

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### «Інженерний аналіз гальмівного механізму вантажних платформ та транспортерів»

Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 27 Транспорт  
Спеціальність 274 Автомобільний транспорт  
Освітня програма Автомобільний транспорт

Шифр КвРАТ. 23065.02.04.00

Виконав студент 3 курсу група АТс-23-2



Підпис

Дмитро ГЕРЕЦЬ

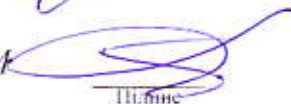
Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ



Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

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



Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри ТАМ

10.06.2026р.

Дата



Підпис


Олександр ДИХА

Хмельницький, 2025

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства  
Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 27 Транспорт  
Спеціальність 274 Автомобільний транспорт  
Освітня програма Автомобільний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТАМ

  
Диха О.В.  
15.04 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Герець Дмитру Ростиславовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Інженерний аналіз гальмівного механізму вантажних платформ та транспортерів.**

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

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

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7 (Д 26)

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

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

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

1) Гальмівна система вантажних платформ та транспортерів.

2) Створення моделі гальма транспортера в середовищі САПР.

3) Результати аналізу методом скінченних елементів контактних зв'язків між гальмівним диском та гальмівною колодкою.

4) Висновки, рекомендації.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 15.04 2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Гальмівна система вантажних платформ та транспортерів.	28.05.2026	вик
2	Створення моделі гальма транспортера в середовищі САПР	8.06.2026	вик
3	Результати аналізу методом скінченних елементів контактних зв'язків між гальмівним диском та гальмівною колодкою.	12.06.2026	вик
4	Оформлення роботи, висновки.	14.06.2026	вик
5	Захист кваліфікаційної роботи	16.06.2026	

Студент



Підпис

Дмитро ГЕРЕЦЬ

Керівник кваліфікаційної роботи



Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

## РЕФЕРАТ

Судент групи АТс-21-2: Герець Д.Р.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Інженерний аналіз гальмівного механізму вантажних платформ та транспортерів» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 16 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 16 сторінках. Роботу викладено на 75 сторінці, з них 63 сторінки основного тексту, на яких розміщено 30 рисунків і 5 таблиць.




Одним з ключових елементів експлуатаційної надійності таких платформ є гальмівні системи, які забезпечують регулювання швидкості руху, стабільність при перевезенні вантажу та запобігання аварійним ситуаціям. Від ефективності роботи гальмівного механізму залежить не лише збереженість вантажу, але й безпека персоналу, що працює з цими засобами транспортування. У зв'язку з цим питання конструктивного удосконалення гальмівних вузлів, підбору матеріалів та оцінки їх технічного стану стають особливо актуальними.

Актуальність виконаної роботи зумовлена необхідністю підвищення надійності та безпечності вантажних платформ у сучасних виробничих системах. Під час інтенсивної експлуатації, особливо при великих масах вантажів, гальмівні системи піддаються значним механічним та тепловим навантаженням, що прискорює зношування колодок і може призвести до відмов. Саме тому дослідження характеристик фрикційних матеріалів, аналіз роботи гальмівних механізмів та врахування конструктивних впливів мають важливе інженерне та практичне значення.

*Ключові слова: ТРАНСПОРТЕР, ПЛАТФОРМА, ГАЛЬМА, КОЛОДКА, ДИСК, МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, МОДЕЛЮВАННЯ, НАПРУЖЕННЯ.*

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. ГАЛЬМІВНА СИСТЕМА ВАНТАЖНИХ ПЛАТФОРМ ТА ТРАНСПОРТЕРІВ	8
1.1 Конструктивні особливості вантажних платформ і транспортерів	8
1.1.1 Загальна характеристика вантажних платформ і візків.	8
1.1.2 Платформенні вантажні візки: класифікація та конструктивні особливості.	9
1.1.3 Колісні транспортери.	10
1.1.4 Рейкові транспортери (рейкові платформи).	11
1.1.5 Вимоги до експлуатації та порівняльний аналіз колісних та рейкових транспортерів.	12
1.2 Особливості гальмівних систем вантажних платформ, платформених візків та транспортерів.	14
1.2.1 Загальні принципи гальмування вантажних платформ	14
1.2.2 Типи гальмівних систем, що застосовуються на платформених візках та транспортерах.	14
1.2.3 Особливості гальмівних систем колісних та рейкових транспортерів.	16
1.2.4 Системи управління гальмуванням.	17
1.3 Аналіз типів гальм транспортерів.	18
1.3.1 Колодкові гальма.	19
1.3.2 Магнітне рейкове гальмо транспортера.	22
1.3.3 Вихрострумове гальмо транспортера.	25
1.3.4 Дискове гальмо транспортера.	28
1.4 Гальмівні колодки та накладки вантажних платформ і транспортерів.	31
1.4.1 Загальна характеристика гальмівних колодок та накладок.	31
1.4.2 Класифікація гальмівних колодок та накладок.	33

КвРАТ. 23065.02.04.00									
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата	Інженерний аналіз гальмівного механізму вантажних платформ та транспортерів	Літера	Аркуш	Аркушів	
Виконав		Герець						4	75
Перевір.		Посонський							
Контр. підв.		Бабак Диха							
						ХНУ, АТс-23-2			

2	СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ГАЛЬМА ТРАНСПОРТЕРА В СЕРЕДОВИЩІ САПР	37
2.1	Спрощена модель гальма.	37
2.1.1	Важелі.	37
2.1.2	Саморегулювальний механізм та ексцентриковий вал.	39
2.1.3	Корпус гальма.	40
2.1.4	Механізм стисненого повітря.	43
2.1.5	Розпірні кільця, колодки та тримачі колодок.	44
2.1.6	Механізм регулювання кута.	46
2.1.7	Збірка моделі.	47
2.2	Моделювання в ANSYS.	48
2.2.1	Розрахунок гальмівної сили.	49
2.2.2	Проаналізовані колодки.	51
2.2.3	Обмеження при аналізі.	53
2.2.4	Спрощення при аналізі.	54
2.2.5	Перерахунок гальмівної сили.	56
3	РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНТАКТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ГАЛЬМІВНИМ ДИСКОМ ТА ГАЛЬМІВНОЮ КОЛОДКОЮ	58
3.1	Налаштування в ANSYS.	58
3.2	Сітка та збіжність.	59
3.3	Результати аналізу контактних зв'язків між гальмівним диском та гальмівною колодкою.	59
3.3.1	Аналіз колодки з прорізами.	60
3.3.2	Розподіл контактного тиску для суцільних накладок.	64
3.3.3	Розподіл контактного тиску для спеченої накладки з диском без прокладок.	66
3.4	Порівняльна оцінка результатів аналізу.	69
	ВИСНОВКИ	72
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73
	ДОДАТКИ	75

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку транспортно-логістичної інфраструктури вимагають підвищення ефективності, надійності та безпечності технологічного обладнання, що забезпечує переміщення, зберігання й обробку вантажів. Особливе місце серед таких засобів займають вантажні платформи та передвижні платформенні візки, які широко застосовуються на промислових підприємствах, складах, терміналах, у транспортних цехах та логістичних комплексах. Їх використання дозволяє оптимізувати внутрішньоцехове транспортування та знизити трудомісткість операцій, що суттєво впливає на продуктивність та рентабельність виробничих процесів.

Одним з ключових елементів експлуатаційної надійності таких платформ є гальмівні системи, які забезпечують регулювання швидкості руху, стабільність при перевезенні вантажу та запобігання аварійним ситуаціям. Від ефективності роботи гальмівного механізму залежить не лише збереженість вантажу, але й безпека персоналу, що працює з цими засобами транспортування. У зв'язку з цим питання конструктивного удосконалення гальмівних вузлів, підбору матеріалів та оцінки їх технічного стану стають особливо актуальними.

Важливим аспектом сучасних досліджень є також впровадження методів інженерного моделювання, що дозволяють прогнозувати поведінку елементів конструкції під впливом експлуатаційних навантажень. Засоби комп'ютерного аналізу, такі як метод скінченних елементів, створюють можливість виявляти слабкі місця конструкції, оцінювати рівномірність розподілу контактних зусиль та проводити оптимізацію деталей ще на стадії проектування [1, 2].

Актуальність виконаної роботи зумовлена необхідністю підвищення надійності та безпечності вантажних платформ у сучасних виробничих системах. Під час інтенсивної експлуатації, особливо при великих масах

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вантажів, гальмівні системи піддаються значним механічним та тепловим навантаженням, що прискорює зношування колодок і може призвести до відмов. Саме тому дослідження характеристик фрикційних матеріалів, аналіз роботи гальмівних механізмів та врахування конструктивних впливів мають важливе інженерне та практичне значення.

Метою кваліфікаційної роботи є комплексний аналіз конструкції та принципів роботи гальмівної системи вантажних платформ, аналіз фрикційних елементів, моделювання їх роботи під дією експлуатаційних навантажень та визначення шляхів удосконалення конструкції.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- 1) провести огляд конструкцій вантажних платформ та їх гальмівних систем;
- 2) проаналізувати матеріали гальмівних колодок та накладок, їх характеристики та придатність до використання у вантажних візках;
- 3) виконати моделювання контактної взаємодії колодок з гальмівним елементом;
- 4) визначити причини нерівномірного розподілу навантажень та деформацій;
- 5) окреслити шляхи вдосконалення конструкції та підвищення її надійності.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

# 1 ГАЛЬМІВНА СИСТЕМА ВАНТАЖНИХ ПЛАТФОРМ ТА ТРАНСПОРТЕРІВ

## 1.1 Конструктивні особливості вантажних платформ і транспортерів.

### 1.1.1 Загальна характеристика вантажних платформ і візків.

У сучасних умовах інтенсифікації виробничих процесів, зростання обсягів внутрішньоцехових перевезень та оптимізації логістичних потоків особливого значення набувають механізовані та автоматизовані засоби транспортування. До найбільш ефективних технічних рішень належать вантажні платформи та передвижні вантажні візки, які забезпечують швидке та безпечно переміщення вантажів різного призначення.

Платформенні візки та транспортери застосовуються у таких галузях: машинобудування, металургія, енергетика, вагонобудування, складська логістика, суднобудування, а також на підприємствах з безперервним циклом виробництва. Їх використання дозволяє:

- зменшити трудомісткість вантажно-розвантажувальних робіт;
- підвищити продуктивність внутрішньоцехових транспортних операцій;
- мінімізувати ризики пошкодження вантажів;
- покращити ергономіку та безпеку праці персоналу.

Основними параметрами, за якими класифікують вантажні платформенні візки, є вантажопідйомність, спосіб приводу, конструктивний тип ходової системи, спосіб керування та рівень автоматизації [3].

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.1.2 Платформенні вантажні візки: класифікація та конструктивні особливості.

Платформенний візок представляє собою низькорамну конструкцію на колісній або рейковій ходовій системі, призначену для транспортування вантажів масою від сотень кілограмів до сотень тонн. За конструкцією вони поділяються на [3,4]:

1. Візки з ручним приводом

Це найпростіші засоби переміщення, що застосовуються на складах, у цехах та при дрібних логістичних операціях.

Особливості конструкції:

- сталевий зварний каркас;
- колеса з поліуретану, гуми або сталі;
- можливість встановлення бортів, кріплень, упорів;
- вантажопідйомність 0,5...2 т.

2. Платформенні візки з електроприводом

Призначені для переміщення вантажів на великі відстані та для роботи на великих виробничих площах.

Характерні риси:

- власна електростанція на акумуляторах;
- електродвигуни приводять у рух ведучі колеса;
- дистанційне керування або кабіна оператора;
- можливість автоматизації.

3. Вантажні платформи спеціального призначення

Використовуються для транспортування нестандартних вантажів та робіт у важких умовах.

Приклади:

- низькопрофільні платформи для металургії;
- платформи з поворотними візками для довгомірних вантажів;

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- візки з роликівими столами для інтеграції з конвеєрними лініями.

### 1.1.3 Колісні транспортери.

Колісні транспортери є мобільними платформами, здатними пересуватися по рівних промислових поверхнях без потреби у спеціально підготовленому шляху. Вони оснащуються автономним приводом і можуть управлятися вручну або дистанційно.

Конструкція колісного транспортера, **рисунок 1.1**, включає наступні елементи: рама або платформа, що сприймає навантаження; ходова частина: ведучі та направляючі колеса, підвіска (іноді жорстка); привідна система: електродвигуни, редуктори; джерело живлення (частіше – акумуляторні батареї); система керування (пульт, радіоканал, PLC); захисні системи: датчики навантаження, аварійна зупинка, світлова індикація.

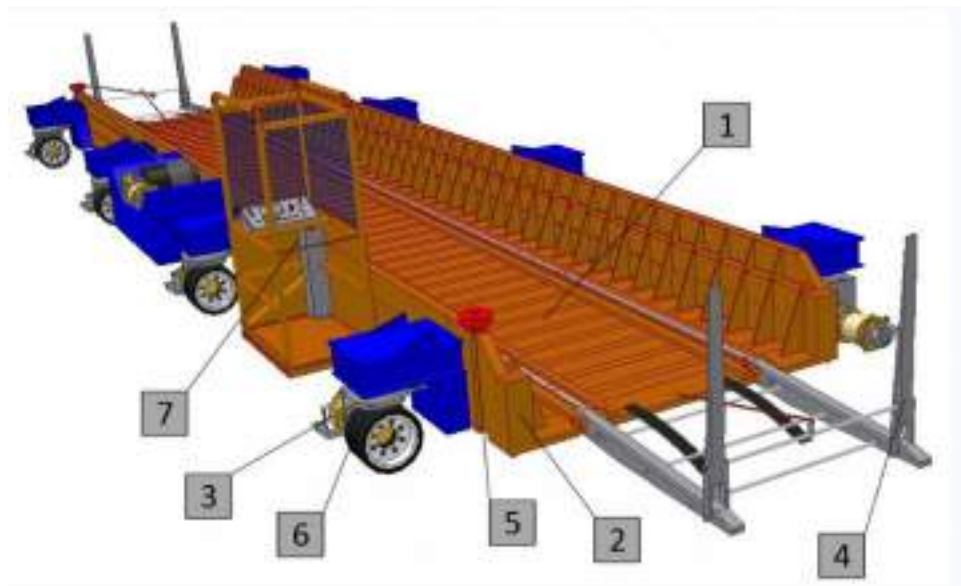


Рисунок 1.1 – Колісний транспортер АКVP НОРАХ - ТЕВЕСО spol. s.r.o. (Czech Republic):

1 – прогумоване панельне покриття; 2 – рама; 3 – привід; 4 – складаний інерційний трек; 5 – привідна частина; 6 – еластичні колеса; 7 – кабіна управління.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переваги:

- універсальність маршруту руху;
- висока маневреність (включно з можливістю руху боком або по діагоналі);
- можливість роботи в обмежених приміщеннях;
- простота інтеграції в логістичні схеми.

Галузі застосування наступні: складські комплекси; металургійні та машинобудівні підприємства; підприємства з важким обладнанням; виробничі лінії з гнучкими маршрутами.

#### 1.1.4 Рейкові транспортери (рейкові платформи).

Рейкові транспортери, рисунок 1.2, переміщуються по жорстко закріпленому рейковому шляху, аналогічному до залізничного, але адаптованому під внутрішньоцехові умови.

Основні конструктивні елементи наступні: рейковий шлях (одноколіїний або двоколіїний); платформа на візках з сталевими колесами; електропривід з живленням від акумуляторів або контактної мережі; системи безпеки (обмежувач швидкості, кінцеві вимикачі, блокування).

Рейкові транспортери також мають свої переваги:

- висока вантажопідйомність (до 200...500 т і більше);
- стабільність та плавність руху;
- точне позиціонування у процесах виробництва;
- можливість автоматизації до рівня безпілотного транспорту.

Напрями застосування: важке машинобудування; металургійні виробництва (перевезення злитків, ковшів, валків); збірочні цехи з фіксованими маршрутами; переміщення великогабаритних елементів суден, турбін, пресів.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рисунок 1.2 – Рейковий транспортер AVD HOPIX - TEBECO spol. s.r.o.  
(Czech Republic):

1 – металевий настил; 2 – рама; 3 – роз'єм для підключення дистанційного пневматичного керування; 4 – колесо; 5 – роз'єм для підключення дистанційного пневматичного керування; 6 – важіль фіксатор зачеплення; 7 – обмежувач.

#### 1.1.5 Вимоги до експлуатації та порівняльний аналіз колісних та рейкових транспортерів.

Ефективне використання платформених візків і транспортерів можливе лише за умови дотримання вимог технічної безпеки та правил експлуатації: регламентовані огляди ходової системи; перевірка стану платформи, гальм, електропроводки; дотримання норм вантажопідйомності; використання систем попередження зіткнень; навчання персоналу; контроль технічного стану батарей та приводів.

Важливим також є забезпечення належного стану підлоги або рейкової колії, оскільки це напряму впливає на безпеку та стабільність руху.

Вибір типу транспортера визначається характером виробництва: для гнучких логістичних систем оптимальними є колісні платформи, а для

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

роботи з надважкими вантажами та фіксованими маршрутами – рейкові. В таблиці 1.1 наведена порівняльна характеристика транспортерів та платформ.

Таблиця 1.1 – Порівняльні характеристики транспортерів.

Характеристика	Колісні транспортери	Рейкові транспортери
Тип маршруту	Вільний, змінний	Фіксований
Маневреність	Висока	Низька
Вантажопідйомність	Середня (1...60 т)	Дуже висока (до сотень тонн)
Складність монтажу	Мінімальна	Потрібен рейковий шлях
Продуктивність	Висока у гнучких системах	Максимальна при потоковому виробництві
Автоматизація	Високий потенціал	Практично необмежена

Сучасні тенденції розвитку внутрішньоцехового транспорту зумовлені переходом промислових підприємств до автоматизованих та роботизованих виробничих комплексів. Перспективними напрямками є:

- впровадження AGV/AMR-технологій (автоматизовані безпілотні платформи);
- використання літій-залізофосфатних батарей з підвищеним ресурсом;
- інтеграція систем машинного зору та датчиків позиціонування;
- розвиток модульних платформ для клієнтських рішень;
- збільшення енергоефективності приводів.

