

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

ВИТВИЦЬКИЙ ВАСИЛЬ СТЕПАНОВИЧ

УДК 629.113-59.001.4

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕНТИЛЬОВАНИХ ДИСКОВО-
КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМ АВТОМОБІЛІВ З УРАХУВАННЯМ
ЕНЕРГОНАВАНТАЖЕНОСТІ ЇХНІХ ДИСКІВ**

Спеціальність 05.22.02 – Автомобілі та трактори

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів, 2019

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Вольченко Олександр Іванович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
професор кафедри технічної механіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Сараєв Олексій Вікторович,
Харківський національний автомобільно-
дорожний університет,
декан автомобільного факультету

кандидат технічних наук, доцент
Осташук Микола Михайлович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
доцент кафедри транспортних технологій

Захист відбудеться «29» березня 2019 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.052.20 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1, корпус XIV, ауд. 61.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «__» лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.В. Ковалишин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Фрикційні вузли дисково-колодкових гальм транспортних засобів працюють у важких умовах, які характеризуються високими швидкостями ковзання, значними імпульсними питомими навантаженнями, великими імпульсними гальмовими моментами. При терті генеруються електричні струми, внаслідок чого розвиваються високі поверхневі температури, що сприяють виникненню в поверхневих і підповерхневих шарах поверхонь тертя великих градієнтів температури і термічних напружень. Все це негативно впливає на зносо-фрикційні властивості пар тертя, на поясах тертя гальмових дисків зароджуються і розвиваються мікротріщини. Одним із шляхів запобігання зазначених вище факторів є правильний вибір матеріалів пар тертя з урахуванням умови механічної, електротеплової і хімічної сумісності їхніх компонентів.

Дослідженню динамічних і теплових процесів у парах тертя різних видів гальмових пристроїв присвячено праці М. П. Александрова, Ю. Б. Беленького, В. О. Богомолова, М. О. Бухаріна, О. І. Вольченка, А. Б. Гредескула, Г. С. Гудза, В. А. Дем'янюка, А. Х. Джанахмедова, І. В. Крагельського, А. Д. Крюкова, І. Ф. Метлюка, А. М. Туренка, Я. Є. Фаробіна, В. М. Федосова, А. В. Чичинадзе, Є. А. Чудакова, F. Charron, H. Dorner, R. Krauser, T. Newcomb, A. Sisson, G. Fazekas, Y. Weib та інших учених.

Гальмові диски через слабе вимушене охолодження є акумулятором значної теплової енергії. Генерована і акумульована при гальмуванні теплота призводить до термонапруженого стану гальмового диска, вивчення якого й досі залишається поза увагою дослідників. З поверхневих шарів накладки відбувається вигорання сполучних компонентів, унаслідок чого зростає інтенсивність її зносу. Актуальним напрямком забезпечення ефективної і безпечної роботи пар тертя дисково-колодкового гальма транспортних засобів є визначення раціональних конструктивних параметрів різних типів гальмових дисків. У той же час при проектуванні фрикційних вузлів дисково-колодкових гальм відсутнє комплексне поєднання динамічного і теплового розрахунків для визначення раціональних конструктивних параметрів його елементів, що дозволило б спроектувати фрикційний вузол гальма з урахуванням умови забезпечення необхідного гальмового моменту й ефективної енергоемності.

Тому проблеми підвищення ефективності фрикційних вузлів дисково-колодкового гальма і пошуку їхніх раціональних конструктивних й експлуатаційних параметрів є особливо актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у рамках гранту за держбюджетною темою Д-4-15Ф з назвою проекту «Розробка наукових основ створення з'єднань з металополімерних композитних матеріалів та керування їх зносо-фрикційними властивостями» (номер державної реєстрації №0115УФ02279). Дисертаційна робота відповідає концепції розвитку металополімерних матеріалів для пар тертя дисково-колодкових гальм транспортних засобів.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи – зниження енергонавантажності різних типів дисків з фланцями в складі дисково-колодкових гальм тра-

нспортних засобів з урахуванням інтенсивності вимушеного повітряного охолодження і напружено-деформованого стану дисків для запобігання утворення осередків мікротріщин на їхніх поясах тертя.

Для досягнення мети сформульовано та розв'язано такі задачі:

- запропонувати методи оцінки теплового балансу та ефективності охолодження вентильованих дисків з отворами і канавками на їхніх поясах тертя і ресурсу фрикційних накладок, виходячи з регламентованої енергонавантаженості пар тертя дисково-колодкового гальма транспортного засобу;

- методом моделювання процесів, що відбуваються на бічних поверхнях і в тілі різних типів дисків з фланцями, оцінити їх енергонавантаженисть та напружено-деформований стан;

- провести стендові та експлуатаційні випробування вентильованих гальмових дисків з елементами охолодження і встановити закономірності зміни експлуатаційних параметрів пар тертя гальма;

- запропонувати принципи проектування пар тертя дисково-колодкових гальм на основі їх термонавантаженисті з прогнозованими раціональними конструктивними та експлуатаційними параметрами;

- розробити систему термоелектричного охолодження на напівпровідникових елементах пар тертя гальма.

Об'єкт дослідження – енергонавантаженисть пар тертя дисково-колодкових гальм, обладнаних вентильованими гальмовими дисками з елементами охолодження.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструктивних та експлуатаційних параметрів дисково-колодкових гальм транспортних засобів на енергонавантаженисть і енергоємність різних типів вентильованих дисків.

