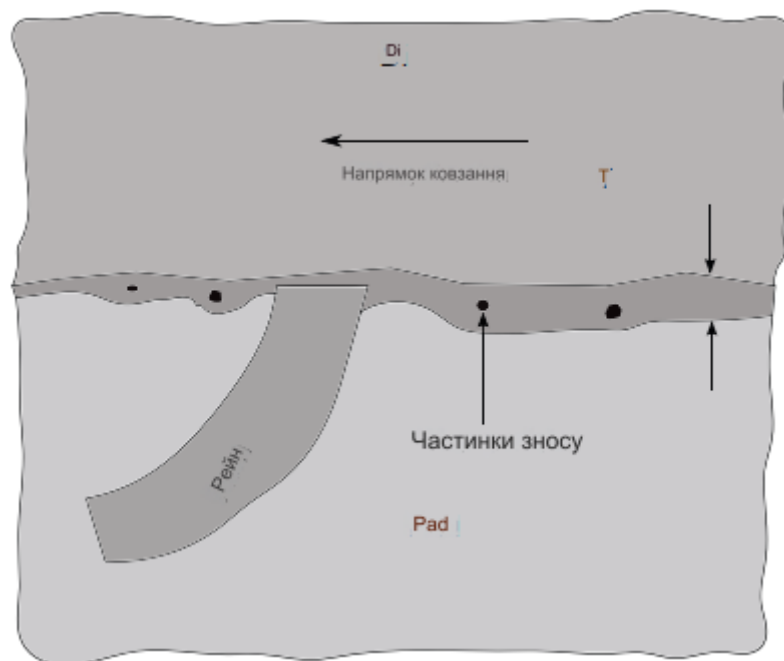


Рис. 2.3. Схематичне зображення другого підходу, що демонструє шар третього тіла між колодкою та диском, згідно з даними.

Третє тіло утворює декілька шарів на інтерфейсі, товщина яких переважно визначається температурними умовами. Ці шари фіксуються на поверхнях диска та фрикційного матеріалу. На жаль, серед науковців немає єдності стосовно термінології третього тіла на інтерфейсі. На рисунку 2.4. викладена термінологія, що застосовується в, і вона буде використовуватися у

даному тексті. Плівка на поверхні диска називається трансферною плівкою, плівка на поверхні колодки - фрикційною плівкою, а вільні частинки, що перебувають між цими плівками - фрикційним шаром. Ці плівки не слід вважати неперервними, а радше як зони, прикріплені до поверхонь. Шари третього тіла відіграють роль у запобіганні безпосереднього контакту між фрикційними партнерами та зменшують знос. Трансферна плівка може вирівнювати борозни та улоговини зносу, роблячи поверхню диска більш рівною. Однорідна трансферна плівка сприяє стабільній поведінці тертя при високих температурах.

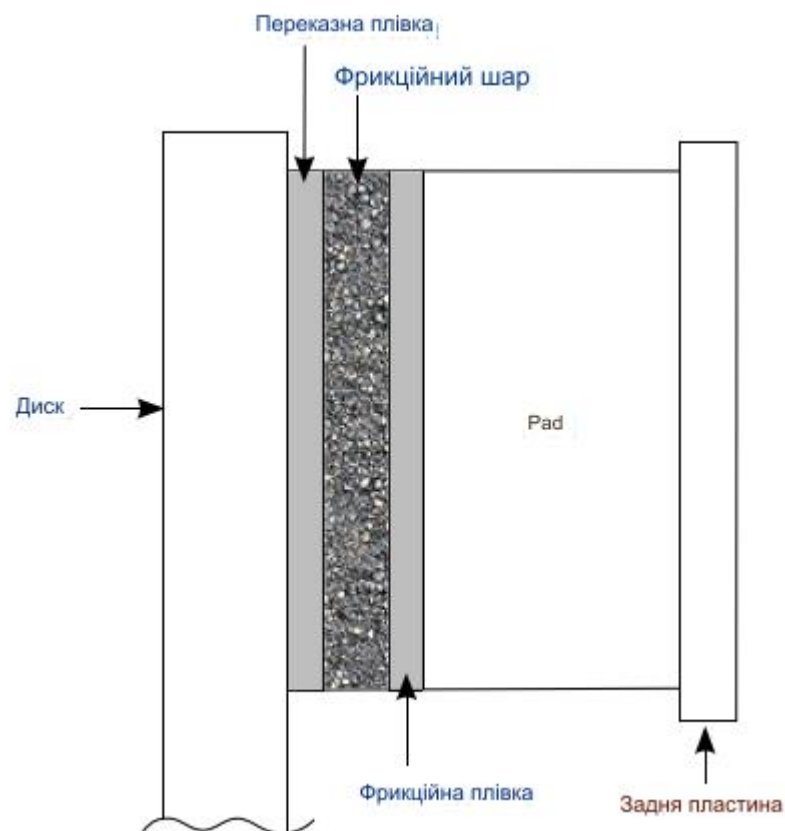


Рис. 2.4. Схематичне зображення шарів третього тіла

### 2.3 Триботехнічні характеристики системи диск-колодка

Взаємодія на межі між диском та колодкою істотно відрізняється від інших триботехнічних систем. Детальне вивчення цієї системи відбувалось на рівнях від мікро до нано. Ось декілька трибологічних особливостей системи диск-колодка, специфічних для дискових гальм, які будуть тут представлені. Огляд базується на попередньо опублікованих дослідженнях. У цих роботах

використовувались фрикційні матеріали різних складів, тому деякі описані тут феномени можуть бути не застосовними до інших матеріалів, як це зазначено в.

Нові дискові гальма зазвичай проходять процедуру притирання. Під час притирання дискового гальма виконують помірне гальмування в декількох циклах, щоб досягнути стабільного середнього коефіцієнта тертя (CoF). Цей процес також відомий як розгін, пригонка, бортування чи умовлювання. У процесі притирання нового диска спостерігається зростання середнього CoF. Поверхня нового диска має спіральний малюнок виступів, створених токарною обробкою, і коли цей виступ поступово стирається під час притирання, як це показано на схематичному малюнку 2.5, це призводить до підвищення CoF через гладшу поверхню.

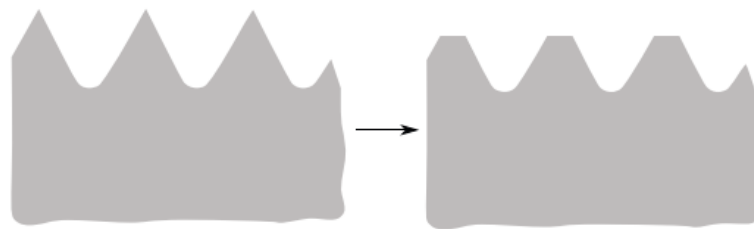


Рис. 2.5. Схематичне зображення процесу обкатування диска без показу третього тіла.

Також процес притирання колодки веде до підвищення середнього коефіцієнта тертя (CoF), як це ілюструється на рисунку 2.6. На початку відбувається стрімке зростання CoF.

Це зумовлено витісненням матеріалу колодки, що легше піддається зносу, що призводить до безпосереднього зіткнення більш зносостійких компонентів, зокрема посилювальних добавок, з диском, як показано на рисунку 2.7, які, як правило, мають вищий CoF. Ця область безпосереднього контакту називається первинною контактною платформою і знаходиться дещо вище за менш зносостійкі компоненти після деякого ковзання колодки об диск. Згодом, область безпосереднього контакту може розширюватися через утрамбування зношених часток проти первинних платформ, як демонструється на рисунку 2.7, утворюючи вторинні платформи. Формування та розширення вторинних платформ залежить від таких чинників як температура, вологість, зсувні сили та нормальний тиск. Натомість, вторинні платформи можуть руйнуватися через

різні процеси, такі як ерозія, абразивний знос чи удари по нерівностях поверхні диска. Зміни у формі та розмірах вторинних платформ можуть відбуватися з плином часу через різноманітні процеси зростання та деградації.

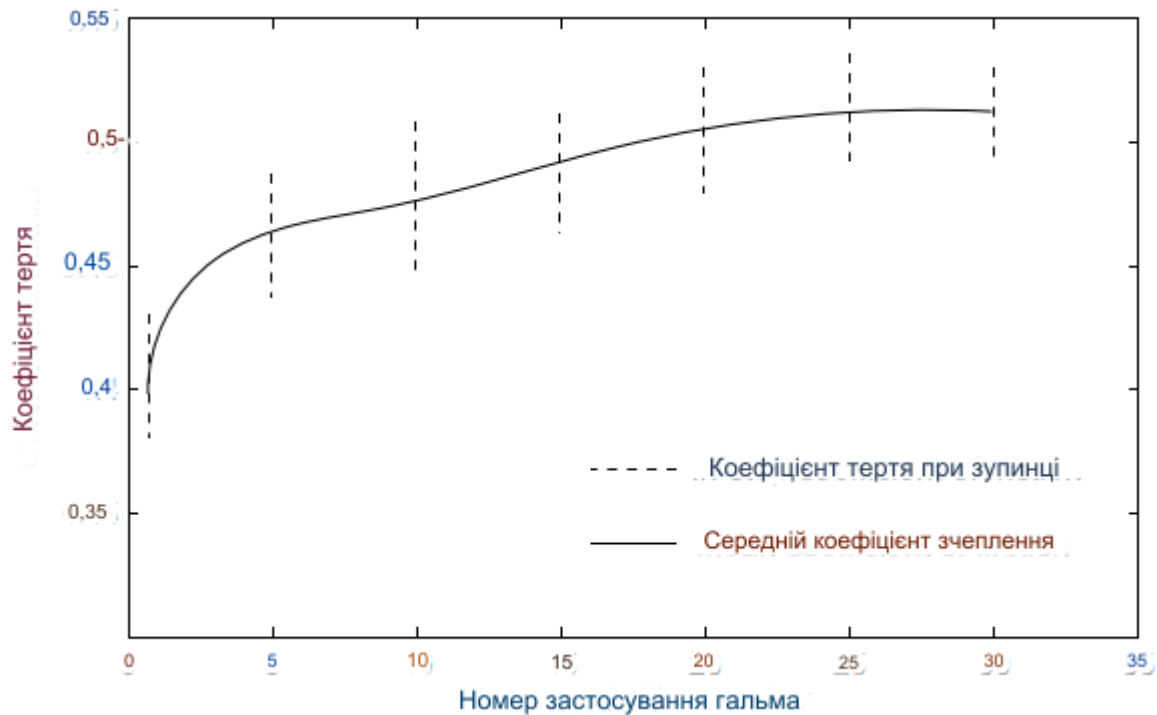


Рис. 2.6. Схематичне зображення еволюції коефіцієнта тертя під час обкатування колодки. Суцільна лінія представляє середній коефіцієнт тертя, тоді як пунктирна лінія представляє збільшення тертя під час зупинки, що демонструється лише для декількох гальмівних операцій.