В умовах Індустрії 4.0 такі засоби стають не просто транспортом, а ключовими елементами «розумної фабрики».

1.2 Особливості гальмівних систем вантажних платформ, платформених візків та транспортерів.

### 1.2.1 Загальні принципи гальмування вантажних платформ.

Гальмівні системи передвижних вантажних платформ та транспортерів виконують ключову функцію - забезпечення контрольованої зупинки обладнання під час руху, а також його фіксації під час вантажно-розвантажувальних операцій. Від надійності гальмівних систем залежить безпека персоналу, цілісність вантажів і стабільність виробничих процесів.

Основні вимоги до гальмівних систем таких платформ включають: високу надійність та відмовостійкість; ефективність гальмування при великих масах вантажу; мінімальний гальмівний шлях; стабільність характеристик у різних умовах експлуатації; можливість аварійного зупинення; простоту обслуговування та діагностики.

Гальмівні системи поділяються на робочі, стоянкові та аварійні, кожна з яких виконує власну функцію у структурі безпеки транспортера або платформи [1, 2].

### 1.2.2 Типи гальмівних систем, що застосовуються на платформених візках та транспортерах.

Механічні гальмівні системи. Це найбільш простий і поширений тип гальмування на малогабаритних і ручних платформених візках. До механічних гальм належать: ножні гальма, що активуються педаллю; ручні гальма з важільним приводом; стопорні фіксатори коліс; клинові та стоянкові упори.

У механічних гальмах використовується один із таких механізмів:

- 1) колодкові гальма, де колодка притискається до колеса;

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

- 2) дискові гальма (на електровізках);
- 3) колісні фіксатори блокувального типу.

Механічні гальма прості у конструкції, дешеві та надійні, але малоефективні при великих масах вантажу.

Електромагнітні гальма. Встановлюються переважно на електропривідних колісних та рейкових транспортерах. Електромагнітне гальмування базується на створенні магнітного поля, що притискає гальмівні колодки або диск при відсутності живлення. Така конструкція виконує одночасно роль: робочого гальма, аварійного гальма, стоянкового гальма.

Переваги електромагнітних гальм наступні: автоматичне спрацювання при втраті живлення; мінімальні інтервали спрацювання; високий ресурс роботи; можливість інтеграції з системами автоматичного керування.

Гідравлічні та гідромеханічні гальма. Використовуються на важких платформах і транспортерах з великою масою вантажу, де необхідна значна сила гальмування. Принцип роботи базується на передачі зусилля через робочу рідину.

Типові варіанти: гідравлічні колодкові гальма; гідравлічні дискові гальма; комбіновані гідромеханічні системи.

Переваги: велика сила гальмування; плавність зупинки; можливість точної дозованої дії.

Недоліки: потреба в контролі стану рідини та герметичності системи.

Пневматичні гальмівні системи. Застосовуються на масивних рейкових платформах або у виробництвах, де вже існує централізована мережа стисненого повітря.

Пневматична система складається з: пневмоциліндрів; гальмівних колодок або дисків; ресивера стисненого повітря; клапанів керування; компресора (на автономних платформах).

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Переваги: надійність та простота; ефективність у важкій промисловості; можливість використання у високотемпературних умовах (металургія).

Електродинамічні (рекуперативні) гальма. Встановлюються на сучасних самохідних платформах з електроприводом, особливо у системах AGV. Принцип роботи: електродвигун переходить у режим генератора, енергія гальмування повертається в батарею.

Переваги: економія енергії; зменшення зносу механічних елементів; плавність гальмування.

Недолік: рекуперативне гальмування не працює при низьких швидкостях, тому комбінується з механічним або електромагнітним.

### 1.2.3 Особливості гальмівних систем колісних та рейкових транспортерів.

Колісні платформи характеризуються високою маневреністю, тому система гальмування повинна забезпечувати стабільність при поворотах та можливість плавної зупинки.

Основні вимоги:

- гальмування на кожному з ведучих коліс;
- система проти скочування назад;
- можливість аварійної зупинки з пульта дистанційного керування;
- автоматичне увімкнення стоянкового гальма при зупинці або відключенні живлення.

У конструкції колісних транспортерів часто застосовуються: електромагнітні гальма, що суміщені з редуктором; дискові гальма; системи електронного гальмівного контролю (EBS для внутрішньоцехових транспортних роботів) [4].

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Гальмівні системи рейкових транспортерів. Рейкові платформи мають значно більшу вантажопідйомність, тому їх гальмування вимагає високої сили та стабільності. Залежно від маси та швидкості застосовуються:

1) Колодкові гальма на сталевих колесах.

Колодка притискається до поверхні колеса через механічний, гідравлічний або пневматичний привід.

Підходять для низьких швидкостей.

2) Дискові гальма.

Встановлюються на осі транспортера або електродвигуна. Переваги: рівномірність гальмування, низький знос, ефективність при високих швидкостях.

3) Магнітоіндукційні (рейкові) гальма.

Використовуються у важких платформах у металургії, де не допускається прямий контакт колодки з колесом. До рейки підводиться магнітний башмак, що створює вихрові струми та забезпечує гальмування.

4) Аварійні кінцеві гальма.

Встановлюються на кінцях рейкової колії і спрацьовують при виході платформи за допустимі межі. Мають енергопоглинаючі елементи.

#### 1.2.4 Системи управління гальмуванням.

Сучасні платформи оснащуються автоматизованими системами управління:

- блоки логічного керування (PLC);
- електронні контролери приводу;
- датчики швидкості та прискорення;
- системи плавного пуску та зупинки;
- аварійні вимикачі на корпусі та на пульті.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Для AGV та AMR платформ: застосовуються лазерні лідари для визначення перешкод; система автоматичного екстреного гальмування (АЕВ); модулі контролю траєкторії.

Вимоги до обслуговування гальмівних систем. Для забезпечення надійної роботи необхідно: регулярно перевіряти стан колодок і дисків; контролювати зазори в механічних приводах; перевіряти герметичність гідравлічних гальм; контролювати тиск у пневмосистемі; перевіряти роботу електромагнітних гальм при відключенні живлення; контролювати ступінь зношення коліс (для рейкових конструкцій); проводити очищення гальмівних вузлів від пилу та металевої стружки.

Гальмівні системи вантажних платформ є складними комплексами, які забезпечують безпечну експлуатацію і точність транспортних операцій. Вибір типу гальмування залежить від: маси платформи і вантажу; типу приводу; умов експлуатації; необхідної швидкості та точності позиціонування; рівня автоматизації транспортувальних процесів.

Сучасні тенденції розвитку спрямовані на впровадження електронного управління гальмуванням, систем прогнозування навантажень та комплексних рішень безпеки, що забезпечують надійність і довговічність роботи транспортного обладнання.

### 1.3 Аналіз типів гальм транспортерів.

Нижче наведено короткий опис різних типів гальм транспортерів: гальмівні колодки, магнітні рейкові гальма, гальма на вихрових струмах та дискові гальма.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

### 1.3.1 Колодкові гальма.

Колодкові гальма є одним із найпоширеніших типів механічних гальмівних систем на транспорті. Їх принцип дії ґрунтується на створенні сили тертя між гальмівними колодками та поверхнею кочення колісної пари. Саме за рахунок цього тертя кінетична енергія руху транспортера перетворюється на теплову, що забезпечує зниження швидкості або повну зупинку транспортера.

Попри розвиток сучасних дискових та електродинамічних гальм, колодкові гальма залишаються масово використовуваними завдяки своїй простоті, надійності, дешевизні та можливості роботи в широкому діапазоні експлуатаційних умов. Вони є базовим елементом гальмівного обладнання вантажних платформ та транспортерів.

Гальмівний процес реалізується шляхом притискання гальмівних колодок до поверхні колеса. Сила притискання створюється гальмівним циліндром (пневматичним або вакуумним), який через систему важелів передає зусилля на колодки. Під час контакту колодок із колесом виникає сила тертя, пропорційна нормальній силі притиснення та коефіцієнту тертя матеріалів.

Формально гальмівна сила визначається за виразом [5]:

$$F_T = \mu \cdot N, \quad (1.1)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя між колодкою та поверхнею колеса;  $N$  - нормальна сила притиснення.

Колодки розміщені по обидва боки колеса, що забезпечує симетричне гальмування та мінімізує бокові навантаження на вісь.

Стандартна колодкова гальмівна система транспортерів включає такі основні елементи, рис. 1.3:

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 1) Гальмівний циліндр – створює зусилля для притискання колодок.
- 2) Тягово-гальмівна передача (важільна передача) – комплект важелів та тяг, що збільшує та передає зусилля.
- 3) Гальмівні колодки – робочі елементи, що контактують з колесами.
- 4) Гальмівні башмаки та підвіски – утримують колодки й забезпечують їх правильне положення.
- 5) Поворотні пружини – повертають механізм у початкове положення після відпуску.

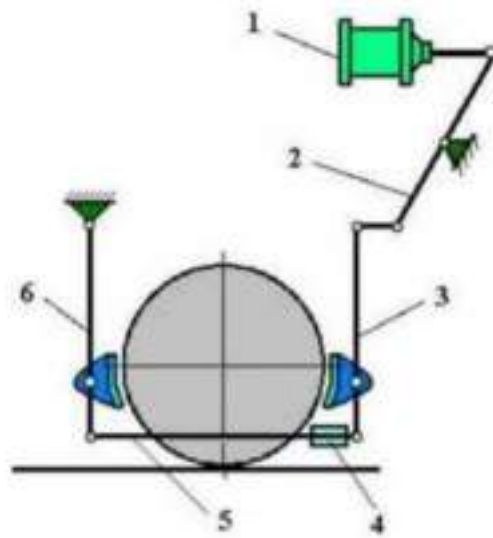


Рисунок 1.3 – Схема колодкового (барабанного) гальма транспортера.

Рух важелів відбувається від гальмівного циліндра (1), що монтується з зовнішнього боку рами візка. При заповненні стисненим повітрям гальмівного циліндра його шток діє на горизонтальний балансир (2), котрий проходить через отвір в рамі візка. Балансир через важіль підвіски (3) та верхню вилку притискає до бандажа колісної пари гальмівну колодку. Далі зусилля, за допомогою нижнього кінця важеля підвіски гальмівної колодки і через нижню вилку триангеля надає рух тязі (5) та другий триангель, який у свою чергу пов'язаний з важелем (6) підвіски гальмівної колодки. Кожна гальмівна колодка прикріплена чекою до гальмівного черевика і забезпечена

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

храповим механізмом, що забезпечує розташування поверхні гальмівної колодки паралельно поверхні кола кочення колеса.

Гальмівні колодки виготовляються з матеріалів, які забезпечують оптимальний баланс між коефіцієнтом тертя, зносостійкістю та теплопровідністю. Найпоширеніші типи матеріалів:

1) Чавунні – традиційні, дешеві, з середнім коефіцієнтом тертя; широко використовуються на вантажних вагонах.

2) Композиційні (органічні) – мають стабільні характеристики, менший знос коліс.

3) Металокомпозиційні – підвищена зносостійкість і термостійкість, застосовуються у важких умовах.

4) Синтетичні полімерні композити – новітні матеріали з високою стабільністю тертя.

Вибір матеріалу значно впливає на ефективність і довговічність гальм.

Переваги та недоліки колодкових гальм наступні:

Переваги:

- проста конструкція та обслуговування;
- низька вартість виготовлення;
- надійність у різних кліматичних умовах;
- сумісність із будь-якими типами коліс;
- відсутність потреби в високоточних допусках.

Недоліки:

- значний знос поверхні колеса;
- підвищений рівень шуму під час гальмування;
- обмежені можливості тепловідведення;
- менша ефективність порівняно з дисковими гальмами;
- залежність коефіцієнта тертя від температури та атмосферних умов.

У сучасній залізничній інженерії спостерігається перехід від традиційних чавунних колодок до композиційних матеріалів, що дозволяє:

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- зменшити знос колісної пари,
- підвищити стабільність гальмування,
- зменшити шум та вібрації,
- покращити екологічність експлуатації.

Також активно розробляються системи автоматичного регулювання зазору між колодками та колесом, що підвищує точність роботи та зменшує потреби в обслуговуванні.

Таким чином найпростішим методом гальмування транспортерів є колодкове гальмо. Колодка притискається до поверхні кочення колеса. Ця поверхня зроблена для забезпечення якомога меншого тертя, коли колесо котиться по рейках, і тому в гальмі досягається не таке високе тертя, що означає, що колодку потрібно притискати з дуже великою силою до коліс. Система тягових важелів, тягових та штовхальних тяг створює тиск, який передає рух гальмівного поршня до гальмівних колодок на всіх колесах. Головним недоліком гальмівних колодок є те, що вони можуть самоколиватися, скрипіти та зношувати протектор коліс.

### 1.3.2 Магнітне рейкове гальмо транспортера.

Магнітне рейкове гальмо є одним з найефективніших видів екстрених гальмівних систем, що застосовуються на високошвидкісних рейкових транспортних засобах. Принцип його дії базується на використанні електромагнітних сил, які створюють потужний гальмівний ефект шляхом прямої взаємодії гальмівного башмака з поверхнею рейки. На відміну від традиційних колодкових або дискових гальм, магнітне рейкове гальмо не залежить від стану колісної поверхні та може забезпечувати надійне зниження швидкості навіть за умов зменшеного коефіцієнта зчеплення між колесами й рейкою (дощ, ожеледь, листя, забруднення).

Система магнітного гальма складається з таких основних елементів:

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

- електромагнітів з обмотками, що формують потужне магнітне поле;
- гальмівного башмака (магнітної планки), який опускається безпосередньо на рейку;
- механізму приводу (пневматичного, електромеханічного або гідравлічного);
- системи керування та живлення електромагнітів;
- датчиків контролю положення та стану гальма.

Під час активації гальмівної системи електроживлення подається на електромагніти, внаслідок чого виникає сильне магнітне поле. Це поле притягує гальмівний башмак до рейки з великою силою. Коли гальмівний елемент контактує з рейкою, між поверхнями виникає значна сила тертя, що забезпечує інтенсивне сповільнення поїзда. Гальмівний момент у такій системі залежить від величини магнітного потоку, площі контакту, маси гальмівної планки та швидкості руху.

Завдяки своїм фізичним характеристикам магнітне гальмо має низку вагомих переваг:

1. Висока ефективність при екстремому гальмуванні. Система здатна створювати значні гальмівні сили, які перевищують можливості звичайних фрикційних гальм.
2. Незалежність від зчеплення колеса з рейкою. Оскільки гальмування відбувається безпосередньо по рейці, навіть за умов ковзання коліс магнітне гальмо залишається ефективним.
3. Надійність в умовах несприятливої погоди. Дощ, сніг чи обмерзання практично не впливають на силу притягання, що забезпечує стабільність гальмування.
4. Швидка реакція та стабільний гальмівний ефект. Система включається миттєво, не потребуючи часу на тиск у магістралях або розподілення повітря, як у пневматичних гальмах.
5. Простота конструкції приводного механізму.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Попри очевидні переваги, система має й певні недоліки:

1. Підвищене зношування рейок. Безпосередній контакт гальмівної планки з рейкою збільшує її абразивне пошкодження.
2. Високе енергоспоживання. Для створення потужного магнітного поля необхідні значні електричні ресурси.
3. Неможливість використання для тривалого робочого гальмування. Магнітне гальмо призначене переважно для аварійного або допоміжного гальмування.
4. Необхідність спеціального обладнання рухомого складу. Зокрема джерел живлення підвищеної потужності та датчиків контролю.

Магнітні рейкові гальма широко застосовуються:

- на високошвидкісних поїздах (наприклад, ICE, Shinkansen, TGV);
- у потягах метрополітену;
- на міських трамваях;
- у залізничних транспортних засобах, що потребують аварійного гальмування з великих швидкостей.

У поєднанні з дисковими, колодковими та електродинамічними системами магнітне гальмо формує комплексну систему безпеки, що забезпечує ефективність у будь-яких робочих та аварійних режимах.

Магнітне рейкове гальмо є важливим елементом сучасних гальмівних систем, які забезпечують високу безпеку руху транспортерів. Воно дозволяє значно скоротити гальмівний шлях та підтримувати ефективність у складних умовах експлуатації. Завдяки простоті конструкції, швидкодії та незалежності від властивостей тертя колеса з рейкою, магнітне гальмо залишається актуальним засобом аварійного гальмування, особливо у високошвидкісному та міському залізничному транспорті.

Таким чином магнітне рейкове гальмо складається з довгастого магніту, розміщеного трохи вище рейки між двома парами коліс поїзда. Для гальмування через магніти пропускається постійний струм, який потім

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

всмоктується в колію. Оскільки гальмування здійснюється виключно за рахунок магнетизму, зовнішні умови не мають значення; гальмо однаково добре працює як на сухих, так і на обледенілих рейках. Це гальмо не можна використовувати як єдине гальмо, оскільки воно занадто сильно гальмує на низьких швидкостях.

### 1.3.3 Вихрострумове гальмо транспортера.

Вихрострумове гальмо є одним із сучасних типів безконтактних гальмівних систем, що застосовуються на високошвидкісному рейковому транспорті. Принцип його дії базується на явищі електромагнітної індукції, коли при взаємодії змінного магнітного поля з провідним матеріалом у ньому виникають вихрові струми. Ці струми створюють електромагнітні сили, які протидіють руху транспорту, забезпечуючи плавне та стабільне уповільнення без механічного контакту з поверхнею рейки або колеса [6].

Принцип дії вихрострумowego гальма наступний. Основою системи є індуктори – електромагніти або постійні магніти, встановлені на візках рухомого складу та розташовані на малій відстані від головки рейки або поверхні колісно-рейкової системи. Під час роботи:

1. Індуктор створює магнітне поле.
2. Під транспортером проходить металевий елемент – рейка або гальмівний диск.
3. У цьому провіднику індуються вихрові струми.
4. Згідно із законом Ленца, вихрові струми створюють поле, яке протидіє причині їх виникнення, тобто руху індуктора.
5. У результаті виникає сила електромагнітного гальмування.

Гальмівний момент прямо залежить від магнітної індукції, швидкості руху та електропровідності матеріалу, у якому виникають струми. Тому

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

вихроструміві гальма особливо ефективні на високих швидкостях і менш дієві при низьких.

Типова система вихрострумівого гальма включає:

- індуктори (постійні або електромагніти);
- елементи підвіски, що утримують індуктори над рейкою;
- блок керування та живлення;
- датчики положення;
- систему охолодження (для електромагнітних вихрострумівих гальм).

Для високошвидкісних транспортерів система часто встановлюється на спеціальних кронштейнах візків і підтримує фіксовану відстань до рейки під час руху.

На практиці застосовують два основні різновиди:

1. Рейкові вихроструміві гальма (Rail-EDB). Індуктори розташовуються над рейкою. Струми виникають безпосередньо в її поверхні. Переваги: потужне гальмування на високих швидкостях, безконтактність. Недоліки: можливе нагрівання рейки та обмеження застосування в тунелях через теплові ефекти.

2. Дискові вихроструміві гальма (Disc-EDB). Струми виникають у металевих дисках, що обертаються разом із колесом. Переваги: менший вплив на інфраструктуру, стабільність роботи. Недоліки: ефективність обмежена теплостійкістю дисків.

Вихрострумівая система має низку важливих переваг:

1. Безконтактність. Відсутність механічного зношування елементів значно продовжує ресурс обладнання.

2. Висока ефективність на великих швидкостях. Гальмівна сила зростає зі збільшенням швидкості руху.

3. Стабільність гальмування. Гальмівний момент плавний, без ривків та залежності від погодних умов.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

4. Відсутність впливу на зчеплення. На відміну від інших гальмівних систем, вихро струмове гальмо не створює ковзання коліс.

5. Зменшення шуму. Система працює практично беззвучно, що є важливим для міського та швидкісного транспорту.

Попри значні переваги, вихро струмове гальмо має і певні недоліки:

1. Зменшення ефективності при низьких швидкостях. При швидкостях близько 20-30 км/год гальмівний момент істотно знижується.

2. Нагрів провідних елементів. Виникнення вихрових струмів супроводжується значними тепловими втратами.

3. Вимоги до енергопостачання. Електромагнітні системи споживають багато електроенергії.

4. Інфраструктурні обмеження. У деяких країнах заборонено використання рейкових вихро струмових гальм у закритих приміщеннях через ризик перегріву рейок.

Вихро струмові гальма широко застосовуються у:

- високошвидкісних поїздах (TGV, ICE, Shinkansen, CRH);
- швидкісних трамваях;
- поїздах метро нового покоління;
- магнітопідвісних транспортних системах.

У комбінованих гальмівних комплексах вони працюють разом з пневматичними, дисковими та магнітними гальмами, забезпечуючи ефективно та безпечно гальмування у всіх режимах руху.

Вихро струмове гальмо рейкового транспорту є високотехнологічним рішенням, що забезпечує безконтактне, плавне та ефективно гальмування на великих швидкостях. Завдяки електромагнітній природі створення гальмівного моменту, система характеризується високою надійністю та мінімальним зношуванням елементів. Незважаючи на певні експлуатаційні обмеження, вихро струмові гальма залишаються важливою складовою

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сучасних гальмівних комплексів та є ключовим елементом безпечної експлуатації високошвидкісного рейкового транспорту.

Таким чином вихрострумове гальмо схоже за зовнішнім виглядом і розташуванням на магнітне рейкове гальмо, але замість магнітів воно складається з котушки, через яку протікає змінний струм. Потім у рейці індукується сильне магнітне поле, яке перетворює кінетичну енергію на тепло. Ці вихрові струми зменшуються зі зменшенням швидкості, тому вихрострумове гальмо не можна використовувати як єдине гальмо. Іншими недоліками є те, що сигнальна система в рейці може бути порушена струмами, а рейка нагрівається, що збільшує ризик сонячних вигинів.

#### 1.3.4 Дискове гальмо транспортера.

Дискові гальма є одним із найпоширеніших та найбільш ефективних видів фрикційних гальмівних систем, що використовуються у сучасному транспорті. Вони забезпечують стабільне та прогнозоване гальмування, витримують високі теплові навантаження та характеризуються довгим ресурсом роботи. Завдяки своїй конструктивній надійності дискові гальма застосовуються як на пасажирських так і у вантажних перевезеннях, а також у швидкісному русі, де традиційні колодкові гальма мають обмежену ефективність.

Типова дискова гальмівна система поїзда складається з таких основних елементів, рис. 1.4 [6, 8]:

- гальмівний диск – виготовляється зі сталі або високоміцних сплавів, закріплюється на колісній парі або на осі;
- гальмівні колодки (накладки) – містять фрикційний матеріал, стійкий до високих температур;
- супорт або гальмівний затискач – механізм, що притискає колодки до диска;

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

- привід гальма – може бути пневматичним, електромеханічним або гідравлічним;

- датчики зносу та температури – застосовуються у сучасних системах для моніторингу стану гальм.

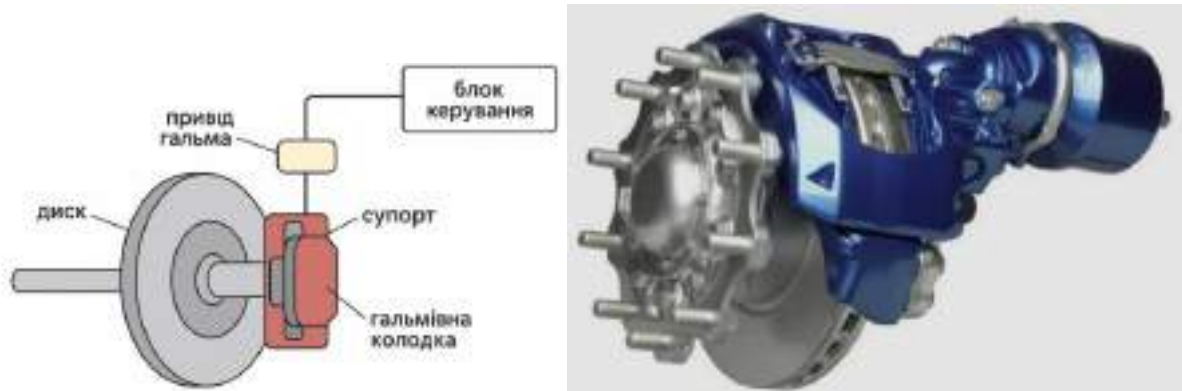


Рисунок 1.4 – Діскове гальмо транспортера.

Гальмівний диск може мати численні вентиляційні канали, що покращують відведення тепла та зменшують ризик перегріву.

Принцип роботи наступний. Під час гальмування на гальмівні колодки подається зусилля від пневматичного або електромеханічного приводу. Колодки притискаються до обертового диска, створюючи фрикційний момент, який перетворює кінетичну енергію руху поїзда у теплову. Відбувається уповільнення колісної пари та всього рухомого складу.

Основні фізичні процеси, що відбуваються:

1. виникнення сили тертя між диском і накладками;
2. перетворення механічної енергії у теплову;
3. розсіювання тепла через матеріал диска та навколишній потік повітря;
4. поступове зниження швидкості до повної зупинки.

Діскове гальмо працює стабільно навіть за значних навантажень, що робить його ефективним при багатократних або тривалих гальмуваннях.

До ключових переваг дискових гальмівних систем належать:

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

1. Висока термостійкість. Диски здатні витримувати великі теплові навантаження без суттєвої втрати ефективності.

2. Плавність гальмування. Завдяки рівномірному контакту накладок з диском гальмівний момент формується стабільно, без ривків.

3. Менше зношування коліс порівняно з колодковими гальмами, які діють безпосередньо на колесо.

4. Стійкість до забруднень та погодних умов. Волога, сніг чи пил менше впливають на ефективність роботи.

5. Висока ремонтпридатність. Замінити накладки або диск значно простіше, ніж деталі інших видів гальм.

6. Можливість встановлення кількох дисків на одну вісь, що підвищує загальний гальмівний момент.

Попри значні переваги, системи мають певні недоліки:

1. Високі теплові навантаження можуть спричинити деформації диска при порушенні режимів охолодження.

2. Велика маса та вартість дискових систем у порівнянні з колодковими.

3. Необхідність точної роботи приводу та механізмів супорта.

Залежно від конструкції та призначення, розрізняють:

1. Вентильовані дискові гальма. Мають внутрішні канали для вентиляції. Використовуються на високошвидкісних поїздах.

2. Моноблочні диски. Виготовляються з цільного металу, мають високу міцність і надійність.

3. Накладні (наболчені) диски. Кріпляться до маточини болтами, що полегшує їх заміну.

4. Композитні диски. Виготовляються із застосуванням композитних матеріалів, мають меншу масу та кращу термостійкість.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дискові гальма часто працюють у поєднанні з електродинамічними, магнітними або вихрострумовими гальмами, забезпечуючи комплексну систему гальмування, оптимізовану для різних умов руху.

Дискове гальмо платформи або транспортера є одним із ключових елементів сучасної гальмівної системи. Воно забезпечує високу ефективність, стабільність та надійність гальмування, особливо при високих швидкостях і великих навантаженнях. Завдяки своїй конструкції дискові гальма здатні витримувати значні теплові режими, мають довгий ресурс і відзначаються високими показниками безпеки. Саме тому вони посідають важливе місце у комплексі гальмівних засобів рухомого складу транспорту.

Таким чином дискове гальмо вважають найефективнішим гальмом. Як і у випадку з колодковим гальмом, тертя використовується для уповільнення обертання колеса, але замість тиску на зношувану поверхню колеса, гальмівна колодка притискається до гальмівного диска. Вони розміщені з боків коліс або на осі між колесами. Диски, встановлені на колесах, є двосекційними та прикручуються до обох боків коліс. У дискових гальмах можна отримати більший коефіцієнт тертя порівняно з колодковими гальмами, оскільки поверхню не потрібно адаптувати для кочення колеса по ній. Ще однією перевагою є те, що температуру дисків можна підтримувати нижчою, якщо у вас є подвійні диски з вентиляцією між ними.

#### 1.4 Гальмівні колодки та накладки вантажних платформ і транспортерів.

##### 1.4.1 Загальна характеристика гальмівних колодок та накладок.

Гальмівні колодки та накладки є критичними елементами гальмівної системи вантажних платформ, самохідних транспортерів, рейкових візків та інших допоміжних транспортних засобів, що використовуються на

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

промислових підприємствах. Їх основне призначення полягає у створенні контрольованої сили тертя між нерухомою частиною гальмівного механізму (колодкою або накладкою) та рухомою поверхнею – гальмівним барабаном, колесом, диском або рейкою. Саме перетворення кінетичної енергії руху в тепло шляхом тертя забезпечує уповільнення, зупинку та фіксацію транспортного засобу в потрібному положенні.

У вантажних платформ, що працюють у складських зонах, цехах металургійних комбінатів, машинобудівних підприємствах, логістичних вузлах, гальмівні колодки піддаються підвищеним навантаженням через значні маси вантажу, нерівномірність руху та складні умови експлуатації (пил, абразивні частинки, підвищена температура, вологість). Це вимагає використання високостійких матеріалів і спеціальних конструктивних рішень, які забезпечують стабільний коефіцієнт тертя та високу механічну міцність.

Гальмівні колодки зазвичай виготовляються зі спеціальних композитних матеріалів, які зазвичай мають майже постійний коефіцієнт тертя приблизно 0,3-0,4. Композитний матеріал скріплений зі сталеву пластину, яка утворює задню частину колодки. Сталева пластина має кріпильний пристрій для кріплення накладки до її тримача накладки, який, у свою чергу, з'єднаний з одним із двох важелів супорта [9-11].

Гальмівні накладки розроблені таким чином, щоб мати найкращу можливу контактну поверхню, і існують варіанти з прорізами та без них. При застосуванні сили накладка рівномірно притискається до гальмівного диска.

Знос гальмівних накладок залежить від тепла тертя, яке виникає під час гальмування. Накладки з композитних матеріалів можуть витримувати температури від 320 до 480 °С. Спечені накладки використовуються для транспортних засобів, що працюють у важких умовах, які можуть витримувати вищі температури [7, 12].

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

#### 1.4.2 Класифікація гальмівних колодок та накладок.

Гальмівні колодки та накладки поділяються за кількома основними ознаками:

##### 1) За типом гальмівного механізму:

1. Для колодкових гальм. Використовуються у барабаних та рейкових гальмах, де колодка притискається до барабана або зовнішньої поверхні колеса.

2. Для дискових гальм. Накладки встановлюються на гальмівні супорти і притискаються до диска.

3. Для магнітно-рейкових гальм. Використовуються у важких платформах на рейках; накладка взаємодіє безпосередньо з рейкою під дією електромагнітів.

4. Для стоянкових механічних гальм. Зазвичай мають більший коефіцієнт тертя і забезпечують фіксацію платформи у статичному стані.

##### 2) За матеріалом тертя.

1. Органічні накладки (resin-based). Містять фенольні смоли, волокна, графіт; мають низький шум і середній рівень зносу. Володіють наступними властивостями: коефіцієнт тертя: 0,25...0,35; стабільність тертя: помірна, знижується при нагріванні; максимальна робоча температура: 180...250 °С; зносостійкість: середня; вплив на барабан/диск: мінімальний, не викликають сильного абразивного зносу; рівень шуму: низький; стійкість до вологи та пилу: середня; вартість: низька.

Переваги: м'яка і плавна робота; низькі вібрації; мінімальний знос металевих поверхонь.

Недоліки: не підходять для великих навантажень; інтенсивно старіють при перегріві; зниження ефективності при тривалому гальмуванні.

2. Напівметалеві накладки. Склад: сталь, мідь, графіт, абразивні добавки, полімерні смоли. Властивості: коефіцієнт тертя: 0,35...0,45;

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

стабільність тертя: хороша; максимальна робоча температура: 300...350 °С; зносостійкість: висока; вплив на барабан/диск: збільшений абразивний знос; рівень шуму: середній; стійкість до вологи та пилу: висока; вартість: середня.

Основні переваги наступні: витримують важкі умови експлуатації; хороша ефективність при нагріванні; підходять для важких вантажних платформ. Основні недоліки такі: більший рівень шуму; прискорюють знос гальмівних барабанів і дисків.

3) Металокерамічні (феродоуглеродисті) накладки. Мають наступний склад: бронза або мідь у поєднанні з керамічними та графітовими частинками; випікаються методом порошкової металургії. Володіють гарними властивостями такими як: високий коефіцієнт тертя: 0,40...0,55; дуже висока стабільність тертя; максимальна робоча температура сягає 600...800 °С; дуже висока зносостійкість; відмінна стійкість до вологи та агресивних середовищ; але вплив на барабан/диск: високий абразивний вплив; рівень шуму: вищий, ніж у напівметалевих; вартість: висока.

Слід виділити їх переваги, а саме: практично не схильні до фейдінгу; стабільна робота при екстремальних навантаженнях; великий ресурс. Також мають і певні недоліки: підвищений шум; дорогі; потребують високоміцних гальмівних поверхонь.

4) Керамічні композити. Мають наступний склад: керамічні матриці з армуванням вуглецевими, базальтовими або скловолокнами; можуть містити графіт і модифіковані смоли.

Властивості: коефіцієнт тертя: 0,45...0,60; Стабільність тертя: найкраща серед усіх матеріалів; максимальна робоча температура: до 1000 °С; дуже висока зносостійкість; вплив на барабан/диск: мінімальний, працюють м'якше за металокераміку; рівень шуму: низький-середній; стійкість до середовищ: найвища серед усіх; а вартість – дуже висока.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Таким чином можемо дійти до наступних висновків. Органічні накладки підходять для легких візків, де відсутні великі теплові та силові навантаження. Напівметалеві – оптимальний компроміс для більшості вантажних платформ та транспортерів середньої вантажності. Металокерамічні використовуються у важких рейкових візках, де температура та навантаження значно вищі за середні. Керамічні композити – найкращі за властивостями, але надто дорогі для масового застосування, тому їх ставлять лише на критично важливу техніку.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

## 2 СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ГАЛЬМА ТРАНСПОРТЕРА В СЕРЕДОВИЩІ САПР

### 2.1 Спрощена модель гальма.

За базу було взято спрощену модель гальма в САПР, що була лише порожньою оболонкою і складалась з поверхонь. Вони були розміщені таким чином, що гальмо транспортера було, тривимірним твердим тілом. Щоб використовувати більше функцій Solid Edge, а також експортувати гальмо в інші програми, довелося створити твердотільні деталі [13-15]. Дана модель показана на рисунку 2.1 нижче. Багато деталей склалися лише з однієї поверхні, і для них під час моделювання були оцінені та прийняті інші геометрії. Нижче наведено опис найважливіших частин моделі та їх складання.

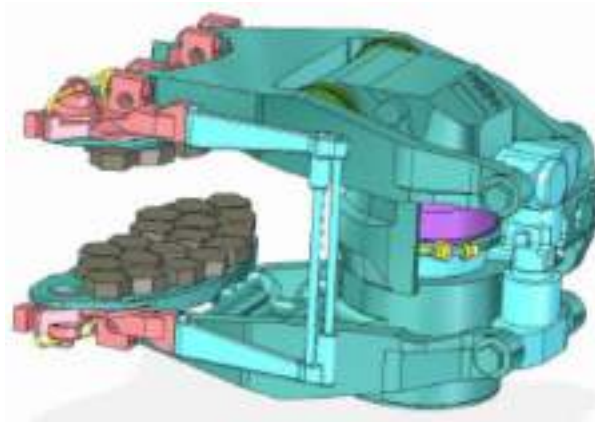


Рисунок 2.1 – Спрощена модель САПР.

#### 2.1.1 Важелі.

Два важелі гальма прикріплені до саморегулювального механізму одним кінцем, а на іншому кінці знаходяться тримачі колодок. Обидва важелі кріпляться до корпусу гальма різними способами: один за допомогою звичайного вала, а інший за допомогою ексцентрикового вала, який сприяє

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

руху гальма. У наведеній моделі обидва важелі ідентичні, настільки ж близькі, як на маленькій колії. Під час створення нової моделі було змодельовано та використано лише одне плече. Нижче наведено спрощення, які були зроблені, див. рис. 2.2 та рис. 2.3 для розташування змін.