Поступове збільшення  $CoF$  після спочатку стрімкого підйому може бути пояснене повільним збільшенням фактичної контактної площі завдяки формуванню та розширенню вторинних контактних платформ та вирівнюванню поверхні первинних контактних платформ внаслідок пластичного деформування та зносу. В кінці процедури притирання  $CoF$ , здається, стабілізується, що можна віднести до динамічної рівноваги між утворенням і руйнуванням областей.

Значне зростання  $CoF$  відбувається під час кожного індивідуального гальмування, як ілюструє рисунок 2.6. На початку кожного гальмування  $CoF$  є нижчим за середнє значення, зазначене на діаграмі, але до кінця він зростає до вищих значень. Така поведінка може бути обумовлена рядом чинників. Зі зростанням температури та тиску під час гальмування вторинні платформи

можуть значно розширюватись, оскільки зношені частини мають тенденцію до спікання.

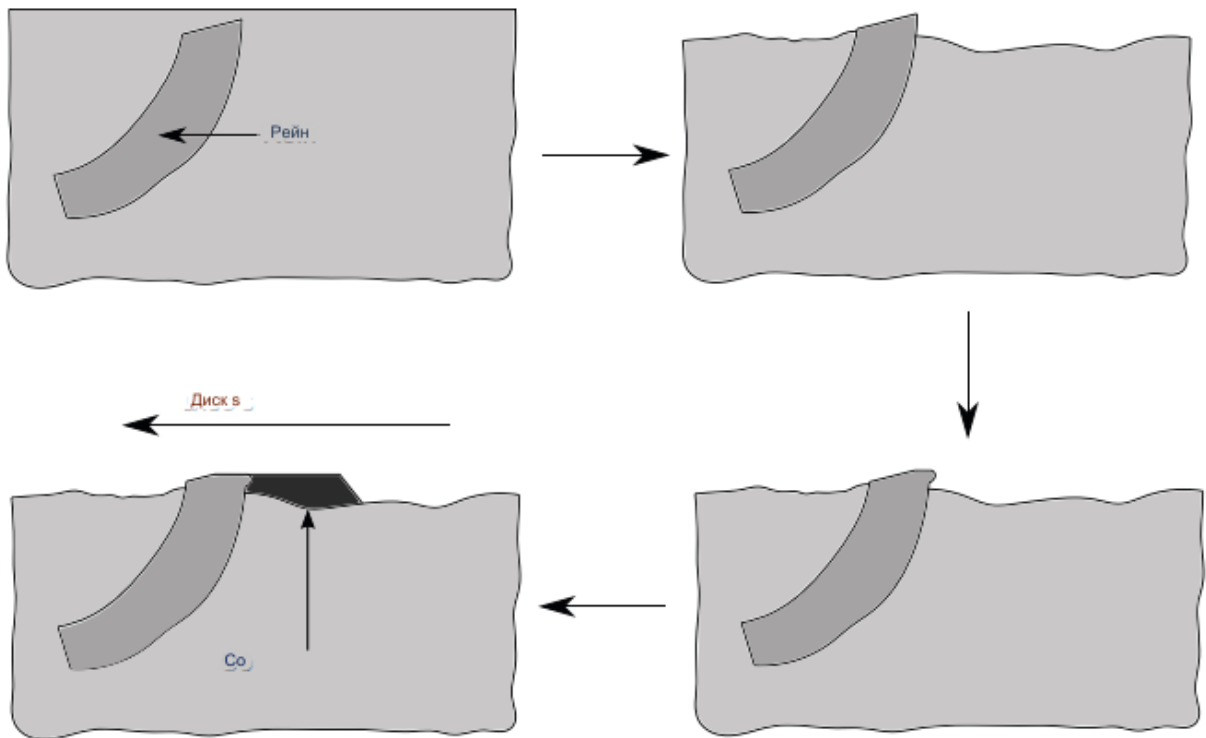


Рис.2.7. Схематичне зображення обкатування колодки, на якому показано формування первинних та вторинних платформ. Також виділено вирівнювання поверхні первинної контактної платформи через пластичну деформацію та знос.

Проте, коли навантаження знімається наприкінці гальмування, вторинні платформи руйнуються, оскільки процеси деградації переважають над процесами утворення. Ще однією причиною є зменшення швидкості під час гальмування, адже  $CoF$  зазвичай вищий при більш низьких швидкостях ковзання. Також це може бути пов'язано зі зміною положення колодки під час гальмувань. Оскільки знос колодки та диска відбувається нерівномірно, обидва компоненти частково пристосовуються один до одного. Однак колодка не зафіксована через зазор між рухомими деталями, наприклад, між основною плитою та супортом, а також через еластичні деформації різних компонентів під час роботи. Тому під час кожного гальмування відбувається невелика зміна положення та вирівнювання колодки, що призводить до зменшення фактичної площі контакту на старті. Ці зміни призводять до деякого зносу або деформації,



так що колодка та диск знову пристосовуються один до одного. Іншою причиною може бути забруднення контактних платформ, такі як окислення, коли колодка не контактує з диском наприкінці гальмування. Ці оксиди можуть діяти як мастильні матеріали, що спочатку знижує  $CoF$ , але з їх видаленням  $CoF$  зростає. Остерле і Дмитрієв вказали, що це явище не можна пояснити в контексті шару третього тіла.

Різні процеси тертя залежать від температури, вертикального навантаження та швидкості руху, тому логічно вважати, що коефіцієнт тертя (КТ) обумовлений цими параметрами. За результатами численних досліджень спостерігається залежність КТ від температури. Температурні зміни впливають на КТ різноманітних тертних матеріалів неоднаково, проте типова модель поведінки представлена на малюнку 2.8. На цьому малюнку спочатку КТ збільшується з ростом температури і, досягнувши максимуму, починає падати. Таке початкове зростання і формування піку можна віднести до в'язкоеластичності смол при підвищеній температурі. Подальше збільшення температури під час гальмування може спричинити значне зростання другорядного плато через більшу схильність зношених частин до спікання [45], що позитивно впливає на КТ.

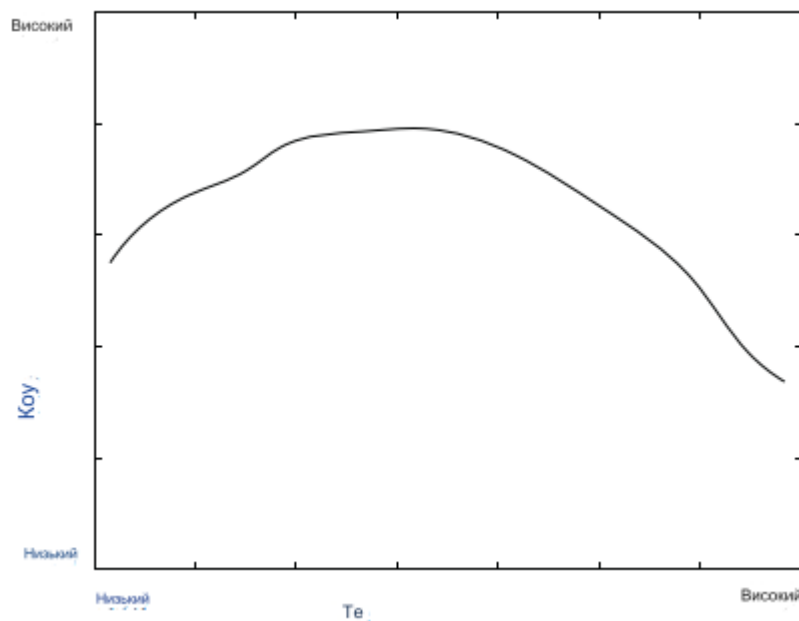


Рис. 2.8. Схематичне зображення залежності коефіцієнта тертя від температури.

На подальше падіння КТ впливає термічне руйнування смоли, арамідних волокон та часток кеш'ю тощо. Таке руйнування може також спричинити

розрив і відокремлення волокон (основні контактні поверхні), що негативно впливає на КТ. В цілому, можна стверджувати, що при високих температурах міцність матеріалів на зсув знижується, внаслідок чого КТ також знижується.

В контексті утворення третьої шаруватої структури, було виявлено, що така структура, що формується при високій температурі, має значну товщину (хоча деякі дослідження вказують на зворотнє зменшення товщини при підвищених температурах) та багатошаровість. Простота зсуву цих шарів по їх межах веде до зниження коефіцієнта тертя (КТ). Ще одним фактором, що може сприяти зменшенню КТ, є наявність тонкої карбонової плівки на інтерфейсі, яка виступає як мастило та полегшує зсув між шарами.

В ряді досліджень було доведено, що КТ залежить від сили гальмування та швидкості. В більшості з них КТ зменшується зі зростанням швидкості, одночасно демонструючи неоднозначні результати з підвищенням навантаження. Збільшення сили гальмування призводить до пружного стискання колодки, що моментально веде до розширення реальної площі контакту для активованих контактних плато, а також збільшення числа активних контактних плато. Також повільне збільшення реальної площі контакту сприяє утворенню та розвитку вторинних контактних плато і вирівнюванню поверхні первинного контактного плато внаслідок пластичної деформації та зношування. Таке збільшення реальної площі контакту зумовлює зростання тертя при збільшенні сили гальмування.

Загалом, зниження КТ при вищих швидкостях може бути пояснене наступним чином: через більшу швидкість зменшується час для контакту між асперитетами, а отже й час для їх деформації, що веде до зменшення реальної площі контакту. Таке зменшення реальної площі контакту спричиняє пониження КТ.

## **2.4 Невідповідності геометрії диска та колодки**

Можливі численні джерела геометричних невідповідностей або дефектів у диску та колодці. Деякі з них залишаються стабільними, інші є випадковими. Стабільні невідповідності зберігаються навіть після охолодження деталі до

кімнатної температури, тоді як випадкові зникають. Нижче буде розглянуто кілька основних видів невідповідностей. Варто зазначити, що різні невідповідності можуть перетинатися, утворюючи складні динамічні форми.

Конусоподібне зміщення та складання диска. Внаслідок тепловиділення на межі, окрім місцевих змін контактних поверхонь, спостерігаються загальні деформації в диску та колодці. Завдяки різноманітним геометричним формам дисків, кожен має свої особливі обмеження для термічного розширення. Таким чином, деформації можуть виявлятися в різних виглядах на різних дисках. Деякі з найпоширеніших термічних деформацій включають конусоподібне зміщення та складання, як показано на малюнку 2.9.

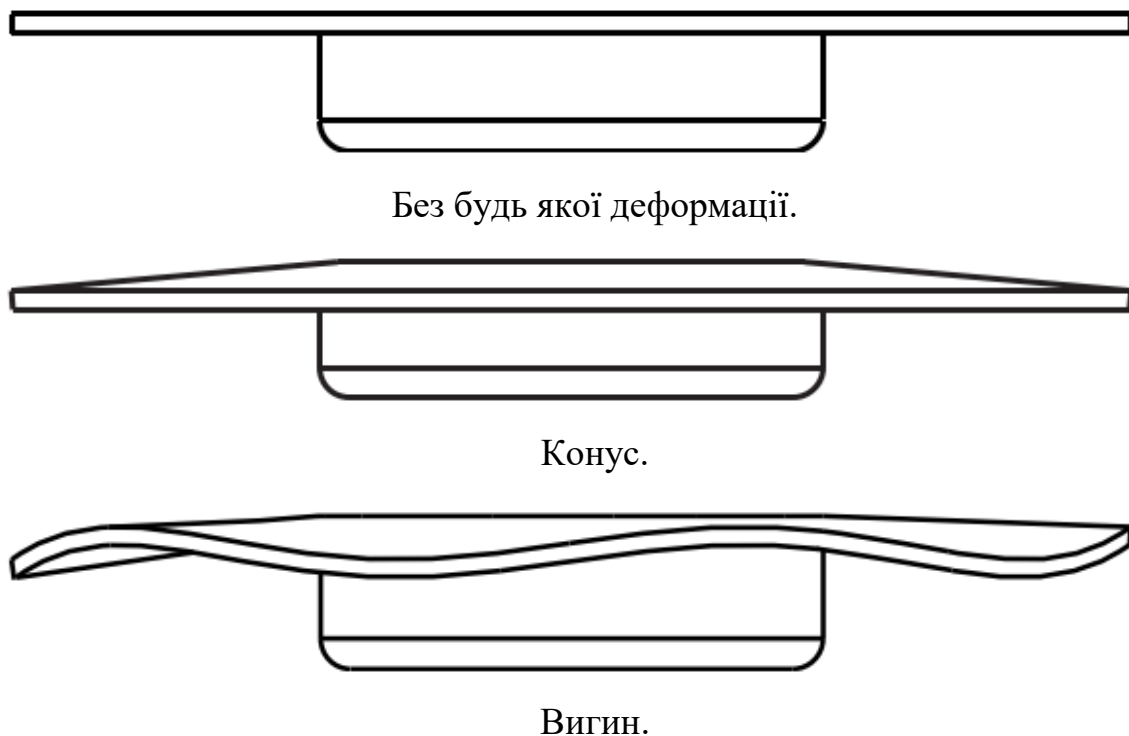


Рис. 2.9. Схематичне зображення конусоподібного зміщення та складання гальмівного диска.

Конічне викривлення диска трапляється через різне теплове розширення зовнішньої та внутрішньої сторін, при цьому зовнішня сторона є нерозривно пов'язана з кріпильним дзвоном, що обмежує її розширення, як показано на рисунку 2.10.

У дослідженні тонкостінних дисків, яке провели Девіс та співавтори, виявлено, що при нагріванні диска до критичної середньої температури можливе його вигинання. Вигинання гальмівного диска можна пояснити

наявністю порівняно вищих температур біля країв диска порівняно з областю біля кріпильного дзвона. Це веде до більшого розширення матеріалу біля країв у радіальному та окружному напрямках.

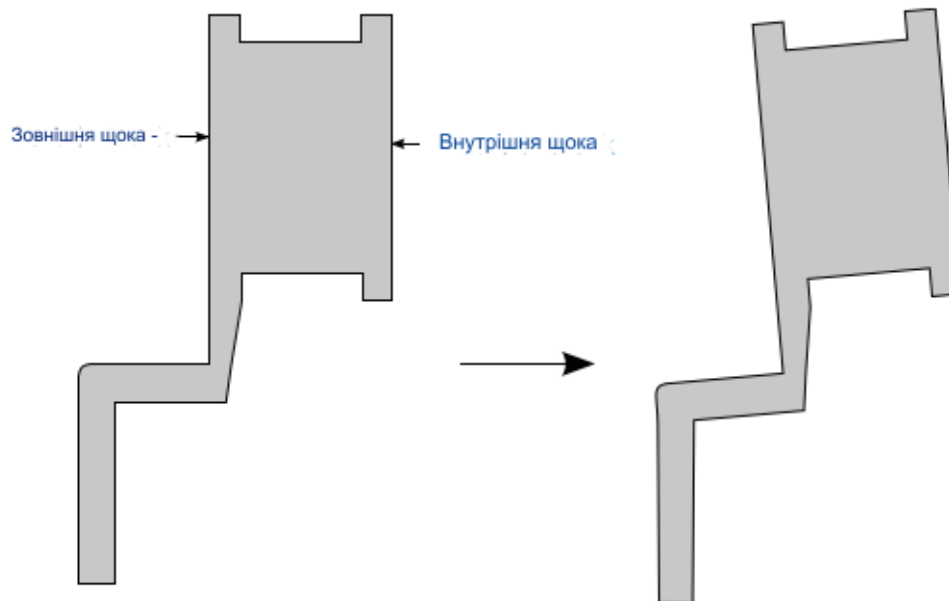


Рис. 2.10. Переріз спрощеного диска, що підкреслює конусоподібне зміщення диска через геометричні обмеження.

Однак, через закриту форму диска розширення в окружному напрямку обмежене, тому він вигинається, щоб компенсувати розширення матеріалу. Крім того, тепловий момент виникає, якщо температурний розподіл несиметричний відносно середини диска, що може спричинити вигинання. Тепловий момент зникає, якщо вироблення тепла і геометрія диска симетричні відносно його середини. Довжина хвиль складок може змінюватись для конкретного диска, як показано на рисунку 2.11. Вона залежить від багатьох чинників, один з яких - температурний градієнт між тертим кільцем і кріпильним дзвоном. Паньє та інші зазначали, що це також може залежати від співвідношення середнього обхвату диска до довжини контакту між колодкою та диском. Якщо температури не дуже високі, під час вигинання виникають лише пружні деформації, і диск повертається до своєї первісної форми (не враховуючи знос) після охолодження до кімнатної температури. Але якщо температури перевищують критичний ліміт, може відбутися пластична деформація, і тоді диск буде схильний до подальшого складання в майбутньому

у тому ж місці, тобто утворення впадин і гребенів відбуватиметься у тих самих місцях.

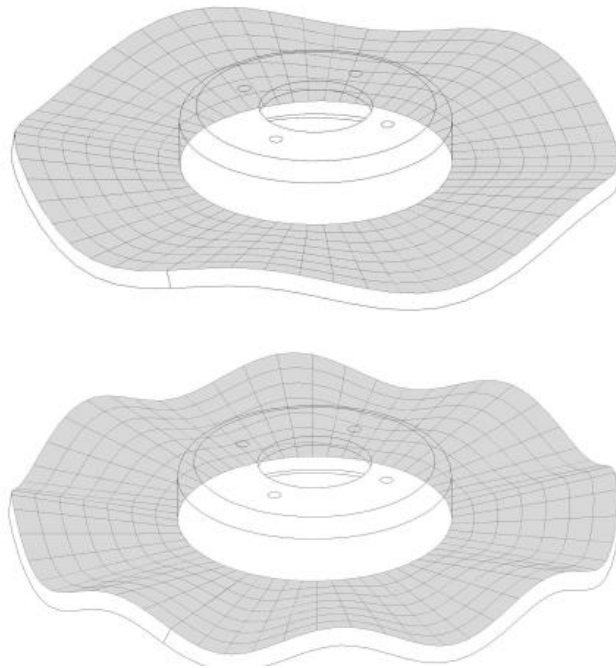


Рис. 2.11. Схематичне зображення різних довжин хвиль для гальмівного диска.

У ідеальному випадку поверхня тертя диска повинна бути абсолютно рівною і перпендикулярною до осі обертання, проте можуть виникати відхилення від цієї ідеальної ситуації, які називаються робочим боком або, точніше, осьовим робочим боком. Це відхилення зазвичай вимірюється шляхом визначення різниці між найвищими і найнижчими точками на поверхні диска. На рисунку 2.12 схематично показано стан робочого боку диска. Диски комерційних транспортних засобів можуть мати біговий бік навіть у новому стані, що може бути спричинено недостатнім зняттям напруги під час лиття. Крім того, вигин диска, описаний у попередньому розділі, також проявлятиметься як робочий бік. Однією з причин робочого боку може бути деформація диска через нерівномірне затягування болтів під час встановлення. Іншою причиною може бути наявність пилу або іншого забруднення на монтажній поверхні під час встановлення диска. Постійні деформації можуть виникнути також тоді, коли залишкові напруги в диску, що виникли в результаті процесу лиття, знімаються при високих температурах диска. У дослідженнях, було показано за допомогою методу нейтронної дифракції, що середні залишкові напруги зменшуються після термічної обробки чавунного

диска. Також показали, що диск без термічної обробки, підданий високій температурі, має біговий бік більш ніж у два рази більший, ніж у термічно обробленого диска.

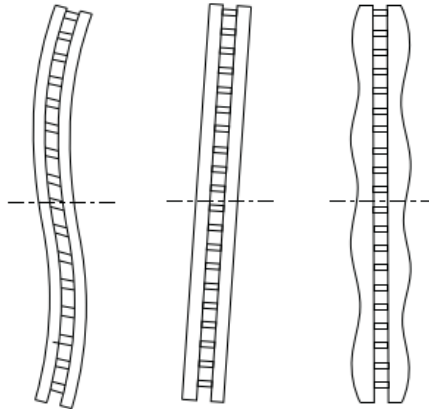


Рис. 2.12. Схематичне зображення варіації товщини диска (праворуч) і бігового боку диска (ліворуч і посередині).