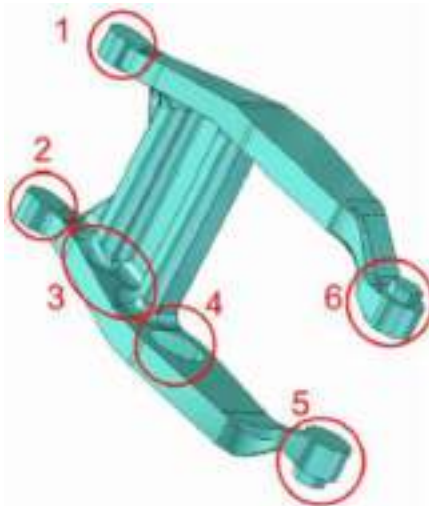


Рисунок 2.2 – Важіль з позначками 1-6 для змін.

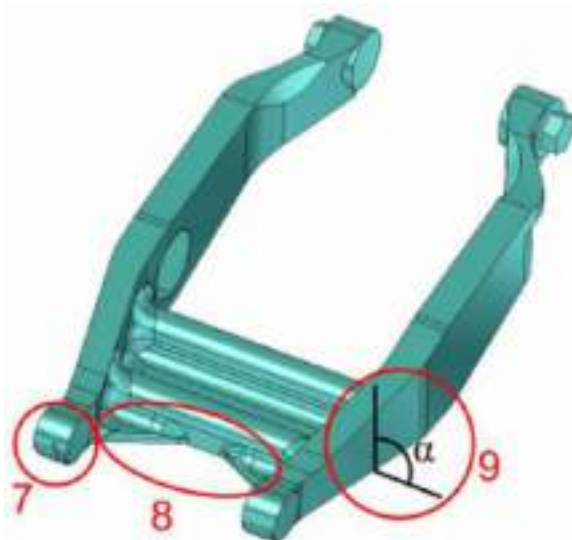


Рисунок 2.3 – Важіль з позначками 7-9 для змін.

Позиції 1,2 - на кінцях важелів зроблені отвори для кріплення тримачів колодок; 3 - заокруглення на внутрішній стороні важелів дещо спрощені, оскільки їх було важко відтворити; 4 - отвори для кріплення отримали бічні

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

сторони та дно; 5,6 - гайки видалено, а на кінцях важелів зроблені отвори для кріплення саморегулювального механізму. 7 - канавку на дальньому кінці одного боку кожного важеля видалено. Це було додано як ефект моделі, що складається лише з поверхонь. Пружина була притиснута до важеля, і в місці контакту в поверхні з'явився отвір. 8 - заокруглення на короткій стороні важелів (у напрямку до колодок) були значно спрощені, оскільки їх було важко відтворити. 9 - сторони важелів у новій моделі були зроблені перпендикулярними, оскільки кут відхилявся лише на 0,5-1,5 градуса від 90 градусів. Це значно спростило моделювання деталі.

На рисунку 2.4 показано, як виглядає новий змодельований важіль.

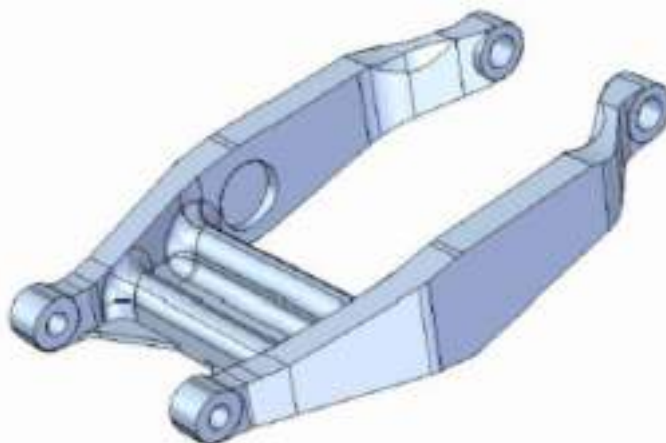


Рисунок 2.4 – Нова модель важеля.

### 2.1.2 Саморегулювальний механізм та ексцентриковий вал.

Важелі з'єднані саморегулювальним механізмом. Він регулює відстань між важелями, але тут змодельовано жорстко та має постійну довжину. Інші спрощення (див. рисунок 2.5), які були зроблені: 1 та 3: Зроблено отвори для кріплення саморегулювального механізму до важелів. 2: Заокруглення на з'єднанні були спрощені.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

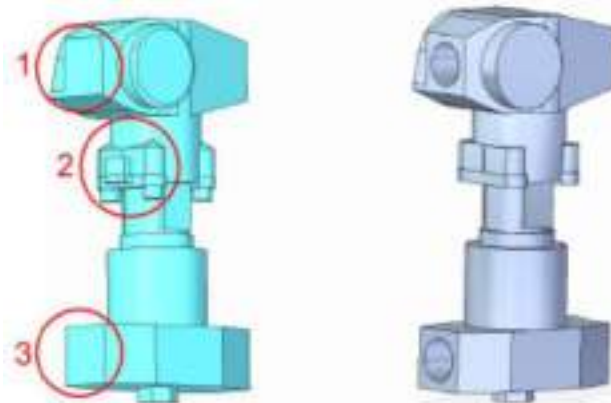


Рисунок 2.5 – Саморегулювальний механізм, до (ліворуч) та після (праворуч).

Два різні вали були змодельовані відповідно до діаметра отворів у важелях та діаметра отворів у корпусі гальма, в яких мають бути розміщені вали, див. рисунок 2.6.

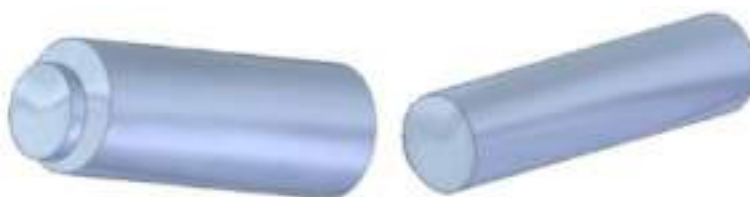


Рисунок 2.6 – Ексцентриковий вал та вал для другого гальмівного важеля.

### 2.1.3 Корпус гальма.

Корпус гальма містить механізм, який перетворює різницю тиску на рух у важелях шляхом обертання в ексцентриковому валу. Механізм тиску розташований у середній частині корпусу, це також була єдина частина корпусу, яка була змодельована в базовій моделі, щоб її внутрішню частину можна було побачити.

У верхній частині корпусу гальма знаходиться ексцентриковий вал та механізм, який змушує його обертатися.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

У нижній частині знаходиться вал для важеля, на який не впливає механізм стисненого повітря, тут також є місце для стоянкового гальма, проте в цьому проекті його не було.

Оскільки значна частина внутрішньої частини корпусу гальма була невідомою, під час моделювання було зроблено багато власних припущень, варіантів вибору та спрощень. Наступні пункти детальніше описують зміни, див. рисунок 2.7, 2.8 та 2.9.

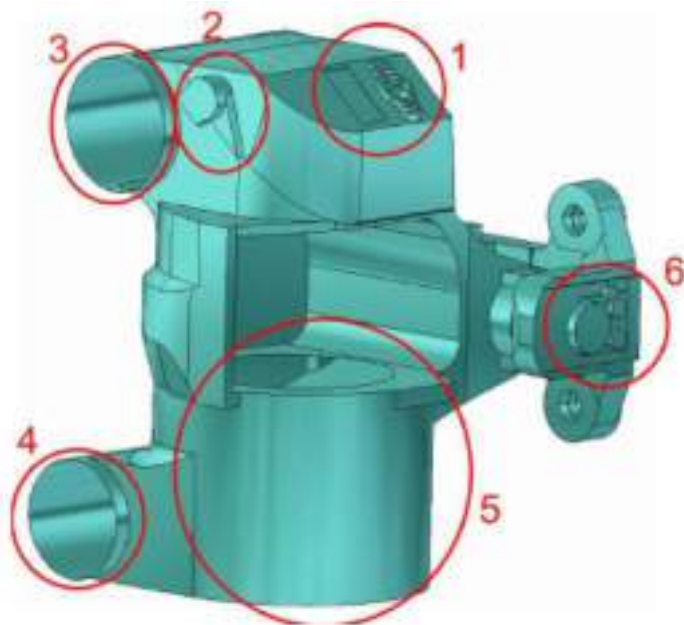


Рисунок 2.7 – Зміни в корпусі гальма, пронумеровані 1-6.

1: Логотип компанії та заглиблений прямокутник для даних про продукт були видалені з верхньої частини корпусу, оскільки вони не впливають на функцію гальма.

2: Виступ для кріплення видалено, оскільки він не впливає на функцію гальма, яку буде показано тут.

3: Оскільки стінки корпусу не мали товщини в отворі для ексцентрикового вала, її було встановлено на 5 мм.

4: Нижня частина корпусу гальма також не мала товщини навколо вала. Однак, виходячи з діаметра та розташування отвору в важелі, можна було визначити, наскільки великим має бути вал і де його слід розмістити.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

5: Нижня частина корпусу гальма була зроблена суцільною, оскільки стоянкове гальмо не було змодельовано.

6: Деталі підвіски, такі як гайки та гвинти, були видалені, оскільки вони не впливають на функцію гальма, як буде описано тут.

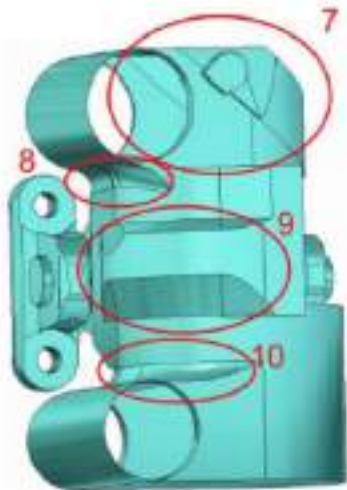


Рисунок 2.8 – Модифікації корпусу гальма під номерами 7-10.

7: Верхній частині корпусу надано товщину оболонки 5 мм.

8-10: Заокруглення, які не впливають на функцію, яку буде показано, були видалені.

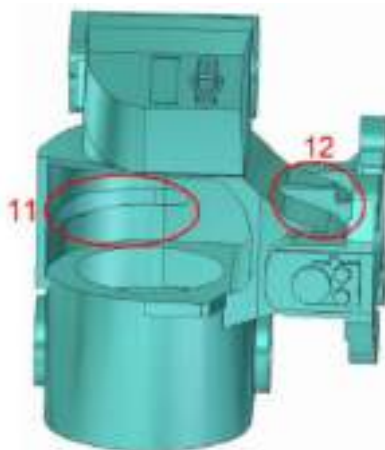


Рисунок 2.9 – Модифікації корпусу гальма під номерами 11-12.

11: Фаска на внутрішній стороні середньої частини видалена, а стінки зроблені гладкими.

12: Підсилення видалено.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

#### 2.1.4 Механізм стисненого повітря.

Посередині корпусу гальма розташований механізм стисненого повітря, який керує рухом гальма. Він складається з верхньої та нижньої чаш, діафрагми, поворотної пружини та циліндра стисненого повітря з поршневим штоком, з'єднаним з ексцентриковим валом.

Нижня чаша підключена до системи стисненого повітря поїзда, тому тиск усередині цієї чаші змінюється залежно від того, чи потрібно гальмо використовувати чи ні. У наведеній моделі змодельовано лише дві чаші, а також діафрагму та різні затискачі, що утримували чаші разом, вони були модифіковані відповідно до рисунку 2.10.

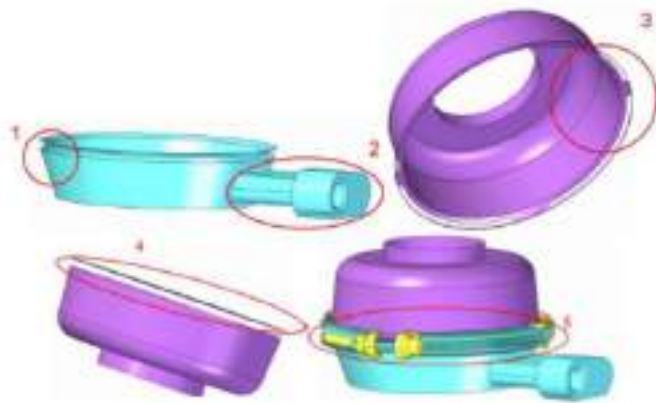


Рисунок 2.10 – Чаші, діафрагми, затискачі та ущільнення.

1: Внутрішня та зовнішня поверхні нижньої чаші з'єднані таким чином, щоб зробити чашу суцільною.

2: Повітрязабірник видалено, оскільки потік повітря не відображається у створеній моделі.

3: Верхня чаша складалася лише з однієї поверхні, тому їй була надана товщина та зроблена суцільною.

4: Мембрану між нижньою та верхньою чашами видалено, оскільки її видовження неможливо змоделювати в Solid Edge [16].

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

5: Затискачі та різні ущільнення, розміщені між чашами та навколо них, видалено та замінено лише одним ущільненням, яке забезпечує правильну відстань між чашами.

Циліндр зі стисненим повітрям, шток поршня та його з'єднання з ексцентриковим валом не були включені до даної моделі. Тому група вивчила та ознайомила з тим, як цей механізм має бути спроектований та функціонувати, використовуючи креслення інших гальм. Модель працює та рухається належним чином, але неясно, чи це рішення, знайдене в реальному гальмі. На рисунку 2.11 показано цей механізм.



Рисунок 2.11 – Внутрішній гальмівний механізм.

#### 2.1.5 Розпірні кільця, колодки та тримачі колодок.

Між важелем та корпусом гальма були розміщені розпірні кільця, частково як розпірні вставки, а частково як кожух навколо ексцентрикового вала. Їх було видалено, оскільки вони не впливають на функцію гальмування, яку слід описати, див. рисунок 2.12.

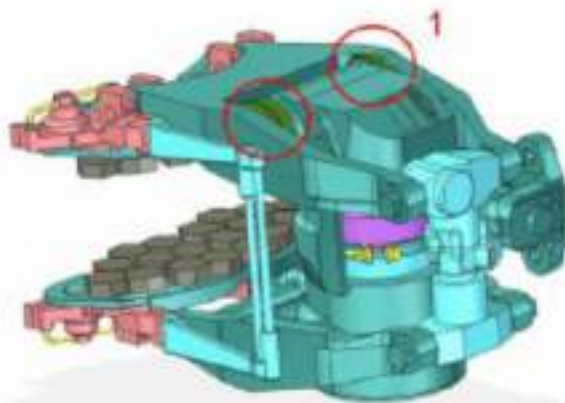


Рисунок 2.12 – Розташування розпірних кілець.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

За допомогою отриманих креслень було змодельовано три різні колодки.

Тримачі колодок встановлені на найдовшому кінці важелів. Потім на них накручуються кронштейни колодок, де кріпляться гальмівні колодки. Механізм регулювання кута також кріпиться до тримачів колодок, що змушує тримачі колодок, а отже, і колодки, залишатися рівно одна до одної.

Зміни показано на рисунках 2.13 та 2.14 відповідно. На останньому рисунку також показано, як виглядає новий тримач колодок.



Рисунок 2.13 – Розташування пружини.

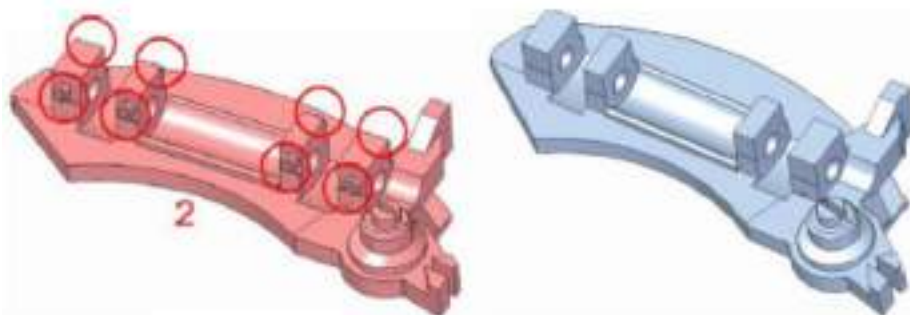


Рисунок 2.14 – Тримач колодок до та після.

1: Жовті пружини видалено, оскільки їхня функція не має значення для аналізу.

2: Гайки та гвинти видалено, оскільки вони не впливають на функцію гальма, що буде показано тут.

Для аналізу методом скінченних елементів деталь було додатково спрощено.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Кріплення колодок було спрощено наступним чином, див. також рисунок 2.15.

1: Додаткову пластину на нижній стороні кріплення прокладки видалено.

2: Невеликі отвори в пластині видалено.

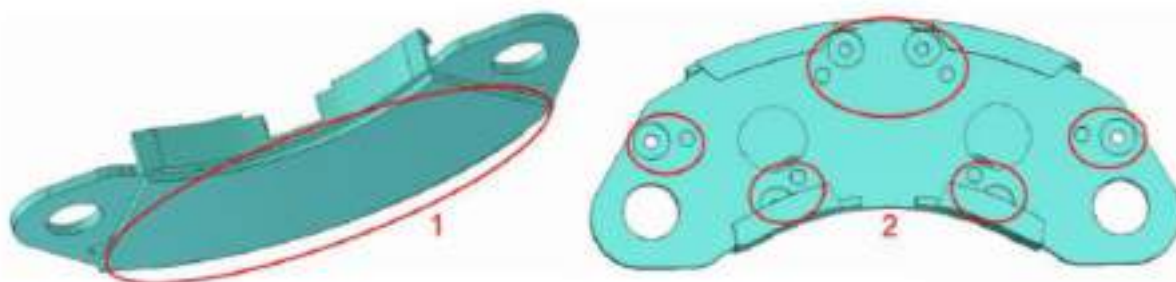


Рисунок 2.15 – Кріплення накладки з різних ракурсів.

Для аналізу методом скінченних елементів (МСЕ) було зроблено подальші спрощення.