В іншому дослідженні, проведеному, за допомогою чисельного моделювання було показано, що залишкові напруги існують після лиття та механічної обробки диска.

У ідеальному випадку диск повинен мати рівномірну товщину по всій площині, але на практиці може виникати нерівномірність товщини, що називається варіацією товщини диска (DTV). На рисунку 2.12 схематично показано DTV диска. Існує безліч причин, що можуть спричинити DTV.

Диски комерційних транспортних засобів можуть мати варіацію товщини навіть у новому стані. Крім того, після появи бігового боку на диску, утворюються ділянки, де колодка не буде контактувати, і в інших зонах тиск контакту буде вищим за середній. Через цей високий контактний тиск генерується більше тепла, і як наслідок, матеріал у цих зонах більше розширюється. Це призводить до варіації товщини диска, яка може зникнути після охолодження диска та повернення до його початкової форми. Водночас знос відіграє свою роль, видаляючи матеріал з поверхні диска там, де контактний тиск і температура є відносно вищими, що спричиняє постійну варіацію товщини. Крім того, якщо температура чавунного диска перевищує  $700^{\circ}\text{C}$  ( $738^{\circ}\text{C}$  за даними) і потім швидко охолоджується, матеріал може перейти у фазу мартенситу. Через відносно більший об'єм мартенситу порівняно з

перлітом, диск може локально збільшуватися, що призводить до варіації товщини, яка залишається навіть після охолодження. Розвиток нерівномірної перехідної плівки на поверхні диска також може спричинити варіацію товщини.

Теплова деформація гальмівної колодки. У науковій літературі глобальна теплова деформація гальмівної колодки часто називається опуклим вигином, що призводить до зменшення площі контакту в центрі колодки, як показано на рисунку 2.13. Тертя на контактному інтерфейсі швидко підвищує температуру поверхні колодки порівняно з внутрішньою частиною колодки та опорною пластиною. В результаті, поверхня розширюється більше, ніж внутрішня частина колодки та опорна пластина, що викликає опуклий вигин.

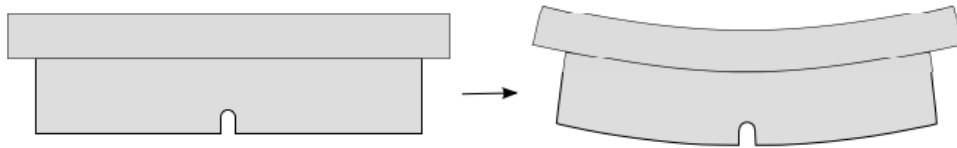


Рис. 2.13. Спрощене зображення опуклого вигину гальмівної колодки.

Тріщини на диску. В умовах інтенсивної експлуатації на поверхні диска можуть утворюватися макротріщини в радіальному напрямку. У багатьох попередніх дослідженнях, таких як, було показано, що під час різкого гальмування на поверхні диска виникають високі стискаючі напруги в окружному напрямку, що спричиняють пластичну деформацію. Однак при охолодженні диска ці стискаючі напруги перетворюються на розтягувальні напруги. При повторному гальмуванні ці цикли напруг з високими амплітудами можуть спричинити утворення тріщин від малоциклової втоми після кількох циклів гальмування. Наявність залишкових розтягувальних напруг на поверхні диска, використовуючи метод буріння отворів зі стрейнгейджами.

## 2.5 Вібрації та шум

Тремтіння є низькочастотною примусовою структурною вібрацією, що виникає внаслідок збудження на контактній поверхні між диском і колодкою. Шум, що супроводжує цю вібрацію, називається гулом. Ця примусова вібрація зазвичай спричинена геометричними відхиленнями диска та змінами коефіцієнта тертя. Частота тремтіння пропорційна швидкості обертання колеса,

тому її часто виражають як кратну швидкості колеса. Наприклад, тремтіння другого порядку означає, що частота тремтіння вдвічі перевищує кількість обертів колеса за секунду. Верхня межа частоти тремтіння залежить від максимальної швидкості колеса та порядку тремтіння (зазвичай менше 1000 Гц). Тремтіння передається на кузов автомобіля і може відчуватися водієм через педаль гальма, рульове колесо або підлогу.

Гаряче тремтіння, або термічне тремтіння, можна описати як тремтіння, викликане тепловими факторами. Воно виникає через тимчасові геометричні відхилення диска під час підвищення температури і зникає після охолодження диска та усунення цих відхилень. Причиною цього є високе теплове навантаження на гальмо за короткий проміжок часу, що призводить до термоеластичної деформації та, зрештою, до термоеластичних нестабільностей у вигляді гарячих точок.

Холодне тремтіння. Це тремтіння викликане постійними геометричними нерівностями диска. Воно може виникати навіть на початку гальмування, коли диск ще не нагрітий.

Зазвичай тремтіння включає як гаряче, так і холодне тремтіння. Через це їх важко розрізнити, і така класифікація може викликати плутанину.

Скрип це високочастотна вібрація ( $> 1000$  Гц ) компонентів гальмівної системи під час гальмування, яка в основному виникає через резонанс. Вона спричиняє шум, що є неприємним для пішоходів і пасажирів транспортного засобу. Ці вібрації поширюються через повітря, а не через конструкцію транспортного засобу. Найбільша проблема в дослідженні скрипу гальм полягає в його нестабільному характері, тобто скрип гальм іноді може бути нерепродуктивним.

Гальмівна система може скрипіти на різних частотах, які часто відповідають власним частотам її компонентів. Точніше, скрип з'являється у вузьких частотних діапазонах через змінні умови, такі як температура та тиск, які можуть змінювати модальні характеристики компонентів гальм. Ці частоти не залежать від швидкості транспортного засобу, але залишаються постійними для конкретної гальмівної системи.



Скрип гальм є складним явищем. Незважаючи на значний прогрес у розумінні механізмів, що викликають скрип гальм, все ще немає повного розуміння причин цього шуму. У спільноті, яка займається дисковими гальмами, нині загальноприйнятою є думка, що скрип виникає через нестабільність, викликану силами тертя, що призводять до самозбуджених вібрацій. Існує кілька запропонованих пояснень щодо початку цієї нестабільності. Їх можна класифікувати наступним чином.

Зменшення  $\mu_k$  із зростанням  $v_t$ . Було висунуто припущення, що однією з необхідних умов для виникнення нестабільності є зниження  $\mu_k$  зі збільшенням  $v_t$ .

Ця теорія передбачає, що скрип виникає через нестабільні коливання в системі, які спричинені змінами сили тертя внаслідок змін нормальної сили. Таким чином, ця теорія може бути застосована навіть тоді, коли коефіцієнт тертя залишається незмінним.

Історично склалося так, що для спрощення моделювання дискових гальм контактні сили не розглядалися як рухоме навантаження через низьку швидкість обертання диска. Це рухоме навантаження діє в різних місцях у різний час, що може спричинити нестабільність, яка призводить до скрипу, навіть якщо сила залишається постійною. Змоделювали скрип гальм як проблему рухомого навантаження і передбачили нестабільні частоти, які добре збігалися з експериментально виявленими частотами.

Модальний зв'язок. Ця теорія стверджує, що скрип виникає через нестабільні резонанси, спричинені силою тертя між диском і колодками. Вона пояснює, що скрип з'являється внаслідок взаємодії мод компонентів гальмівної системи, які мають близькі частоти.

Удари. Ця теорія стверджує, що повторні удари колодки по диску можуть викликати його вібрацію. Такі удари можуть виникати через коливання колодок внаслідок геометричних відхилень диска. Зазначається, що шліфування поверхонь диска вважається ефективним засобом проти скрипу гальм, що можна пояснити теорією ударів, оскільки шліфування зменшує геометричні відхилення та робить поверхню більш гладкою. Також у повідомляється, що колодки з великою кількістю малих плато створюють більше скрипу, ніж

колодки з меншою кількістю великих плато, що може бути пов'язано з теорією ударів.

На сьогодні зниження  $\mu_k$  із збільшенням  $v_t$  та sprag-slip більше не вважаються реальними механізмами, що спричиняють скрип гальм.

Тема скрипу гальм представлена великою кількістю наукових публікацій. Дослідники використовували різні експериментальні та обчислювальні методи для вивчення цього явища. Перші спроби зрозуміти механізм скрипу за допомогою обчислювальних методів були спрямовані на розробку моделей з кількома ступенями свободи, відомих як мінімальні моделі або моделі зосереджених параметрів. Ці моделі були розглянуті в роботах. Останнім часом метод скінченних елементів, який створює моделі з великою кількістю ступенів свободи, набув популярності. На відміну від мінімальних моделей, метод скінченних елементів дозволяє точно відтворювати складні геометрії та граничні умови. Одним із ранніх застосувань методу скінченних елементів було визначення мод і власних частот гальмівних дисків.

Ще одним рішенням для придушення скрипу є використання ламінованих прокладок, які кріпляться до задньої пластини гальмівної колодки. Ці прокладки збільшують модальне демпфірування системи, що зменшує схильність до виникнення скрипучого шуму.

### 3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Дослідження дискових гальм програмою COMSOL

Симуляція показує процес перетворення кінетичної енергії у теплову та її відведення в дискових гальмах. Коли гальма зменшують швидкість автомобіля, вони перетворюють кінетичну енергію на теплову енергію, що спричиняє інтенсивне нагрівання гальмівного диска. У разі перегріву дисків, гальмівні колодки можуть втратити ефективність, що може викликати пошкодження або витончення гальмівних дисків.

Дискові гальма складаються із ротора та супорта. Супорт виштовхує гальмівні колодки, які тиснуть на поверхню ротора.

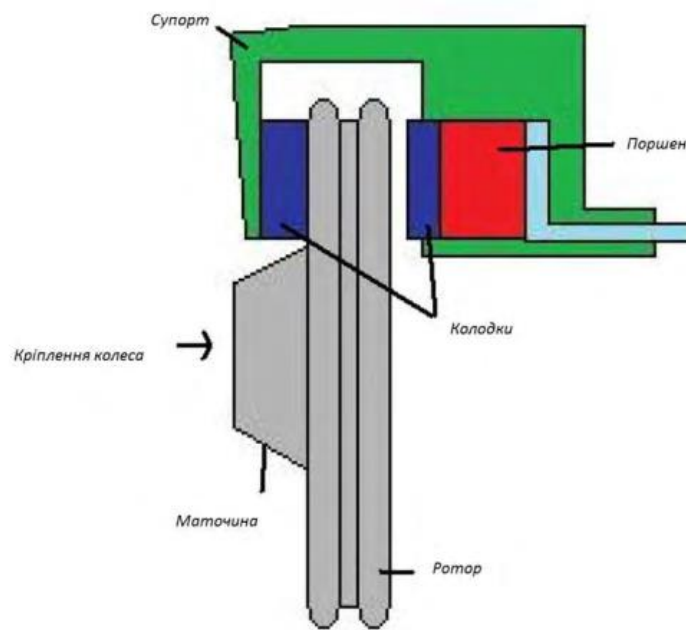


Рис. 3.1. Зажим гальмівного механізму.

Температурний розподіл колодки та диска контролюється зпри допомогою формули теплопередачі.

$$p \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = -p \cdot C_p \cdot u \cdot \nabla T. \quad (3.1)$$

Вироблення тепла визначається за допомогою формули

$$q(r \cdot t) = -f_t \cdot v_d(r \cdot t) = -\frac{mR\alpha}{8r_m A} \cdot rw(t). \quad (3.2)$$

Розсіювання тепла з поверхні диску та колодки в атмосферу відбувається за допомогою конвекції та радіації.

$$q_{diss} = -h \cdot (T - T_{ref}) - \varepsilon \cdot \sigma (T^4 - T_{ref}^4). \quad (3.3)$$

$$h = \frac{0.037 \cdot k}{l} \cdot R_e^{0.8} \cdot P_r^{0.33} = \frac{0.037 \cdot k}{l} \cdot \left( \frac{p \cdot l \cdot V}{\mu} \right)^{0.8} \cdot \left( \frac{C_p \cdot \mu}{\mu} \right)^{0.33}. \quad (3.3)$$

Гальмівна система містить дві колодки та роторний диск, які з'єднані болтами та валовою секцією.

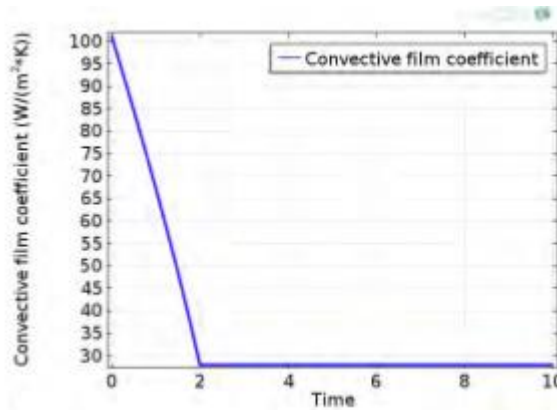


Рис. 3.2. Коефіцієнт тепловідведення під час процесу гальмування.

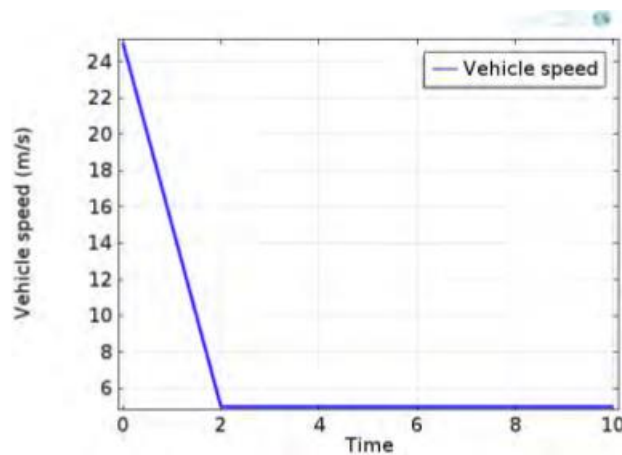


Рис. 3.3. Темп під час фази гальмування та розкриття колодок

При експерименті один автомобіль масою 1900 кг рухається зі швидкістю 25 м/с (90 км/год) і зменшує швидкість до 5 м/с (18 км/год) протягом 2 секунд, протягом яких колодки тиснуть на дискову поверхню. Після відпускання колодок автомобіль продовжить рухатися зі швидкістю 5 м/с наступні 8 секунд.

На зображенні 3.5 представлені внутрішня та зовнішня сторони гальмівного диска через 2 секунди гальмування. З моделі видно, що найвища температура зафіксована на контактних зонах між колодкою та диском.

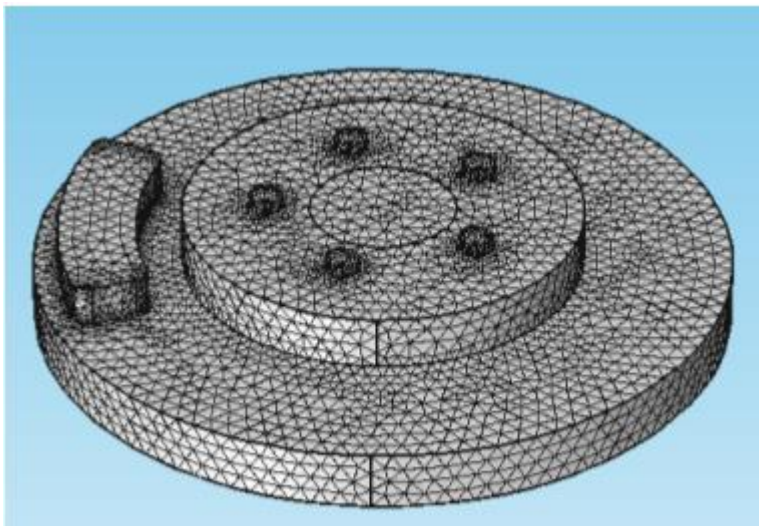


Рис. 3.4. Мережа гальмівного диска в програмі Comsol

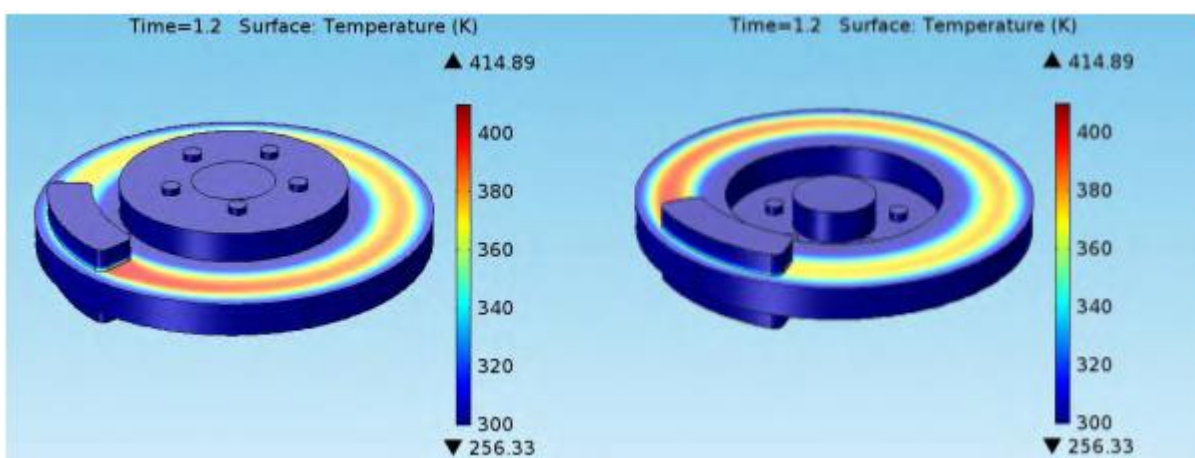


Рис. 3.5. Внутрішня та зовнішня сторона гальмівного диска.

На ілюстрації 3.6 зображено, що під час фази гальмування тепло, утворене від тертя, переважно вбирається диском ротора, а потім поступово відводиться в атмосферу через конвекцію та випромінювання.

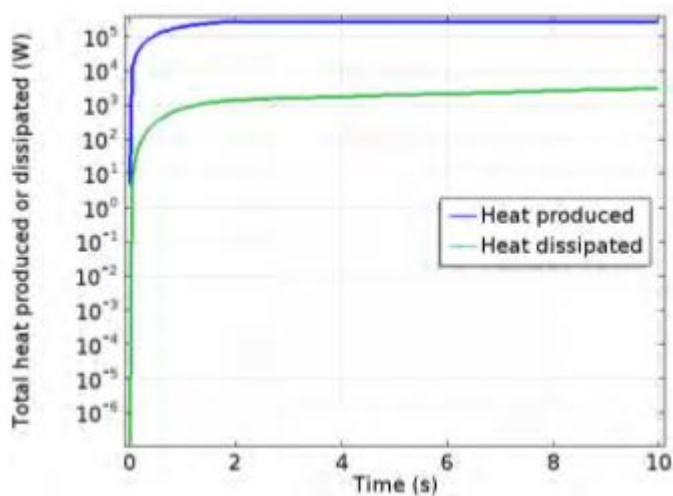


Рис. 3.6. Виникнення розтікання теплоти.

Відведення тепла в навколишнє середовище здебільшого відбувається за допомогою конвекції.

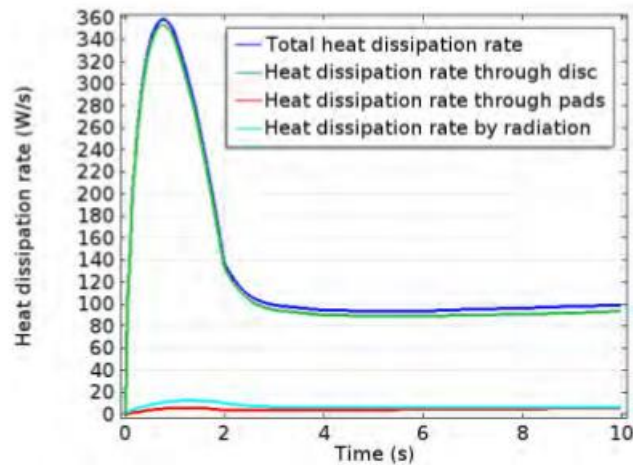


Рис. 3.7. Швидке відведення теплоти.

У процесі гальмування температура поверхні ротора є вищою, порівняно з моментом, коли колодки не стискаються. Це спричиняє інтенсивне відведення тепла через конвекцію та радіацію протягом перших 2 секунд. Висока інтенсивність тепловіддачі також корелює з підвищеним коефіцієнтом теплопередачі, що сприяє ефективній конвективній теплопередачі.