#### 2.1.6 Механізм регулювання кута.

До двох тримачів колодок прикріплено механізм регулювання кута, який утримує колодки рівно одна до одної. Він складається з двох частин, кожна з яких має вал і циліндричний отвір. Оскільки одна частина має вал на крайньому кінці, а інша - отвір на крайньому кінці, частини з'єднуються одна з одною, що дозволяє колодкам вирівнюватися одна з одною.

До цих частин не було внесено жодних суттєвих спрощень, але ті, що були зроблені, показані на рисунку 2.16.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

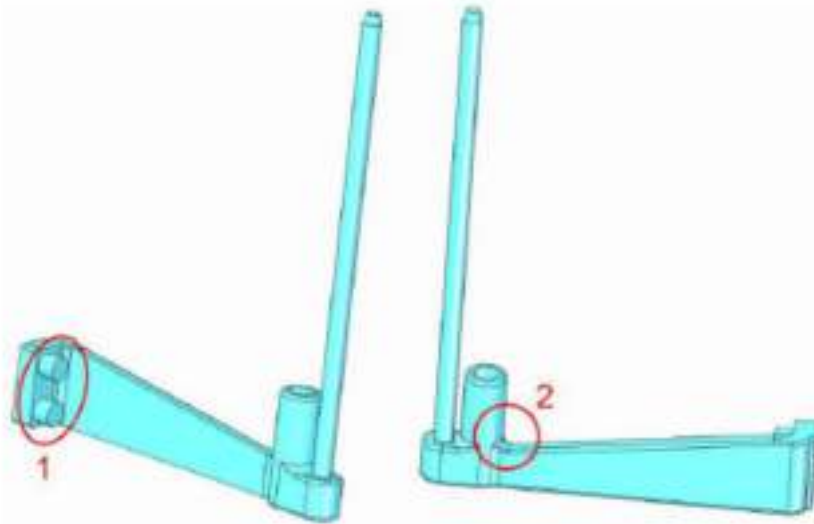


Рисунок 2.16 – Механізм регулювання кута.

1: Головки гвинтів видалено, оскільки вони не впливають на функцію, що описується.

2: Заокруглення не змодельовано точно так, як у наведеній моделі.

#### 2.1.7 Збірка моделі.

Після моделювання всіх деталей їх об'єднали в збірку, так звану «ввузлу». Вона також включала рейкову деталь та колесо, які також були змодельовані в Solid Edge проектною групою. Насправді колесо поїзда зафіксоване відносно корпусу гальма, тоді як гальмівні колодки можуть рухатися, тому вони не завжди паралельні гальмівному диску. Однак це стосується лише того випадку, коли гальмівні колодки не торкаються гальмівного диска; коли вони контактують з диском, вони адаптуються та стають плоскими. Оскільки цей рух неможливо було змодельувати, одну гальмівну колодку було прикріплено до гальмівного диска, що дозволило уникнути проблеми, коли гальмівні колодки мали кут до гальмівного диска під час моделювання. На рисунку 2.17 нижче показано, як виглядає готова

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збірка.

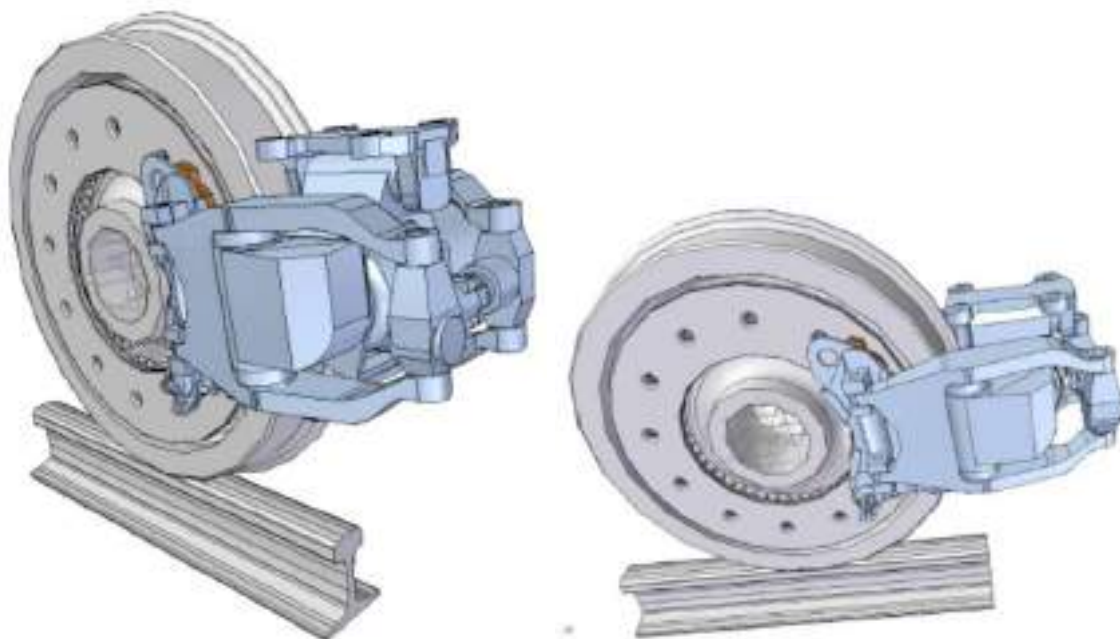


Рисунок 2.17 – Колесо з гальмівним диском, рейкою та гальмівним супортом цілком у двох різних видах.

## 2.2 Моделювання в ANSYS.

Контактна взаємодія між гальмівним диском та гальмівною накладкою мають велике значення в багатьох типах аналізів, таких як дослідження генерації частинок, термічний аналіз накладки та диска, а також аналіз стирання накладки – це деякі приклади [13-16].

Нерівномірний контактний тиск на диск може призвести до більш нерівномірного розподілу температури в диску, ніж у випадку, коли тиск розподіляється повністю рівномірно. Знос накладки також може бути нерівномірним.

У програмі FEM ANSYS було проведено кілька аналізів розподілу контактного тиску між накладкою та диском. Гальмівна сила була розрахована, а потім застосована в програмі під час аналізів.

						КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			48

### 2.2.1 Розрахунок гальмівної сили.

Щоб визначити, яка гальмівна сила потрібна на одне гальмо у візку транспортера, було проведено простий аналіз сили. Було прийнято припущення, що всі колеса візка гальмують з однаковим уповільненням, і розрахунки передбачали, що розподіл ваги на всі колеса транспортера був однаковим.

Використовуючи припущені дані про транспортер, засновані на даних з [5], спочатку можна розрахувати силу тертя,  $F_{h(k-p)}$ , між колесом та рейкою. Навантаження на вісь при експлуатаційній вазі (транспортер без навантаження),  $m_V$ , було прийнято рівним 18,5 тонн і розподілено порівну на два колеса осі. Коефіцієнт тертя між колесом і рейкою буде змінюватися, і при вимірюваннях на сухій рейці він був виміряний у діапазоні 0,2-0,4, тут коефіцієнт вибрано рівним 0,4, оскільки потрібно розрахувати максимально можливу силу тертя.

Нормальна сила на колесі становить:

$$N_h = \frac{m_V g}{2}, \quad (2.1)$$

а сила тертя між колесом і рейкою,

$$F_{h(k-p)} = N_h \cdot \mu. \quad (2.2)$$

Це максимальна сила, яку можна отримати між колесом і рейкою.

Підставивши початкові значення у формули 2.1 і 2.2, отримаємо:

$$N_h = \frac{18500 \cdot 9,81}{2} = 90742,5 \text{ Н, або } 90,7 \text{ кН. } F_{h(k-p)} = 90742,5 \cdot 0,4 = 36297 \text{ Н, або } 36,3 \text{ кН.}$$

Момент, який створює ця сила тертя, має бути збалансований моментом, що створюється силою тертя між накладкою та диском під час

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гальмування. На рисунку 2.18 показано точки прикладання та напрямки сил. Радіуси колеса та диска взяті з моделі CAD. Радіус колеса вимірюється до  $R_k = 0,42$  м. Для диска радіус вимірюється до  $R_d = 0,34$  м. Однак вважається, що гальмівна сила, що виникає на гальмівному диску, діє посередині висоти гальмівної колодки, що дорівнює радіусу диска мінус половина висоти колодки. Таким чином, при висоті гальмівної колодки радіус сили на диску дорівнює  $R_F = 0,34 - \frac{0,125}{2} = 0,2775 \approx 0,28$  м.

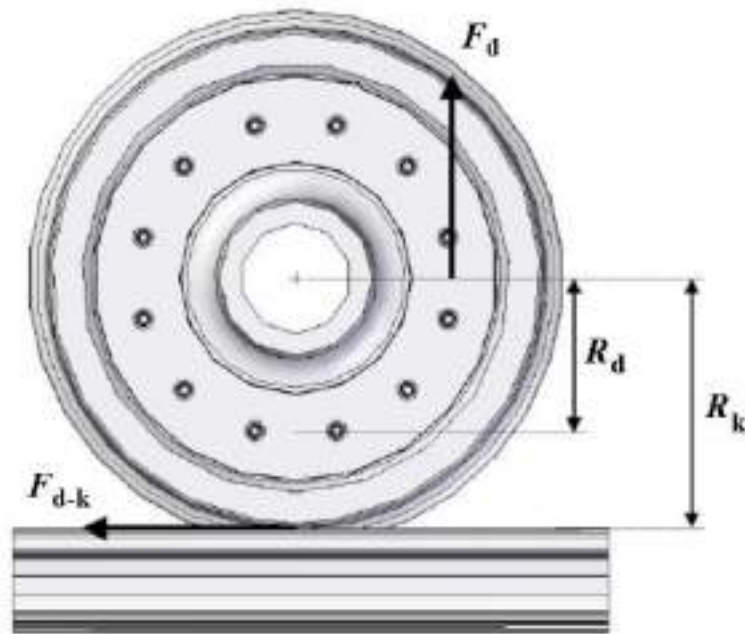


Рисунок 2.18 – Колесо, диск та рейка з діючими силами.

Коли сила тертя між колесом та рейкою має гальмуватися силою, що діє на гальмівний диск, навколо маточини колеса встановлюється момент рівноваги [5].

$$F_{h(k-r)}R_r = F_d R_d \Rightarrow F_d = F_{h(k-r)} \frac{R_r}{R_d}, \quad (2.3)$$

$$F_d = F_{h(k-r)} \frac{R_r}{R_d} = 36297 \frac{0,42}{0,28} = 54936 \text{ Н.} \quad (2.4)$$

					КВРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Бажана гальмівна сила – це нормальна сила, яку важелі повинні передавати через гальмівні колодки перпендикулярно до диска. Вона розраховується для гальмівної колодки відповідно до формули [5]:

$$F_{baz} = \frac{F_d}{2\mu}, \quad (2.5)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя між колодкою та диском. Тут він встановлений на рівні 0,38 [7], але дещо змінюється для різних колодок. Гальмівна сила розраховується як  $F_{baz} = \frac{54936}{2 \cdot 0,38} = 72284$  Н, або 72 кН.

### 2.2.2 Проаналізовані колодки.

В аналізі досліджується контактний тиск для трьох різних типів гальмівних колодок, див. рисунок 2.19: органічна колодка без прорізів, органічна колодка з прорізами та спечена керамічна колодка.



Рисунок 2.19 – Зліва направо: органічне покриття без прорізів, органічне покриття з прорізами та спечене покриття.

Матеріали накладок будуть вважатися ізотропними та лінійно-пружними в аналізах. Подальші характеристики накладок наведено в таблиці 2.1, [7, 12].

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Таблиця 2.1 – Характеристики трьох гальмівних накладок.

Тип накладки та матеріал	Накладки без прорізів (органічний матеріал)	Накладки з прорізами (органічний матеріал)	Шестигранні накладки (спечений матеріал)
Середнє значення коефіцієнта тертя	0,38	0,38	0,37
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	2330	2330	5340
Модуль пружності, МПа	600	600	930
Кількість позицій	0,25	0,25	0,28
Площа контакту, см <sup>2</sup>	418	338	336
Товщина колодки, мм	22	22	19

Для всіх трьох накладок використовується один і той самий тип кріплення та утримувача колодки, щоб можна було зробити обґрунтоване порівняння між контактними властивостями різних накладок. Коли використовується однакове кріплення колодки, сила буде розподілена однаково для різних випадків.

Тримач колодки, кріплення колодки з прорізами та суцільної колодки (без прорізів) показані на рисунку 2.20.

Для тримача футеровки та кронштейна футеровки в аналізах застосовуються такі дані про матеріали, взяті з ANSYS (матеріал: конструкційна сталь): щільність 7850 кг/м<sup>3</sup>, модуль пружності  $2 \times 10^{11}$  Па, коефіцієнт Пуассона 0,3.



Рисунок 2.20 – Тримач накладки, кронштейн накладки та накладка (зліва направо).

### 2.2.3 Обмеження при аналізі.

Аналіз виконується повністю статично. Теплові ефекти не враховуються. Обертання диска не враховуватиметься.

Гальмівна сила від важеля тяги буде прикладена перпендикулярно до контактної поверхні накладки в отворах, де кріпиться важіль тяги. Це показано на рисунку 2.21 нижче. У реальному випадку поверхня прикладання сили буде змінюватися.

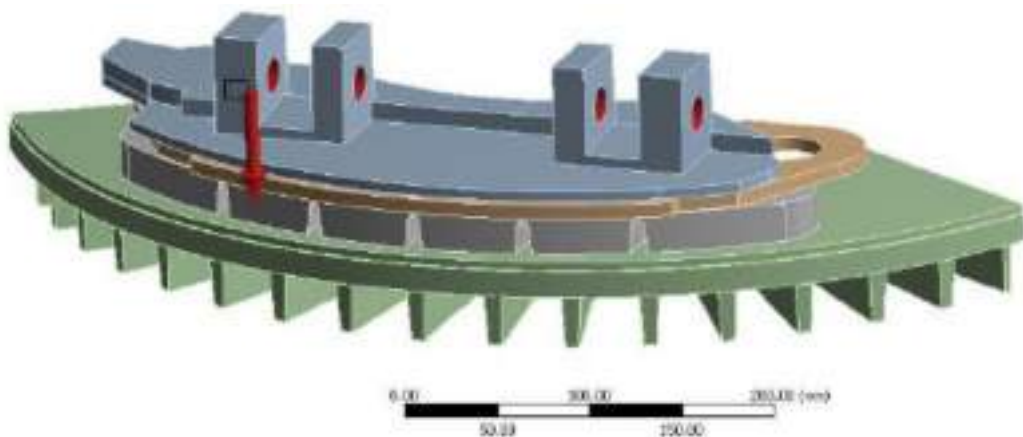


Рисунок 2.21 – Точки контакту гальмівної сили, позначені червоним кольором.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Деформація важелів тяги та інших компонентів у винці під час гальмування не буде врахована в аналізі.

#### 2.2.4 Спрощення при аналізі.

У моделі було зроблено спрощення, щоб мінімізувати кількість надлишкових елементів та час розв'язання в ANSYS, без суттєвої зміни жорсткості моделі, оскільки це вплине на аналіз контактного тиску.

Тримач колодки та кріплення колодки, що використовуються в аналізі, насправді призначені виключно для спечених шестикутних колодок, але в цьому випадку також використовуються для органічних колодок.

Тримачі для колодок дещо спрощені для полегшення аналізу, див. рисунок 2.22.

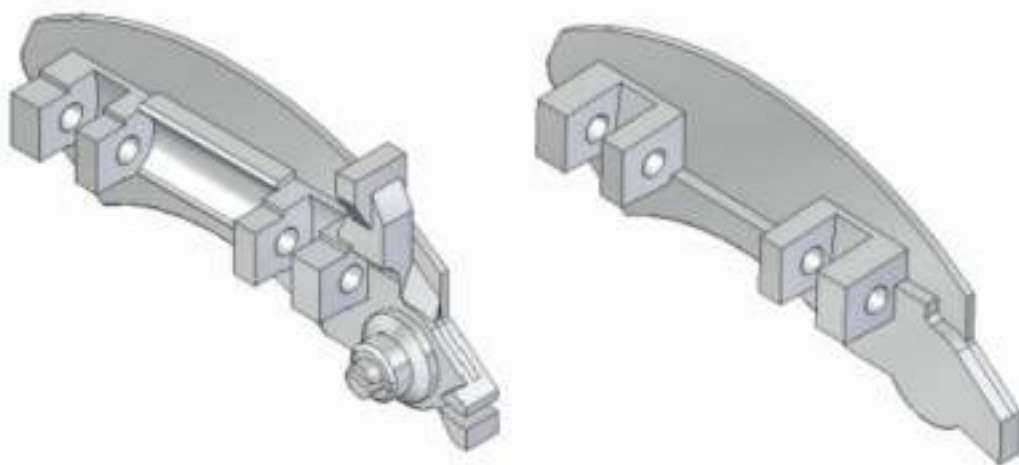


Рисунок 2.22 – Тримач для колодок до (ліворуч) та після (праворуч) спрощення.

Кріплення колодок також було дещо спрощено, краї та дрібні деталі були видалені. На рисунку 2.23 показано, як було модифіковано кріплення колодок.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54



Рисунок 3.23 – Кріплення колодок до (ліворуч) та після (праворуч) спрощення.

Використаний гальмівний диск є колісного типу. Два гальмівні диски кріпляться до кожного боку колеса, з одного боку гвинтом, а з протилежного боку закріплюються гайкою. Контактна поверхня диска з колесом складається з кількох круглих поверхонь. Диск також має ребра охолодження, які також контактують з колесом. Матеріальні дані для диска вибрано наступним чином [7, 11, 12]:

Щільність:  $7150 \text{ кг/м}^3$ ;

Модуль пружності:  $2 \times 10^{11} \text{ Па}$ ;

Коефіцієнт Пуассона: 0,3.

У аналізах використовується невелика ділянка гальмівного диска, оскільки лише мінімальна частина геометрії диска навколо колодки впливає на контактний тиск. Диск був спрощений, а проставки та отвори для гвинтів були видалені. На рисунку 2.24 нижче показано зовнішній вигляд диска до та після спрощення.

Колодка розміщується на гальмівному диску відносно центральної точки диска. На рисунку 2.25 нижче показано, як центр маси колодки розташований на відстані 253 мм від центру диска.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55



Рисунок 2.24 – Переріз гальмівного диска, що використовується в аналізах, до (ліворуч) та після (праворуч) спрощення.