На ілюстраціях 3.8 - 3.12 показано процес нагрівання та охолодження поверхні диска в різні моменти часу та зміни температури. Поверхня ротора швидко нагрівається до максимальної температури 414 кельвінів протягом 1.2 секунди, а далі температура знижується до 384 кельвінів за 2 секунди, у момент сповільнення ротора. Ротор продовжує охолоджуватися після припинення гальмування. Максимальні температури ротора за різні часові інтервали.

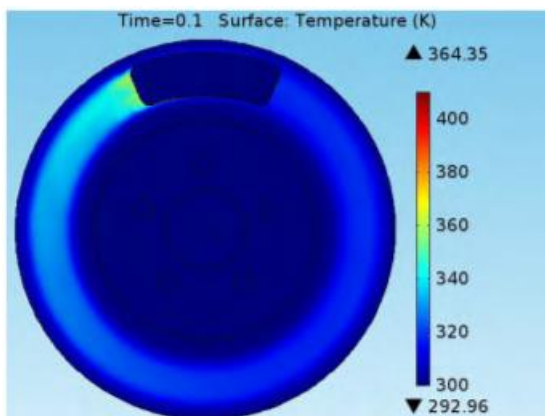


Рис. 3.8. Температура через 0,1 секунди

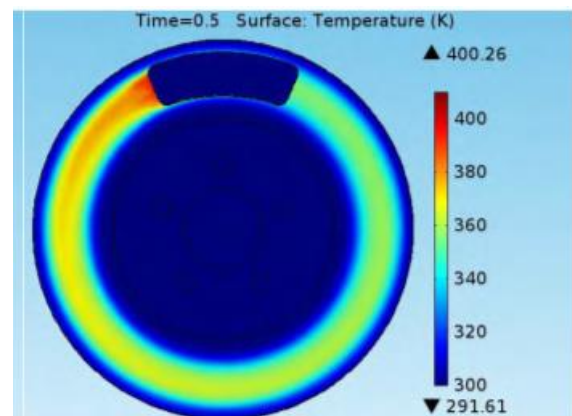


Рис. 3.9. Температура через 0,5 секунди

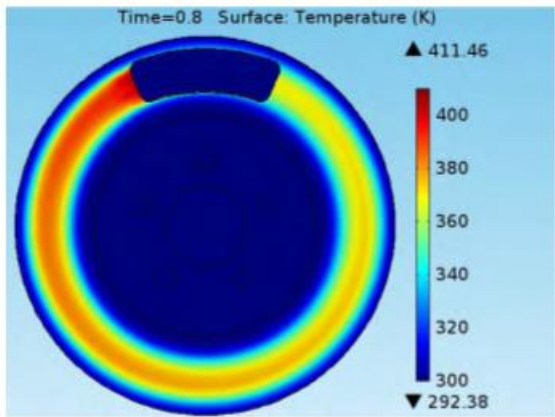


Рис. 3.10. Температура через 0,8 секунди

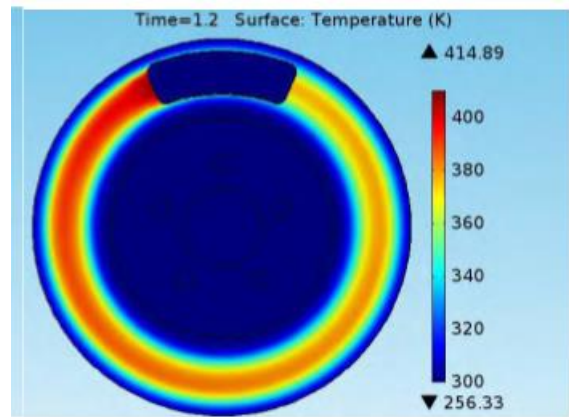


Рис. 3.11. Температура через 1,2 секунди

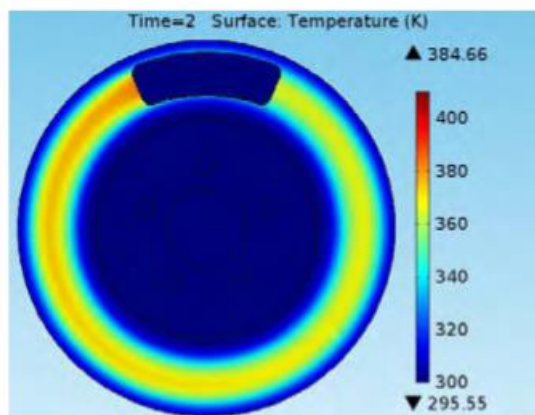


Рис. 3.12. Температура через 2 секунди

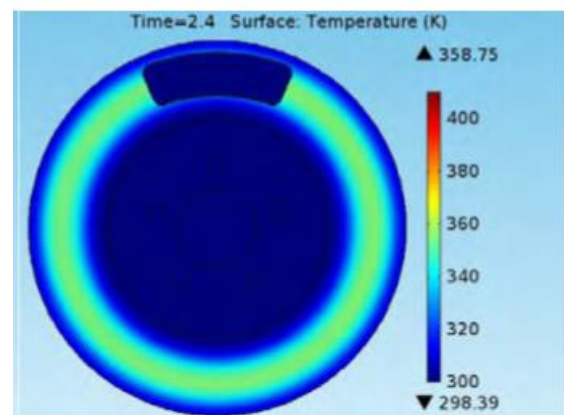


Рис. 3.13. Температура через 2,4 секунди

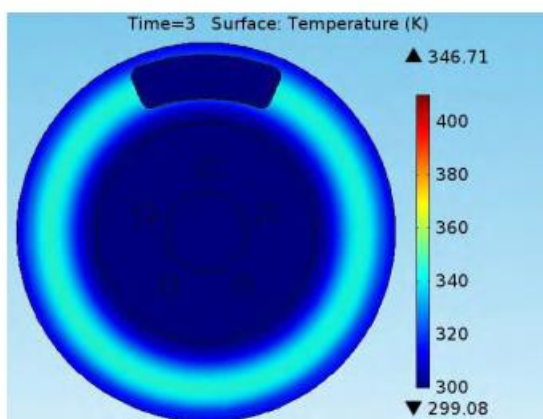


Рис. 3.14. Температура через 3 секунди

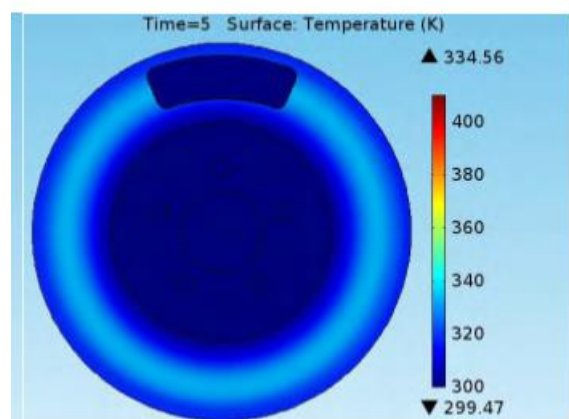


Рис. 3.15. Температура через 5 секунди

Вплив тривалого гальмування і початкової швидкості на пікову температуру контактної поверхні (рис. 3.16). Відведення тепла за допомогою радіації зростає через збільшення температури на поверхні контакту (рис. 3.17), під час зменшення швидкості з 35 м/с до 5 м/с протягом 2 секунд.

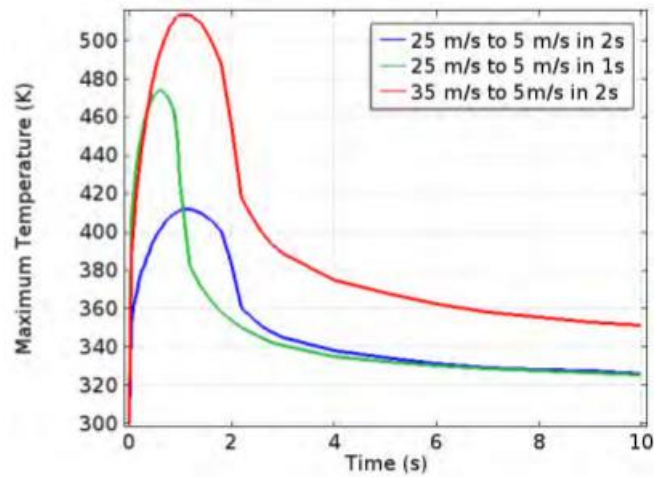


Рис. 3.16. Вплив часу гальмування і початкової швидкості.

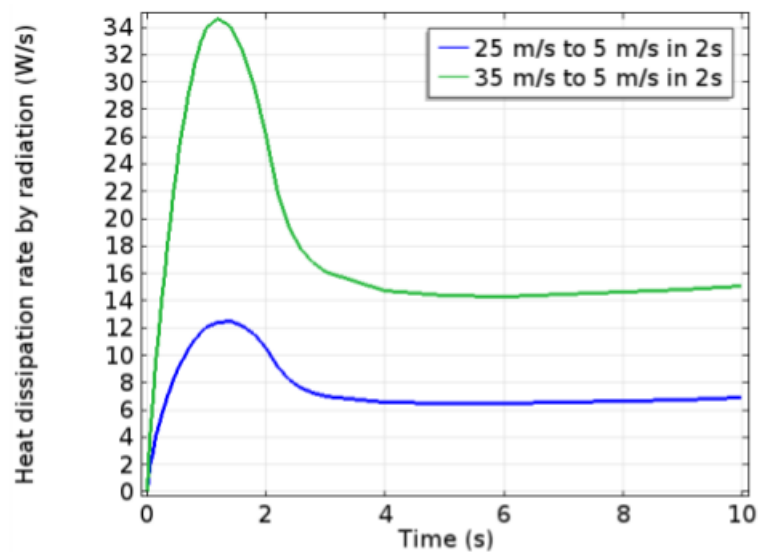


Рис. 3.17. Відведення тепла.

У цьому досліді за допомогою COMSOL Multiphysics було здійснено транзитний термічний аналіз дискових гальм під час активації та відпускання гальмівних колодок. У секції досліджено ефект теплопередачі на компоненти ротора, колодок, болтів та осі, включно з конвекційним охолодженням поверхонь колодок і диска та радіацією з цих поверхонь. Виявлено, що основна частина тепла передається через теплопровідність до ротора диска під час гальмування. Тепло також віддаляється з поверхні диска за допомогою конвекції. Демонструється також вплив тривалості гальмування та початкової швидкості на найвищу температуру контактної поверхні. Зазначено, що інтенсивне гальмування може призвести до збільшення температури.