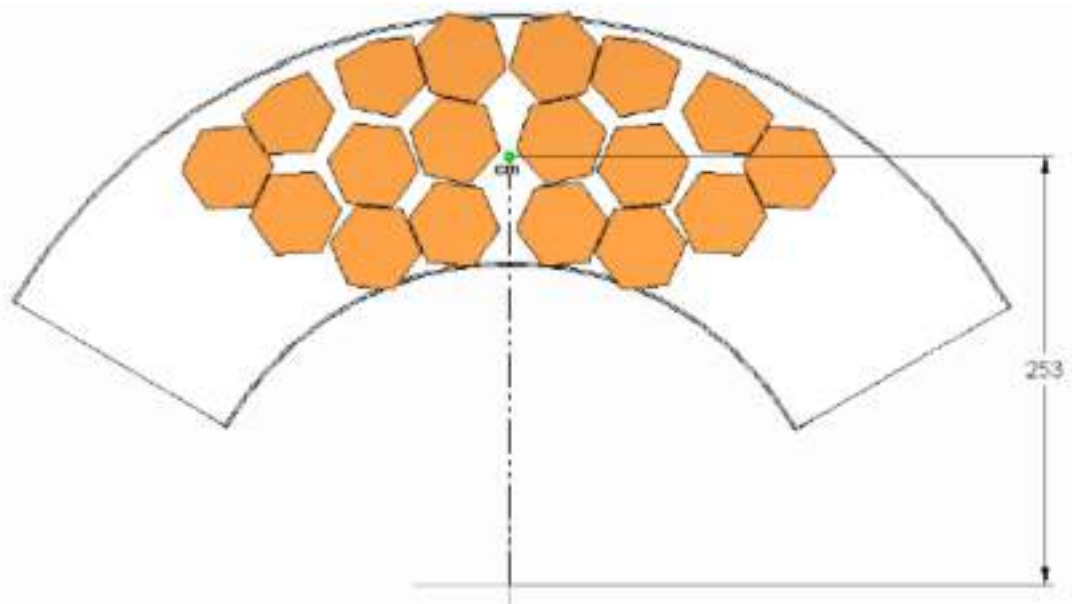


Рисунок 2.25 – Положення колодки на гальмівному диску.

### 2.2.5 Перерахунок гальмівної сили.

Розрахована гальмівна сила застосовується до прорізаної органічної колодки. Для інших колодок сила розраховується таким чином, щоб співвідношення між силою та площею було однаковим для всіх колодок. Це зроблено для того, щоб було легше порівняти розподіл контактної сили в різних колодках.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

$$\frac{F_{proriz}}{A_{proriz}} = \frac{F_{suc}}{A_{suc}} = \frac{F_{spech}}{A_{spech}} = x = 213,9 . \quad (2.6)$$

Таким чином, сила для різних колодок стає:

$$F_{proriz} = 72 \text{ кН};$$

$$F_{suc} = A_{suc}x = 418 \cdot 213,9 \approx 89 \text{ кН};$$

$$F_{spech} = A_{spech}x = 336 \cdot 213,9 \approx 72 \text{ кН}.$$

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 3 РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНТАКТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ГАЛЬМІВНИМ ДИСКОМ ТА ГАЛЬМІВНОЮ КОЛОДКОЮ

### 3.1 Налаштування в ANSYS.

Після введення моделей в ANSYS встановлюється ряд граничних та контактних умов, які описані нижче.

Граничні умови:

Гальмівний диск без прокладок. Диск фіксується командою «фіксована опора» на контактній поверхні ребер охолодження з колесом. Потім використовується «опора без тертя» на двох розрізаних поверхнях диска.

Гальмівний диск з прокладками. Фіксується так само, як і вище. Однак, «фіксована опора» також встановлюється на прокладкових поверхнях, які контактують з колесом, та на поверхнях, які контактують із блокуванням гальмівного диска.

Контактні умови:

В ANSYS між різними контактними поверхнями встановлюються умови «З'єднання». У кожній контактній області одна контактна поверхня встановлюється на «Ціль», а інша - на «Контакт».

Між диском та накладкою:

Диск: Ціль

Накладка: Контакт

Умови: Тертя (коефіцієнт тертя встановлюється між поверхнями)

Між накладкою та кріпленням накладки

Накладка: Ціль

Кріплення накладки: Контакт

Умови: З'єднані (поверхні міцно зчеплені одна з одною)

Між кріпленням накладки та тримачем накладки

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кріплення накладки: Ціль

Тримач накладки: Контакт

Умови: З'єднані (поверхні міцно зчеплені одна з одною)

### 3.2 Сітка та збіжність.

Для дискретизації (сітки) та типу елемента використовується автоматична сітка ANSYS. На контактній поверхні, між накладкою та диском, де відбувається основний аналіз контактної тиску, сітка додатково уточнюється. Під час дискретизації на «контактній поверхні» використовується дрібніша сітка, ніж на «цільовій поверхні». Це робиться для отримання точнішого результату [15, 16].

Точність відповідей залежить від того, наскільки дрібна сітка. Дрібніші сітки дають надійніші відповіді, але програма витрачає більше часу на розв'язання аналізів. Якщо було зроблено занадто багато поділів, програма не зможе виконати аналіз. Мета полягає в тому, щоб отримати задовільний результат з якомога меншою кількістю елементів. Сітка уточнюється крок за кроком під час аналізу, доки результат не збіжиться, тобто більше не буде суттєвої різниці між аналізами з різними розмірами сітки.

### 3.3 Результати аналізу контактних зв'язків між гальмівним диском та гальмівною колодкою.

Нижче наведено аналіз контактної тиску для трьох колодок: спочатку для прорізної, потім для без прорізу та, нарешті, для спеченої колодки. Це робиться з гальмівним диском без накладок та отворів для гвинтів. Колодки оснащені кріпленням для колодок та спрощеним тримачем колодок.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

### 3.3.1 Аналіз колодки з прорізами.

1: Розподіл контактної тиску для щілинної накладки.

Розмір сітки поверхні гальмівної накладки спочатку був встановлений на рівні 2 мм і змінювався для поверхні гальмівного диска. Іншим деталям і поверхням було призначено стандартну сітку. Це показано на рисунках 3.1 і 3.2.

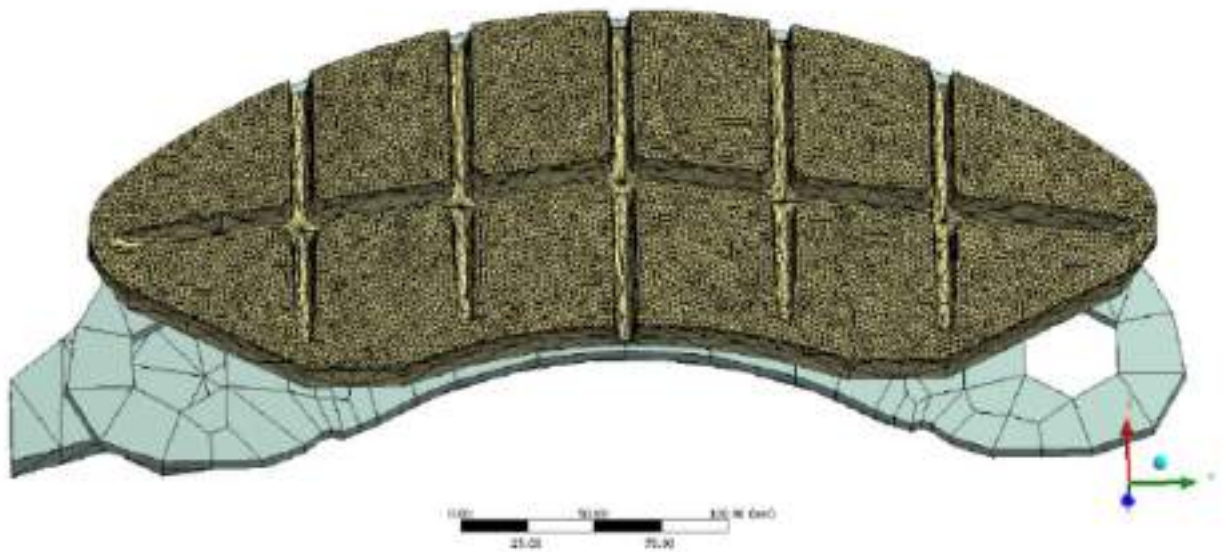


Рисунок 3.1 – Гальмівна накладка з розміром сітки 2 мм.

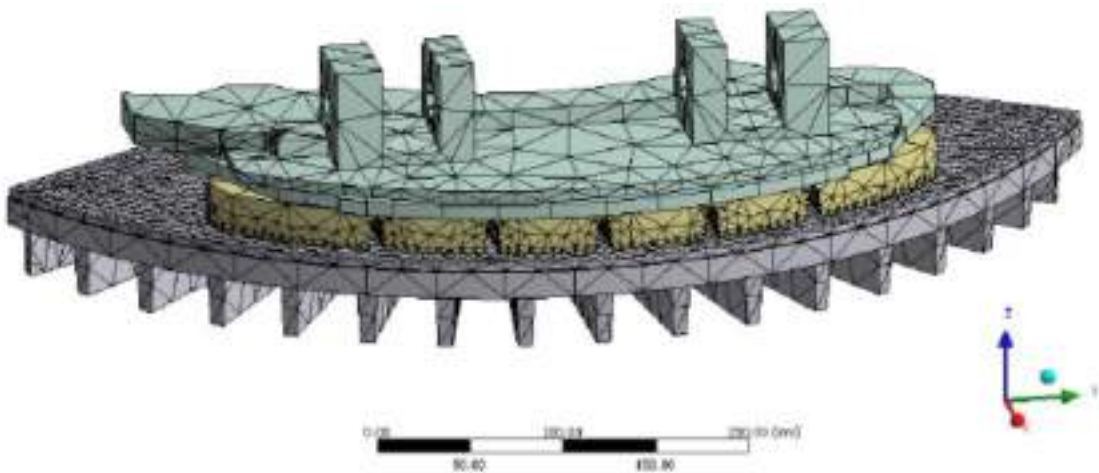


Рисунок 3.2 – Стандартна сітка для деталей і поверхонь, що не беруть участі в контактї.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

У першому аналізі на поверхні гальмівного диска використовувалася стандартна сітка. Для цього поділу були отримані наступні результати, див. рисунок 3.3.

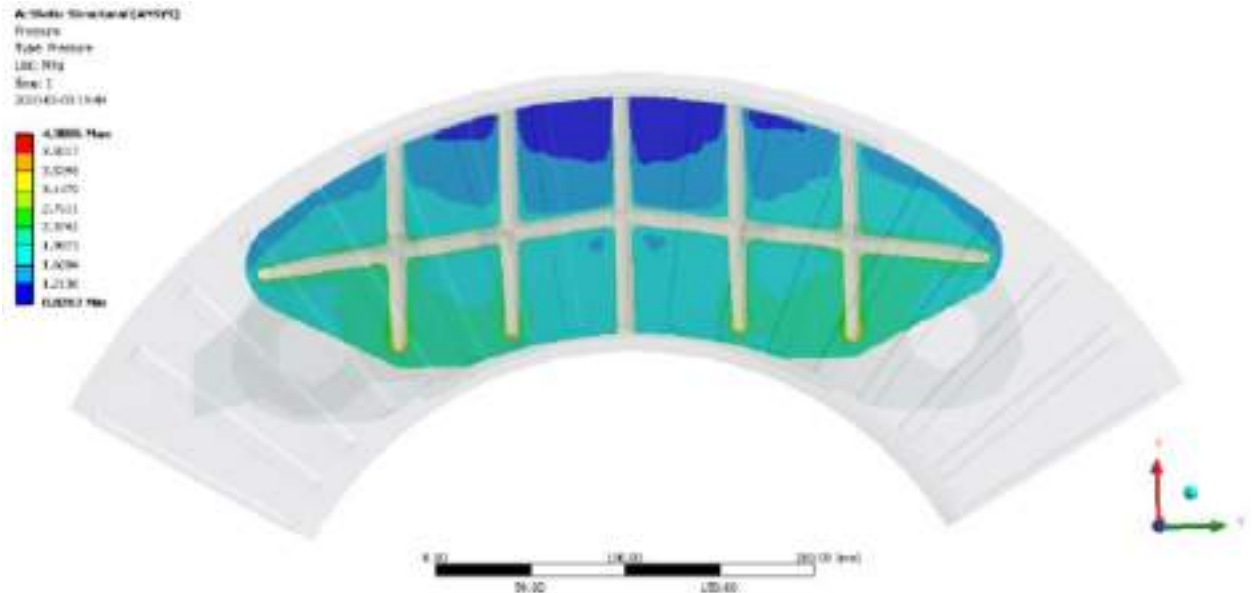


Рисунок 3.3 – Результати для стандартного диска з сіткою та накладки з сіткою 2 мм.

У наступному аналізі сітку в гальмівному диску було змінено на 7 мм, результати показано на рисунку 3.4.

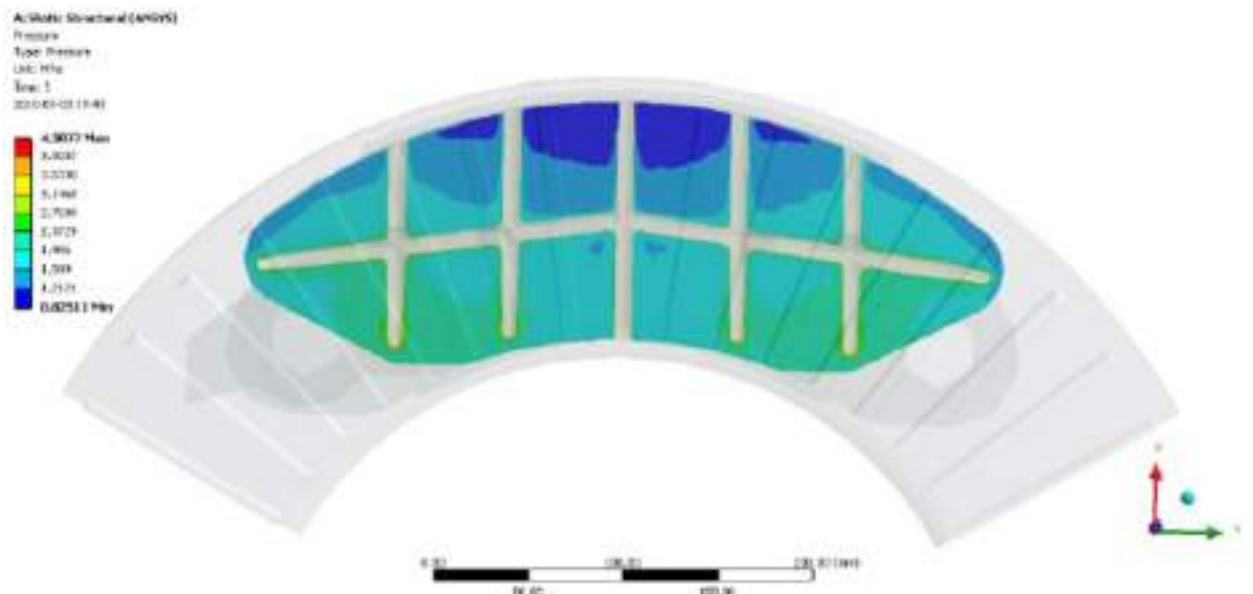


Рисунок 3.4 – Результати для диска з сіткою 7 мм та накладки з сіткою 2 мм.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Два попередні аналізи дали схожі результати, але для більшої безпеки було створено третю сітку. Сітку для гальмівного диска тепер було встановлено на 3 мм, див. результати на рисунку 3.5.

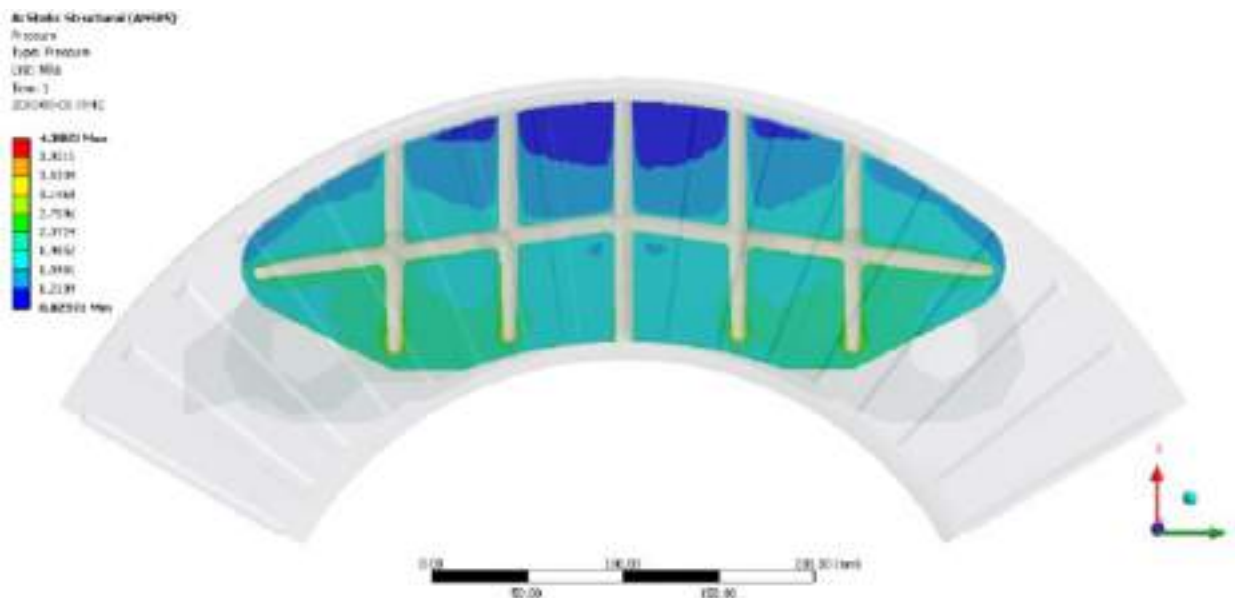


Рисунок 3.5 – Результати для диска з розміром сітки 3 мм та накладки з розміром сітки 2 мм.

Ця сітка також дала незначну різницю в результатах, і ми вирішили використовувати стандартну сітку на гальмівному диску.

Крім того, було досліджено, як зміна розміру сітки гальмівної накладки вплинула на результати. Сітку накладки було змінено з 2 мм до 1,5 мм, і було отримано наступне (див. рисунок 3.6).

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

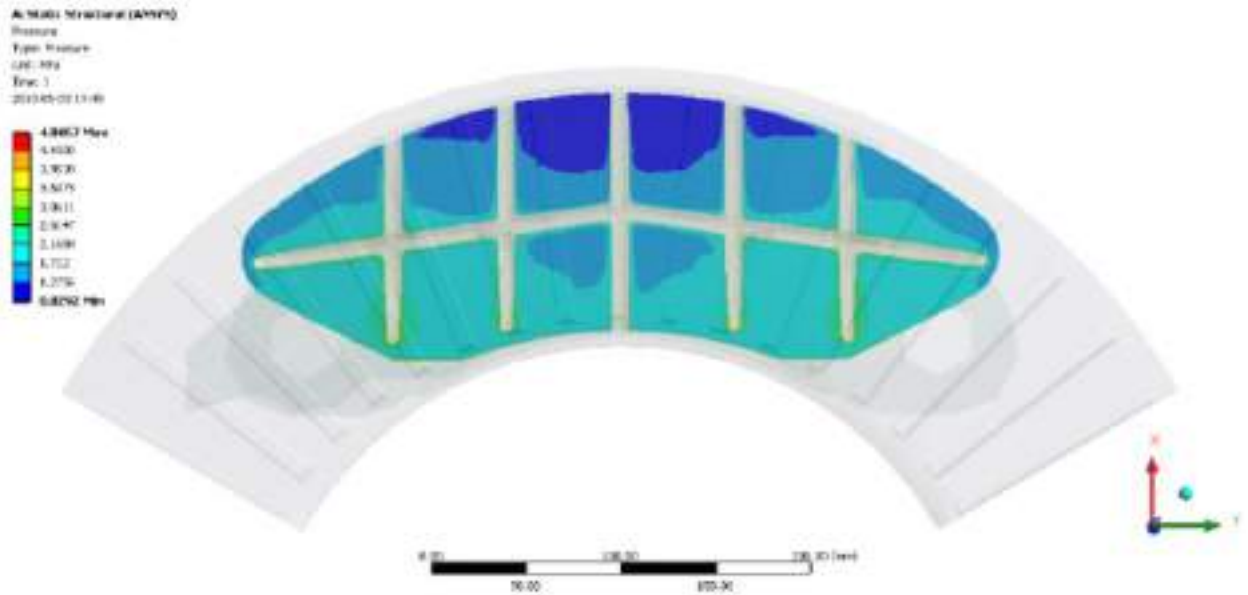


Рисунок 3.6 – Результати для стандартного диска з розміром сітки та накладки з розміром сітки 1,5 мм.

Результат відрізняється від попередніх, і перевіряється інша сітка. На рисунку 3.7 показано результат для сітки, яка тепер встановлена на 1,1 мм.

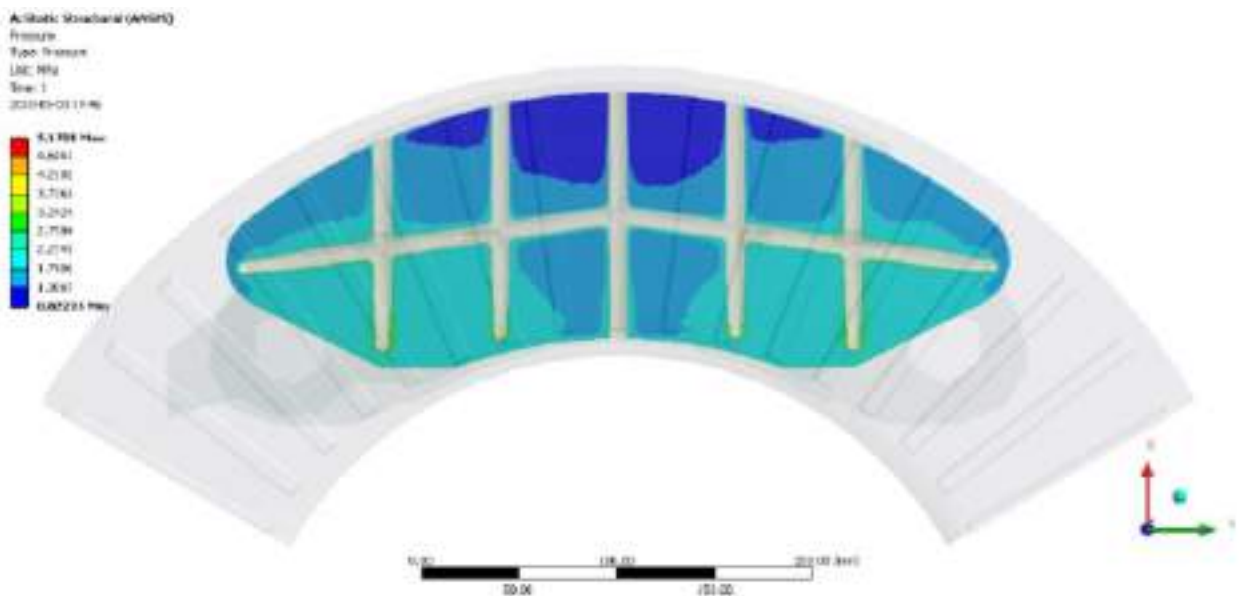


Рисунок 3.7 – Результати для стандартного диска з сіткою та накладки з розміром сітки 1,1 мм.

Результат було додатково збільшено замість того, щоб наблизитися до 4,3 МПа, як було отримано раніше. Було зроблено дрібнішу сітку (1 мм), але ANSYS відмовився від цього. Тому прийняттого результату для контактного тиску в цій накладці не було отримано.

### 3.3.2 Розподіл контактного тиску для суцільних накладок.

Під час аналізу накладки без щілин розмір сітки для гальмівного диска та гальмівної накладки також змінювався. Спочатку на диску було обрано сітку 4 мм, а на накладці – 3 мм, див. рисунок 3.8 та рисунок 3.9.

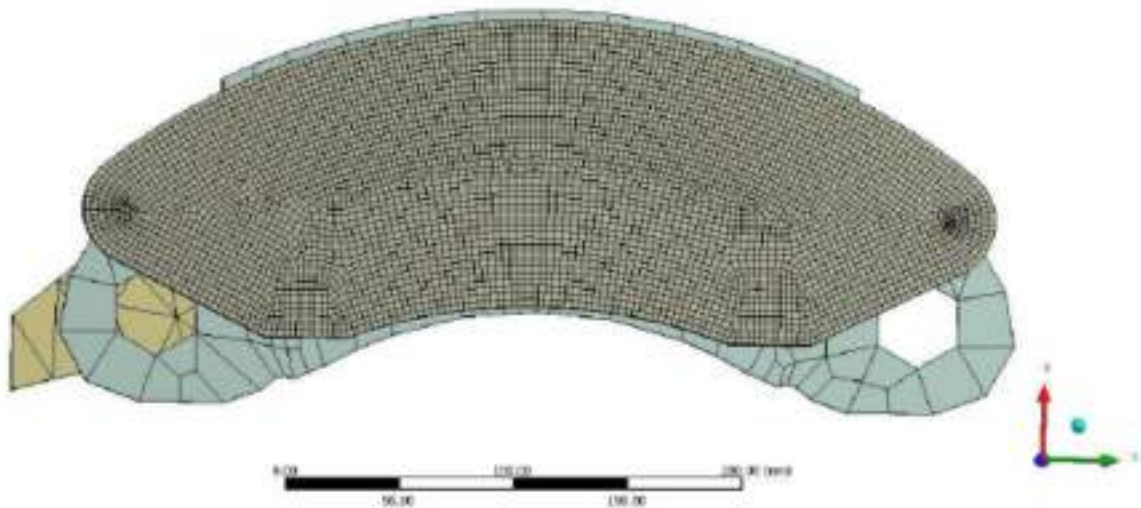


Рисунок 3.8 – Гальмівна накладка з розміром сітки 3 мм.

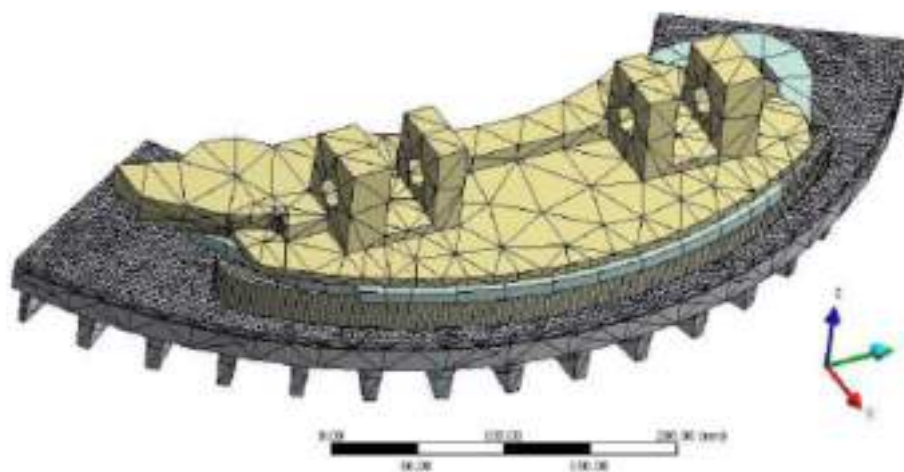


Рисунок 3.9 – Диск з розміром вічка 4 мм, гальмівна накладка з розміром вічка 3 мм.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

З вибраними розмірами вічка були отримані наступні результати, див. рисунок 3.10.

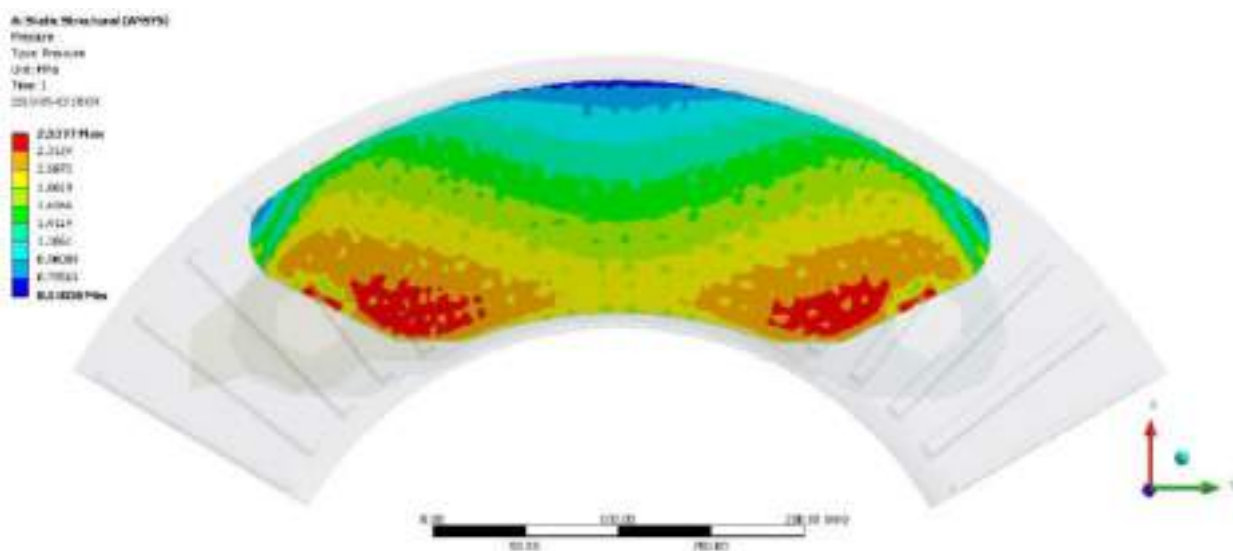


Рисунок 3.10 – Результати з накладкою з розміром вічка 3 мм та диском з розміром вічка 4 мм.

Потім сітку було уточнено як на диску, так і на колодці до 3 мм та 2 мм відповідно. Це призвело до рисунка 3.11.

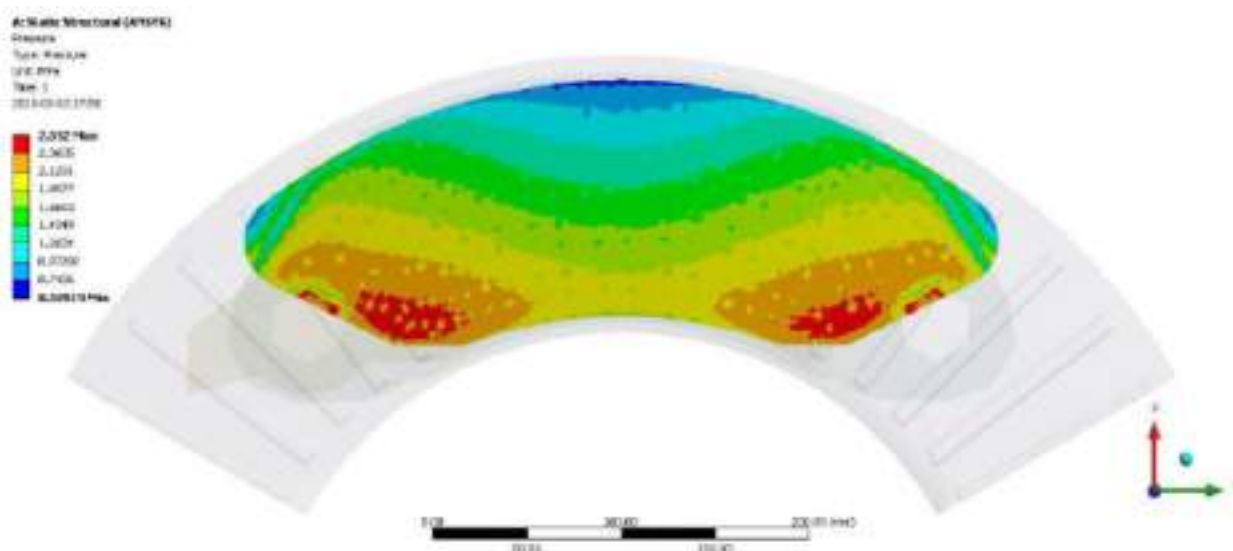


Рисунок 3.11 – Результати для колодки з розміром сітки 2 мм та диска з розміром сітки 3 мм.

Різниця між двома результатами була несуттєвою, проте сітку було додатково уточнено (диск 2 мм та колодка 1,5 мм), і були отримані наступні результати (див. рисунок 3.12).

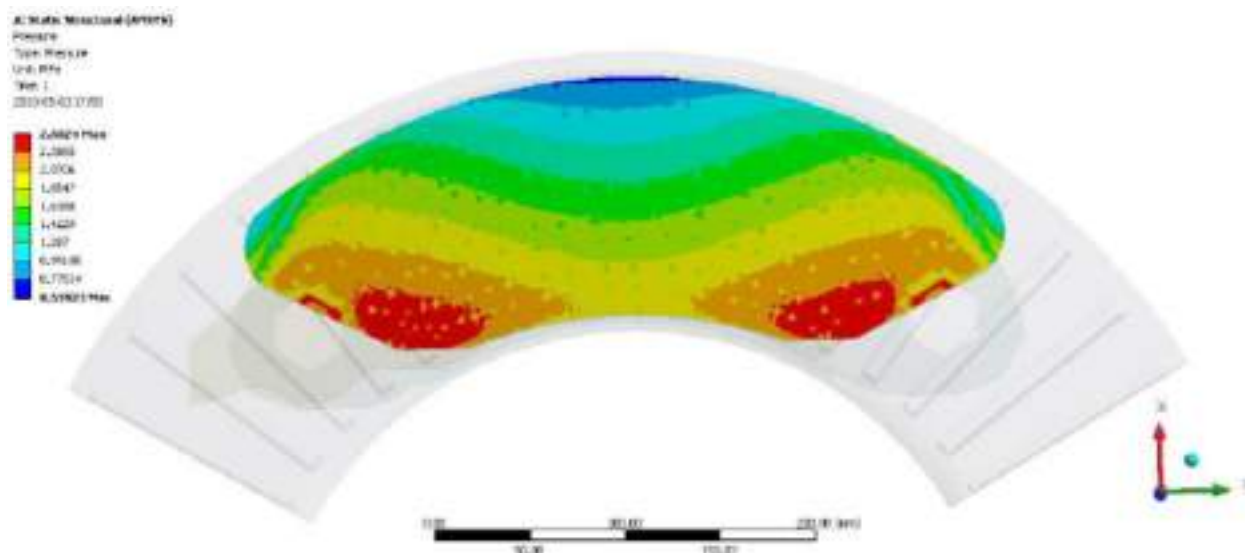


Рисунок 3.12 – Результати для колодки з розміром сітки 1,5 мм та диска з розміром сітки 2 мм.

Різниця в контактному тиску між різними сітками незначна, і тому результат є надійним.

### 3.3.3 Розподіл контактної тиску для спеченої накладки з диском без накладок.

Як і в попередньому аналізі, сітка для накладки та диска змінювалася поетапно.