### 3.2 Симуляція роботизованої системи у SolidWorks

Схема функціонування представляє собою порядок дій системи. За допомогою моделювання в SolidWorks можливо створити та дослідити механізм дії системи, перевірити схему функціонування та продемонструвати систему в дії.

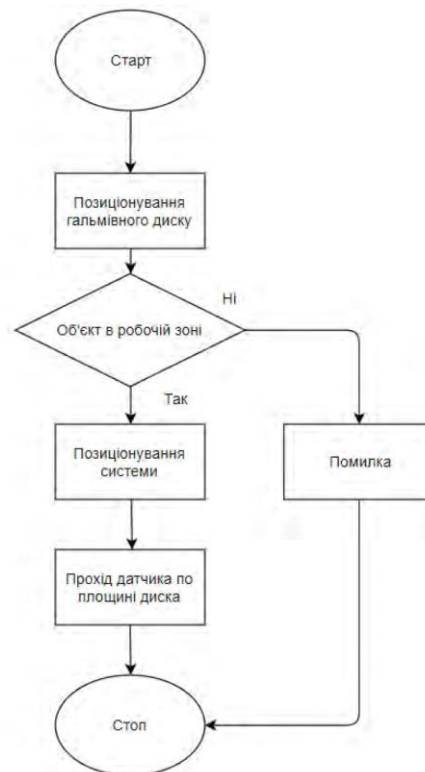


Рис. 3.18. Схема функціонування.

Переміщення датчика в межах платформи здійснюється за допомогою крокового мотора, черв'ячного редуктора та конічної передачі.

Відповідно до схеми функціонування, першим кроком є встановлення двигуна в одну лінію з оссю Z системи.

Після розміщення диска, платформа разом із віссю системи опускається, а край осі розташовується у канавку для точного розміщення. У випадку невдачі, система сигналізує про помилку, повертається в стартове положення і чекає на «коректне» розміщення диска.

Після вирівнювання осі диска та вісі системи, датчик розташовується на площині ротора гальмівного диска.

Після розташування диска, горизонтальне переміщення датчика вздовж площини ротора здійснюється за допомогою обертання черв'ячної передачі.



Рис. 3.19 Початкове розташування системи.



Рис. 3.20. Розміщення диска.



Рис 3.21 Підготовлення платформи.

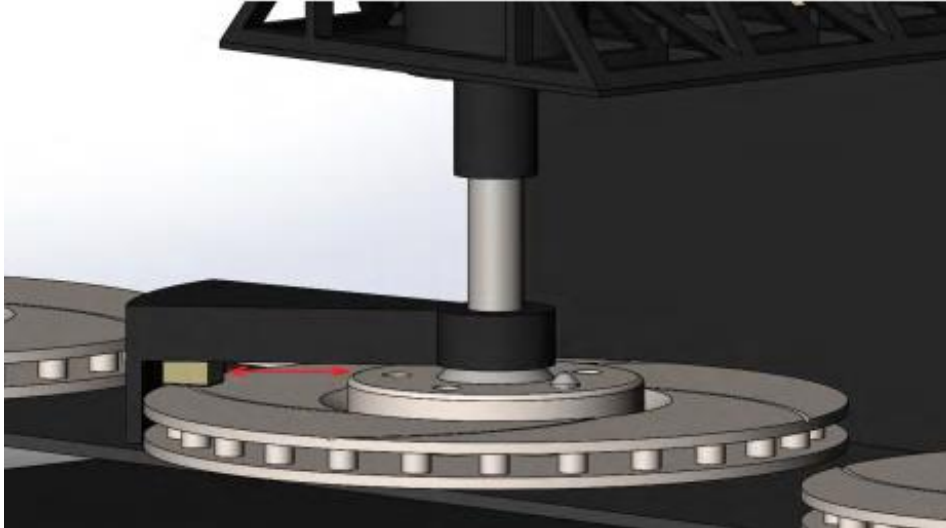


Рис. 3.22. Горизонтальне переміщення датчика.

Обертний рух платформи з датчиком здійснюється за допомогою конічної передачі, яка встановлена на платформі X.



Рис. 3.23. Обертання платформи.

Після перевірки гальмівного диска платформа піднімається і повертається до свого вихідного положення.

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Поняття та ознаки безпеки життєдіяльності

Варто зазначити, що не існує сформованого єдиного, всіма визнаного підходу до поняття загрози. У зв'язку з цим дуже часто поняття «загроза» та «небезпека» використовуються як синоніми в офіційних документах та публіцистиці. Окрім того, іноді небезпека визначається через поняття загрози. «Небезпека у надзвичайній ситуації – стан, за якого створилась або може з'явитися загроза виникнення уражальних факторів та вплив джерела надзвичайних ситуацій на населення, об'єкти та навколишнє природне середовище в зоні надзвичайної ситуації».

Загроза визначається як «сукупність умов та факторів, створених небезпекою життєво важливим інтересам особи, суспільства та держави».

Під факторами в цьому визначенні розуміються різноманітні дії конкретних суспільних сил. З юридичного погляду, це протиправні дії в найширшому розумінні – з позицій як міжнародного права, внутрішнього законодавства, так і традиційних норм.

Під умовами в цьому визначенні слід розуміти дії (чи бездіяльність) або прояви навколишнього середовища (соціального, техногенного, природного), які сприяють виникненню шкідливих впливів.

Зміст загрози визначається:

національними інтересами держави, які зачіпаються, що відображає її значущість;

обставинами, які визначають потенційні збитки в разі реалізації загрози;

місцем і часом прояви негативних факторів та умов;

можливостями, намірами та волею суб'єкта загрози (потенційного противника або конкурента).

Останні два пункти визначають імовірність реалізації загрози. Природа загрози визначається природою інтересу, задоволенню якого ця загроза протидіє. Тому розрізняють загрози економічного, воєнного, інформаційного, екологічного, природного та іншого походження.

За характером розрізняють:

пряму загрозу, що створюється умисною діяльністю суб'єкта, який розглядається як конкурент, противник, ворог;

непряму загрозу, спричинену деструктивними змінами ринкової кон'юнктури або непередбаченими політичними подіями, які руйнують сталі системи економічної та політичної взаємодії.

Залежно від того, звідки походить загроза, тобто де по відношенню до держаних кордонів перебуває джерело, розрізняють також зовнішні, внутрішні та транснаціональні загрози.

Внутрішні загрози обумовлюються станом економіки, науки, освіти, культури, соціальної сфери, екологічної ситуації, рівнем національних прагнень тощо.

Зовнішні загрози визначаються прагненням деяких держав, територіальними або іншими претензіями держав, рівнем працевдатності та спроможності механізмів забезпечення міжнародної безпеки, наявністю воєнно-політичних блоків та союзів, що розділяють світове суспільство, розширенням сфери міжнародного тероризму.

Джерелами транснаціональних загроз виступають як організації, так і процеси, які не контролюються державами, діяльність або розвиток яких не вкладається в ті або інші державні кордони. Транснаціональні загрози є пов'язаними з діяльністю міжнародних злочинних і терористичних організацій, наркоторгівлею, процесами розповсюдження зброї масового ураження та способів їх доставки, міграційними проблемами тощо. Безпека досягається шляхом устанавлення балансу між наявною загрозою та здатністю їй протидіяти. Вона розглядається як динамічний процес, у підґрунті якого лежить рівновага системи.

Сьогодні розрізняють три рівня безпеки: глобальний, регіональний та рівень безпеки окремих країн (яка, у свою чергу, охоплює державну безпеку, суспільну безпеку, безпеку в побуті та на виробництві).

Кожному з цих рівнів відповідають певні форми забезпечення безпеки: колективна, національна, корпоративна або особиста.

Залежно від функціональних сфер суспільного життя узвичаєно розрізняти політичну, воєнну, економічну, соціальну, інформаційну й екологічну безпеку.

Окрім того, безпека містить у собі зовнішні та внутрішні аспекти.

Завдання безпеки виконуються шляхом створення систем безпеки.

У сучасній науці про БЖД використовується низка усталених визначень, передусім поняття системи «людина – середовище проживання», яке є основою наукового знання. У БЖД воно також широко використовується для опису процесів негативної взаємодії людини (колективу людей, населення міста, регіону, країни) з навколишнім середовищем. «Взаємодія людини із середовищем проживання є безперервною в часі та ґрунтується на існуванні потоків речовин, енергії та інформації між елементами системи. Діючі потоки по відношенню до кожного елемента системи є зовнішніми та можуть сприйматись як комфортні, допустимі, небезпечні та надзвичайно небезпечні».

Комфортні та допустимі потоки не чинять негативного впливу на здоров'я людини, а небезпечні та надзвичайно небезпечні загрожують людині втратою здоров'я або смертю.

У сучасному світі для людини є характерними два види середовища проживання – природне (біосфера) і техносфера (виробнича та побутова). Для опису БЖД людини в техносфері є характерним другий вид середовища проживання.

Відмітною особливістю розгляду системи «людина – середовище проживання» є реалізація першого принципу БЖД – принципу антропоцентризму.

## **4.2 Основні групи причин виробничого травматизму і професійної захворюваності**

Виробничий травматизм – це явище, що характеризується сукупністю виробничих травм і нещасних випадків на виробництві.

Виробничі травми – це травми, одержані працівником на виробництві внаслідок недотримання вимог охорони праці.

Нещасний випадок на виробництві – це раптовий вплив на працівника небезпечного виробничого фактора чи середовища, внаслідок якого здоров'ю працівника було завдано шкоду, чи такий, що призвів до його смерті.

Безпосередньо причин виникнення виробничого травматизму досить багато, тому доцільно класифікувати їх за такими групами: технічно-технологічні, організаційні, санітарно-гігієнічні та особисті. Технічно-технологічні причини охоплюють як порушення технологічного процесу виробництва продукції (технологічні), так і конструктивні недоліки інструментів чи механізмів та їх несправність (технічні). Прикладом технологічних причин виникнення виробничого травматизму може бути відсутність або недостатня потужність системи охолодження у виробничих процесах із високими температурами, внаслідок якої робітник може зазнати шкідливого або наднормового впливу високих температур. Зношення інструментів праці або розхитування кріплень у рухомих частинах механізмів унаслідок довгострокової дії вібрації може бути прикладом уже технічних причин.