Спочатку для диска використовувалася сітка з розміром сітки 4 мм, а для накладки – 3 мм. Як це виглядає, показано на рисунках 3.13 та 3.14.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

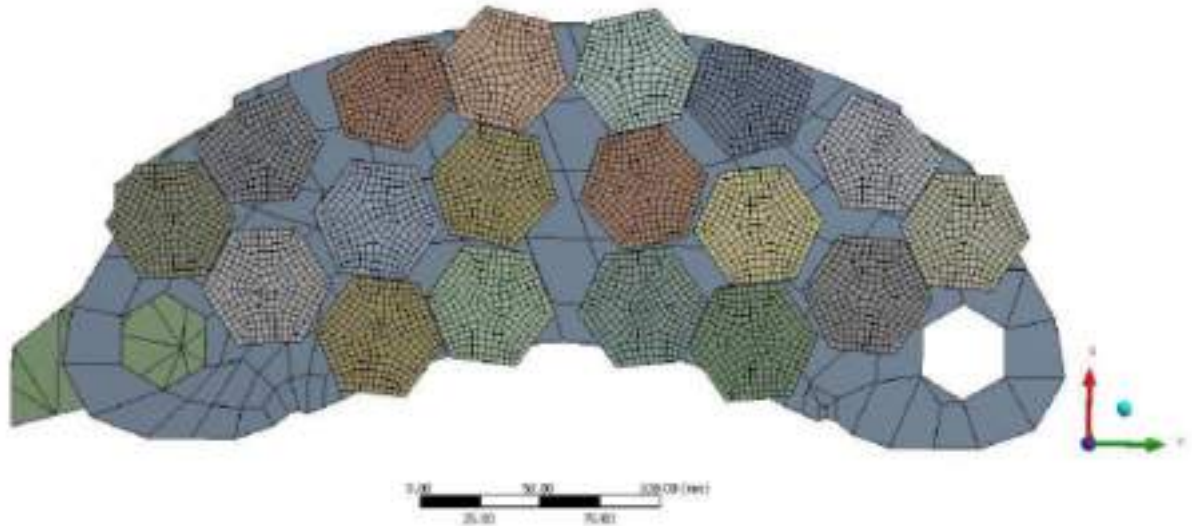


Рисунок 3.13 – Гальмівна накладка з розміром сітки 3 мм.

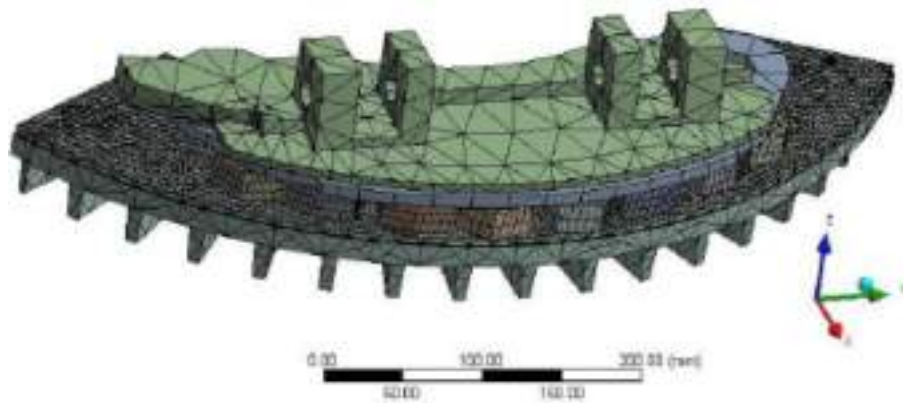


Рисунок 3.14 – Диск з розміром сітки 4 мм, гальмівна накладка з розміром сітки 3 мм.

Для цієї сітки було отримано такі результати зображені на рисунку 3.15).

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

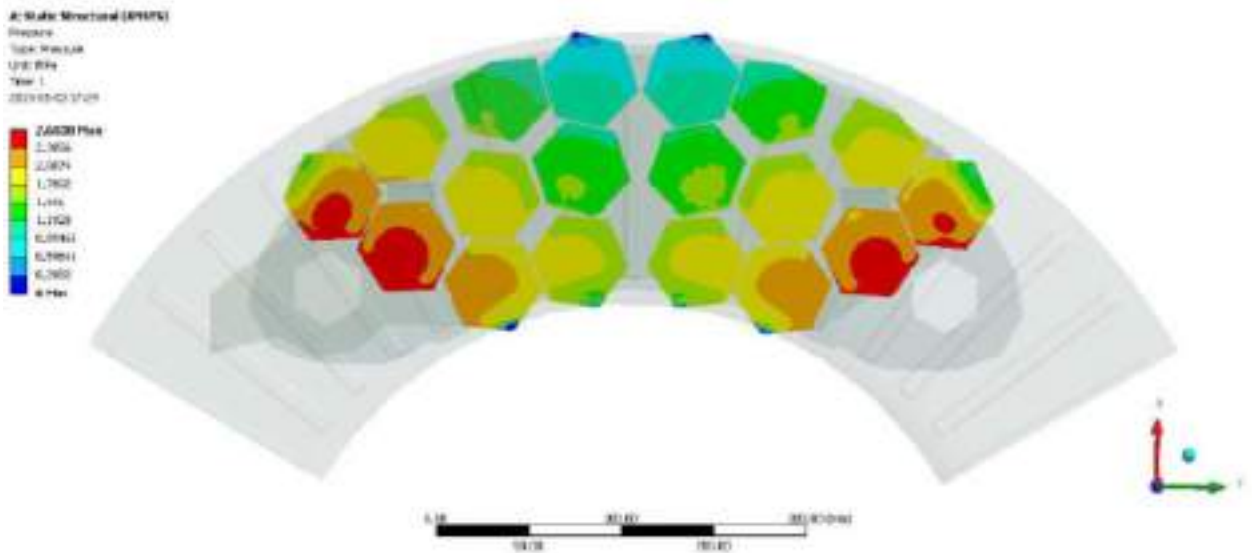


Рисунок 3.15 – Результати для покриття з сіткою 3 мм та пластини з сіткою 4 мм.

Оскільки в першому аналізі було виявлено, що розмір сітки пластини суттєво не впливає на результати, було вирішено збільшити сітку для пластини в наступних аналізах, одночасно зменшуючи її для покриття. Таким чином, кількість елементів та вузлів була збережена на прийнятному для програми рівні.

На наступному кроці розмір елемента для пластини становив 5 мм та 2 мм для покриття. На рис. 3.16 нижче показано результати для цих значень.

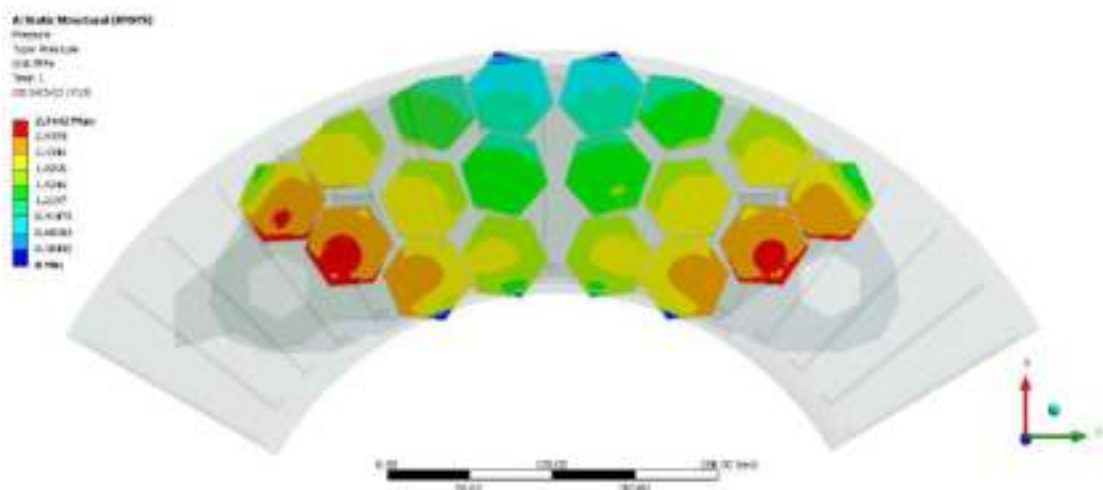


Рисунок 3.16 – Результати для покриття з сіткою 2 мм та пластини з сіткою 5 мм.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Як і в попередньому аналізі, результати для різних сіток відносно близькі один до одного. Для більшої надійності було створено іншу сітку, тепер з розміром елементів 6 мм на пластині та 1,5 мм для покриття, див. рисунок 3.17.

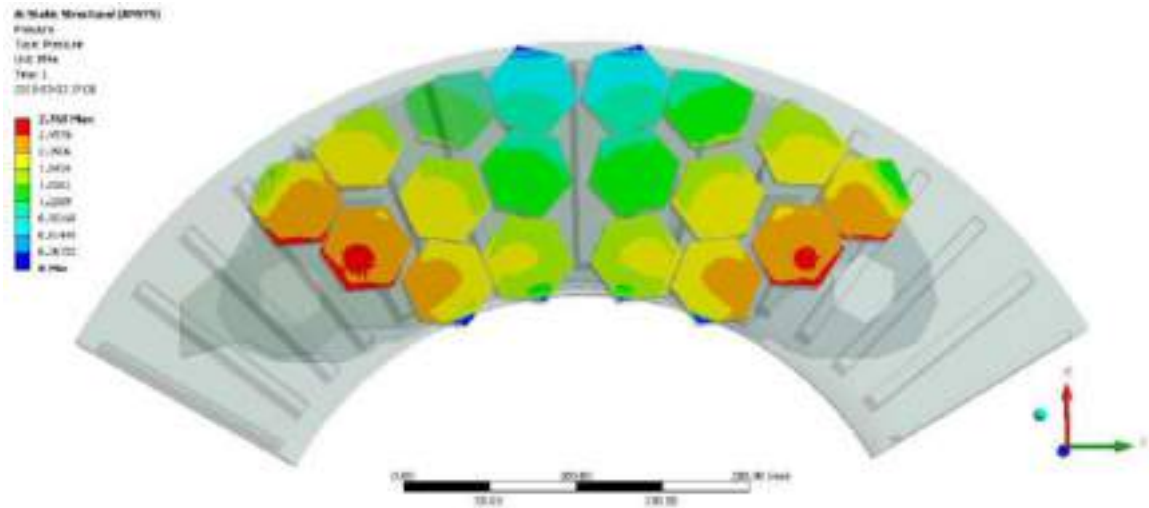


Рисунок 3.17 – Результати для покриття з сіткою 1,5 мм та пластини з сіткою 6 мм.

Оскільки рішення близьке до попередніх, результат вважається надійним.

### 3.4 Порівняльна оцінка результатів аналізу.

У початковій моделі яка використовується як основа, було пропущено кілька вимірювань, і також можливо, що це має лише концептуальний характер. Слід усвідомлювати, що під час розробки нової моделі було зроблено багато спрощень та припущень. Під час оцінки та аналізу результатів важливо не виходити за межі, які були встановлені, для отримання більш конкретних результатів знадобиться більш комплексний аналіз та точніше моделювання.

Модель CAD може бути використана для демонстрації рухливості та функції затискання гальма. Однак вона показує лише те, як працює це

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конкретне гальмо. Механіка та конструкція всередині гальма, звичайно, відрізняються від виробника до виробника та зазвичай є конфіденційними. Базова модель була порожньою всередині, коли її було отримано, тому конструкція та функція цих частин моделюються з великою невизначеністю. Під час моделювання було пропущено кілька частин, однією з яких є стоянкове гальмо. Це не моделювалося, оскільки це не було потрібно для завдання, яке значною мірою було спрямоване на аналіз контакту між накладкою та диском під час гальмування з зупинкою.

Якщо аналіз міцності гальмівного супорта проводиться за допомогою розробленої моделі, зроблені спрощення необхідно переглянути та оцінити, щоб дослідити, чи впливають вони на міцнісні властивості гальмівного супорта.

Під час розрахунку гальмівної сили вагони поїзда розглядалися як окремі системи. Насправді вагони впливатимуть один на одного під час гальмування. Якщо всі вагони не гальмуються одночасно, у зчепленні між вагонами можуть виникати автоколювання. Тому це також матиме значний вплив, якщо, наприклад, у вагоні взагалі не буде гальм.

Також припускалося, що навантаження на кожен вісь однакове. Це, звичайно, також приблизне спрощення, яке забезпечує прості розрахунки. У розрахунках також вважалося, що платформа порожня. Різниця у вазі для завантаженого та невантаженого транспортера насправді велика. Зона нерівномірного навантаження платформи, наприклад легше навантаженої осі візка, може призвести до блокування коліс, і вони можуть зійти з колії.

Розрахована гальмівна сила повністю заблокує колеса, що насправді небажано. Натомість слід застосовувати дещо меншу силу, це часто регулюється механізмом у гальмі. Якщо колесо повністю заблокується і почне ковзати по колії, воно зноситься, і можуть виникнути пластини на колесі. Однак під час роботи було зроблено кілька спрощень та наближень, і неясно, які з них погіршують чи покращують результати, тому цей

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

граничний випадок використовується для сили в аналізах методом скінченних елементів. Тому наближення гальмівної сили є приблизним, і це також впливає на аналізи, виконані в ANSYS, де це використовується.

У розрахунках в ANSYS обертання диска не враховувалося. Один із способів наближення цього - застосувати тангенціальну силу, яка є постійною по всій поверхні накладки. Однак у реальному випадку ця сила змінюватиметься залежно від контактного тиску. Там, де контактний тиск високий, тангенціальна сила також буде високою.

Результати аналізу для прорізаної площадки не зійшлися. Це може бути пов'язано зі складною геометрією. Можливим методом подолання цього було б спрощення площадки шляхом видалення заокруглень на прорізах. Також можна було б дослідити, чим відрізняються рішення для інших ділянок площадки. Це означає знехтувати високим контактним тиском на краях прорізу та дослідити розподіл лише по більшій площі.

Контактний тиск найбільший на зовнішніх краях колодок незалежно від моделі. Однак для спеченої колодки він більш концентрований в одній точці, що, ймовірно, пов'язано з геометрією колодки. Розподіл контактного тиску можна виправити, розмістивши додатковий кронштейн для важеля на тримачі колодки між двома існуючими кронштейнами. Це робиться для більш рівномірного розподілу сили по всій контактній поверхні. Однак слід також враховувати, що в моделі було зроблено кілька спрощень. Особливо спрощення, зроблені на тримачі колодки. Вони могли вплинути на жорсткість тримача більше, ніж очікувалося, що могло призвести до нерівномірного розподілу контактного тиску.

Найбільший контактний тиск трохи зміщений вниз від точок прикладання сили. Це, ймовірно, тому, що жорсткість тримача колодки там вища.

Проведені аналізи підтвердили, чи є модель надійною та правильною.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

## ВИСНОВКИ

1. У роботі застосовано цілісний підхід до побудови моделі гальмівного механізму транспортера, що дозволило охопити ключові елементи конструкції та провести повноцінний попередній аналіз її роботи.

2. Виконане моделювання дозволило виявити зони підвищених напружень і нерівномірність розподілу навантаження, що є важливим кроком до оптимізації конструкції та її подальшого удосконалення.

3. Розглянуто реальні фактори, що впливають на роботу гальмівного механізму, такі як контактний тиск, жорсткість опорних елементів та силові навантаження, що робить дослідження практично цінним.

4. Окремо підкреслено можливі напрямки оптимізації, такі як удосконалення геометрії деталей, переробка слабких ділянок конструкції та деталізація контактних поверхонь.

5. Проведено послідовний аналіз отриманих даних, що демонструє здатність критично оцінювати адекватність моделі гальм транспортера та узгодженість результатів з реальними умовами.

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Yuan Z., Luo R., Du X. A review on the application of friction models in wheel–rail systems // *Wear*. – 2021. – Vol. 480–481. – Article 203931. – DOI: 10.1016/j.wear.2021.203931.
2. Li W., Jiang X., Zhang J. An Improved Autonomous Emergency Braking (AEB) Algorithm for Intelligent Vehicles // *Sensors*. - 2025. - Vol. 25, No. 1. – Access mode: [<https://www.mdpi.com/>](<https://www.mdpi.com/>) (access date: 12.05.2026).
3. Megna G., Migliaccio M., Palomba M. Tread-Braked Wheels: Review and Recent Findings // *Applied Sciences*. - 2025. - Vol. 15, No. 2. - DOI: 10.3390/app15020876.
4. Raghunathan V. Advances in brake friction materials: A comprehensive review // *Materials Today: Proceedings*. - 2024. - Vol. 73. – doi:10.1016/j.matpr.2023.07.001.
5. Закалов, О.В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О.В. Закалов, І.О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 322 с.
6. Natarajan R., Loganathan K., Praveen S. Evaluation of tribological properties of newly developed friction material // *SAE Technical Paper*. – 2020. – DOI: 10.4271/2020-01-1592.
7. Навчально-методичний посібник з курсу «Матеріалознавство і обробка матеріалів» для студентів напрямку 6.050202 Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології / Крамар Г.М., Бодрова Л.Г., – Тернопіль, ТНТУ, 2016.- 84 с.
8. Varecha D., Kohár R., Brumercík F. Brake System Simulation of Automated Guided Vehicles (AGV) // *Applied Mechanics and Materials*. - 2019. - Vol. 890. – P. 123–130.

					КВРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

9. Suresh A., Karthik B. Recent developments and challenges in automotive brake-pad–disc systems: A review // Materials Research Express. - 2021. - Vol. 8, No. 5. – DOI:10.1088/2053-1591/abf4c8.

10. Voloacă Ş. Motor Vehicle Brake Pad Wear — A Review // Lubricants. - 2025. - Vol. 13, No. 1. – DOI:10.3390/lubricants13010004.

11. Zagursky A. Main types of designs and materials of brake pads: review // Automobile Industry of Ukraine. – 2024. – No. 3. – P. 45–52.

12. Borawski A. Conventional and unconventional materials used in production of brake pads // Materials. - 2020. - Vol. 13, No. 12. – DOI:10.3390/ma13122888.

13. Momjournal Editorial Board. Friction mechanisms of composite-material brake pads on the wheel surface // Modern Mechanical Engineering Journal. – 2023. – Vol. 12, No. 4. – P. 56–63.

14. Jankauskas V., Rimkus A., Bureika G. Investigation of tribological characteristics of disc–pad braking pairs // Transport Problems. – 2021. – Vol. 16, No. 3. – P. 45–58.

15. Verma P. C., Gautam R., Sharma S. Wear debris characteristics from automotive brake pad–disc system: A review // Environmental Science and Pollution Research. - 2025. - Vol. 32. - DOI:10.1007/s11356-025-31190.

16. Ionescu M., Pop D. Development and tribological features of semi-metallic brake pads // Tribology in Industry. – 2023. – Vol. 45, No. 1. – P. 29–40.

					КВРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

ДОДАТКИ

					КвРАТ. 23065.02.04.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75