До організаційних причин належать несвоєчасне або недостатньо якісне проведення інструктажів з охорони праці, неповне забезпечення посадовими інструкціями, недостатній рівень контролю за виконанням вимог у сфері охорони праці тощо.

Санітарно-гігієнічні причини – це порушення нормативів безпечної концентрації шкідливих речовин у повітрі, незадовільний рівень шумів, вібрацій чи освітлення, антисанітарний стан приміщень, недотримання правил особистої гігієни тощо.

Особисті причини виникнення виробничого травматизму – грубі помилки в роботі. Ці причини поділяються на декілька підгруп: психофізіологічні, суб'єктивні й економічні.

До психофізіологічних причин належать виснаженість, монотонність і висока напруженість праці, невідповідність фізіологічних та психічних особливостей організму умовам праці, відносини в колективі тощо.

Суб'єктивні причини виникнення виробничого травматизму – особиста недисциплінованість працівника, невиконання інструкцій і приписів у сфері

охорони праці, перебування на робочому місці у стані алкогольного сп'яніння тощо. Вони є проявом характеру та особистості працівника і впливають із них.

Економічними причинами можна назвати порушення роботодавцем власного обов'язку контролю за охороною праці на власному підприємстві внаслідок бажання отримати надмірні прибутки або зменшити видатки замість безпеки, життя і здоров'я працівників.

Нещасний випадок часто обумовлюється поєднанням одразу декількох причин, які разом узяті призводять до настання негативних наслідків. Часто усунення хоча б однієї з причин може запобігти настанню негативних наслідків.

Професійне захворювання – це хронічне або гостре захворювання, причиною якого став тривалий вплив на працівника шкідливих виробничих факторів. Якщо в результаті розслідування буде доведено, що причиною захворювання не був вплив виробничих факторів, – таке захворювання вважається загальним. Професійні захворювання можуть спричинити тимчасову чи постійну втрату працездатності працівника або інвалідність, а іноді навіть призвести до смерті постраждалого. Кабінет Міністрів України Постановою від 8 листопада 2000 р. № 1662 затвердив перелік професійних захворювань, яким поділив перелічені захворювання на 7 груп.

1. Захворювання, що виникають під впливом хімічних факторів. До цієї групи належать хронічні отруєння та їх наслідки, самостійні чи в поєднанні з іншими ураженнями: анемією, нефропатією, гепатитом, ураженням очей, кісток, нервової системи та/або органів дихання токсичного характеру; деякі хвороби шкіри.

2. Захворювання, спричинені впливом промислових аерозолів. У цій групі – пневмоконіози, професійні бронхіти, бісиноз, емфізема легенів, дистрофічні зміни верхніх дихальних шляхів.

3. Захворювання, спричинені дією фізичних факторів. До таких відносять вібраційну та шумову хворобу, захворювання, пов'язані з впливом контактного ультразвуку (вегетативний поліневрит, ангіоневроз рук), променеві захворювання – місцеві променеві ураження (гострі або хронічні),



пневмосклероз, місцеве ушкодження тканин лазерним випроміненням, гіпертермія тощо.

4. Захворювання, пов'язані з фізичним перевантаженням та перенапруженням окремих органів і систем. У цій групі зосереджено хвороби, пов'язані з розладом функціонування окремих систем організму: неврози, радикулопатії, різні захворювання кістково-язової системи та сполучної тканини, варикозне розширення вен і деякі статеві хвороби.

5. Захворювання, спричинені дією біологічних факторів, – інфекційні та паразитарні хвороби, набуті в процесі професійної діяльності в результаті контакту з хворими, інфікованими матеріалами чи переносниками захворювань. До таких відносять вірусні гепатити, туберкульоз, кліщовий енцефаліт, СНІД, сифіліс, сибірську виразку, дисбактеріоз, COVID-19 тощо.

6. Алергічні захворювання – прояви алергії, що виникли внаслідок контакту з речовинами та сполуками, які містять алергени: кон'юнктивіт, дерматит, астма, екзема, анафілактичний шок тощо.

7. Злоякісні новоутворення (професійний рак). До цієї групи входять пухлини шкіри, порожнини рота, органів дихання, печінки, сечового міхура, кісток, шлунку, лейкози, мезотеліоми і неходжкінські лімфоми.

Цей перелік не є вичерпним і слугує скоріше орієнтиром. Належність окремих набутих хвороб до професійних виявляється фахівцями в результаті всебічного розслідування.

Окрім зазначених груп професійних захворювань, можна також виділити гостру та хронічну форму перебігу захворювання.

Гостре захворювання виникає раптово, після одноразового (протягом не більше однієї робочої зміни) впливу високих концентрацій хімічних речовин, що містяться в середовищі робочої зони. Це хімічні опіки, алергічні реакції, ураження очей і м'яких тканин хімічними речовинами чи оптичним випроміненням. Хронічне професійне захворювання розвивається внаслідок тривалого систематичного впливу на організм шкідливих виробничих факторів. Особливістю хронічних професійних хвороб є поступове збільшення прояву симптомів захворювання.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведено аналіз гальмівних механізмів, зокрема дискових та барабанних гальм. Дискові гальма характеризуються кращою тепловіддачею та стійкістю до перегріву. Вивчено різноманітні матеріали для виготовлення гальмівних дисків, такі як чавун, сталь, кераміка та композити, кожен з яких має свої переваги і недоліки.

Досліджено основи тертя та зносу, які впливають на ефективність і тривалість експлуатації гальмівних систем. Трибологічні властивості гальмівної системи, зокрема взаємодія між диском і колодками, визначаються ключовими параметрами, такими як коефіцієнт тертя, зносостійкість і стійкість до високих температур. Проаналізовано триботехнічні характеристики системи "диск-колодка" залежно від матеріалів та умов експлуатації. Виявлено можливі наслідки невідповідностей у геометрії диска та колодки, такі як нерівномірний знос, зниження ефективності гальмування та поява вібрацій. Досліджено причини виникнення вібрацій та шуму у гальмівних системах та встановлено, що точне виготовлення і правильне встановлення компонентів можуть зменшити ці негативні явища.

Використано програму COMSOL для моделювання дискових гальм, що дозволило провести детальний аналіз теплових і механічних процесів, оптимізувати конструкцію та вибір матеріалів. Програма SolidWorks застосована для моделювання роботизованих систем, забезпечуючи візуалізацію та аналіз механічних і динамічних характеристик, що сприяло розробці ефективних та надійних гальмівних систем.

Проаналізовано поняття та основні ознаки безпеки життєдіяльності, визначено важливість запобіжних заходів, дотримання техніки безпеки та використання засобів індивідуального захисту. Виявлено основні групи причин виробничого травматизму та професійної захворюваності, включаючи технічні, організаційні та людські фактори, що вимагає комплексного підходу до їх запобігання.

**БІБЛІОГРАФІЯ**

1. О.Л. Ляшук, Ю.І. Пиндус, М.Г. Левкович, Гупка А.Б., Хорошун Р.В. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра за освітнім рівнем «бакалавр галузі знань 27 «Транспорт» спеціальність 274 «Автомобільний транспорт» – Тернопіль: Видавництво ТНТУ, 2022. – 61 с.
2. Конспект лекцій з курсу «Технології обслуговування автотранспортних засобів». / Р.В. Хорошун, О.Л. Ляшук, Н.Т. Навроцька. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ, 2021. – 194 с.
3. Ляшук О.Л. Конспект лекцій з дисципліни «Технічна експлуатація автомобілів» для студентів спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» / О.Л. Ляшук, В.М.Клендій, Р.В.Хорошун. – Тернопіль: Вид. ТНТУ – 2018. – С. 302.
4. Конспект лекцій (частина I) з дисципліни «Транспортні засоби» для студентів усіх форм навчання першого рівня освіти за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт», 275 «Транспортні технології» галузі знань 27 «Транспорт» / О.Л. Ляшук, Т.Д.Навроцька., Р.Р. Заверуха., Л.М. Слободян., Р.В. Хорошун. – Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 132 с.
5. Конспект лекцій (частина II) з дисципліни «Транспортні засоби» для студентів усіх форм навчання першого рівня освіти за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт», галузі знань 27 «Транспорт» / О.Л. Ляшук, Т.Д. Навроцька., Л.М. Слободян., Р.В. Хорошун. – Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 184 с.
6. Левкович М.Г., Гупка А.Б., Сіправська М.Д Конспект лекцій з дисципліни «Відновлення деталей» для здобувачів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 274 «автомобільний транспорт».-Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. – Тернопіль.: ТНТУ, 2021. – 136 с.
7. Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Гевко І.Б., Хорошун Р.В. Модель руху автомобіля по криволінійній трасі. Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2021. № 2 (25). С. 72–81.

8. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень на СТО та АТП : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Луциків І.В., Плекан У.М., Клендій В.М. - Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 276 с.

9. Sokil, B., Lyashuk, O., Sokil, M., Vovk, Y., Lebid, I., Nevko, I., Khoroshun R Matviyishyn, A. (2022). Methodology of Force Parameters Justification of the Controlled Steering Wheel Suspension. Communications, 24(3), B247-B258.

10. Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Левкович М.Г., Клендій В.М., Гупка В.В. Структурний синтез гальмівних систем з техніко-економічним обґрунтуванням // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". Вип. 71. Луцьк. Ред.-вид. відділ ЛТНУ.- 2021. – С. 228-233.

11. Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Гевко І.Б., Хорошун Р.В. Модель руху автомобіля по криволінійній трасі. Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. Херсон : Херсонська державна морська академія, 2021. № 2 (25). С. 72–81.

12. Кузьмінський Р.Д., Шарібура А.О Технічний сервіс. Ремонт електрообладнання тракторів і автомобілів Львів 2017 – 376 с

13. Сукач М.К. Технічний сервіс машин. Навч. пос.. Гриф МОНМСУ - Ліра-К, 2017 – 288 с.

14. Форнальчик Є. Ю., Качмар Р. Я. Основи технічного сервісу транспортних засобів - Львівська політехніка 2017, - 324 с.

15. Коробочка О.М. Основи розрахунків, проектування і експлуатації технологічного обладнання для автомобільного транспорту: Навч. посібник / Коробочка О.М., Скорняков Е.С., Сасов О.О. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007 – 252 с.

16. Кукурудзяк, Ю. Ю. Технічна експлуатація автомобілів. Організація технологічних процесів ТО і ПР навчальний посібник / Ю. Ю. Кукурудзяк, В. В. Біліченко. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 198 с.