Методи дослідження. При виконанні досліджень використовували такі методи: теорії теплопровідності, теплообмінних і теплопередавальних процесів для оцінки теплового балансу вентильованих гальмових дисків з елементами охолодження, а також поверхневих і об'ємних температурних градієнтів; визначення механічних і термічних напружень в гальмових дисках; аеро- та гідродинаміки повітряних потоків, що омивають внутрішні та зовнішні поліровані та матові поверхні різних типів дисків; математичної статистики та регресивного аналізу для обробки експериментальних даних; раціонального проектування вентильованих гальмових дисків з елементами охолодження з використанням цільової функції мінімізації їхньої ваги і термічних напружень; прийняття оптимальних рішень при конструюванні різних типів гальмових дисків з достатньою енергоємністю.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що для дисково-колодкового гальма транспортного засобу:

- уперше запропоновано багатоетапний підхід до методів оцінки: теплового балансу, ефективності охолодження вентильованих дисків з отворами та канавками, розміщеними під кутом та віялом на їхніх поясах тертя, і ресурсу фрикційних накладок, виходячи з регламентованої енергонавантаженисті пар тертя гальма. При цьому встановлено взаємозв'язок між конструктивними параметрами конфузоров вентиляційних каналів і канавок і товщиною напівдис-

ків, а також вплив: наявності і розмірів отворів та канавок на напружено-деформований стан диска; зміни коефіцієнта взаємного перекриття пар тертя гальма на його експлуатаційні параметри; теплового стану диска на ефективність охолодження його поверхонь; складових потужності тертя на знос фрикційних накладок колодок;

- встановлено закономірності впливу рівня енергонавантаженості різних типів дисків на інтенсивність зародження і розвиток мікротріщин на їхніх поясах тертя;

- розвинуто принципи проектування вентильованих гальмових дисків з охолоджувальними елементами на поясах тертя для зниження енергонавантаженості за рахунок інтенсифікації вимушеного повітряного охолодження;

- уперше запропоновано систему термоелектричного охолодження з напівпровідниковими елементами в поясах тертя дисків.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновані методи оцінки теплового балансу, ефективності охолодження вентильованих дисків з отворами та канавками, розміщеними під кутом та віялом на їхніх поясах тертя, і ресурсу фрикційних накладок з урахуванням регламентованої енергонавантаженості пар тертя гальма транспортного засобу дозволили:

- встановити закономірності виникнення і розвитку осередків мікротріщин на поясах тертя вентильованих гальмових дисків з елементами охолодження для їх запобігання;

- покращити на 10,0...15,0% зносо-фрикційні властивості пар тертя гальма з удосконаленим вентильованими гальмовими дисками в залежності від категорії транспортного засобу;

- правильно проводити підбір матеріалів пар тертя дисково-колодкових гальм, виходячи з регламентованої енергонавантаженості, для різних категорій транспортних засобів;

- розробити систему термоелектричного охолодження для підвищення ефективності пар тертя гальма і зниження їх енергонавантаженості.

Рекомендації й технічні рішення, запропоновані в даній роботі, прийняті і використовуються на станції діагностування дисково-колодкових гальм вантажних транспортних засобів в ТзОВ «Надвірнянська автобаза» Івано-Франківської обл., ТзОВ «ПРОФІТ» (м. Краснодар), а також у навчальному процесі кафедри технічної механіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, висновки і рекомендації, наведені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. В опублікованих спільних працях автору належать: розроблення елементів теплової моделі вентильованого гальмового диска з отворами і канавками на його поясі тертя [1, 2, 5]; оцінка теплового балансу поверхонь диска теплоізованих від навколишнього середовища [11]; комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану гальмових дисків [10, 13, 22]; розроблення методики проведення експериментальних досліджень і обробка результатів з енергонавантаженості пар тертя гальма [14, 28]; обґрунтування конструктивних параметрів гальмових дисків з вентиляційними отворами та канавками [6]; обґрунтування

доцільності комплексного підходу до оцінки ефективності охолодження вентиляваних дисків з отворами і канавками [4, 16, 25]; дослідження процесу зародження і розвитку мікротріщин на поясі тертя диска [3, 10]; енергетичного підходу до оцінки ресурсу фрикційних накладок колодок гальма [10]; формулювання принципів проектування пар тертя гальма [4, 7, 8, 9, 15, 17, 18, 21, 23, 26, 27]; розроблення високоефективного примусового охолодження пар тертя гальма [12, 15, 19, 20, 24].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: LXXII-й науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників: відокремлених структурних підрозділів національного транспортного університету (м. Київ, 2016 р.); міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі», (м. Кривий Ріг, 2016 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу» (м. Івано-Франківськ, 2016); всеукраїнській науково-технічній конференції «Нафта і газ. Наука – освіта – виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку» (м. Дрогобич, 2016); V-ій міжнародній науково-практичній конференції студентів та молодих вчених «Наукові розробки: перспективи 21 сторіччя», (м. Краматорськ, 2017 р.); V-й міжнародній науковій конференції «Наука третього тисячоліття» (м. Моррісвіль, США, 2017 р.); XXXV-ій міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії» (м. Переяслав-Хмельницький, 2017 р.); X-ій міжнародній науково-практичній конференції студентів та молодих вчених «Нові виклики. Нові досягнення» (м. Краматорськ, 2017 р.); X-ій міжнародній науковій конференції "Трансформація наукової думки" (м. Моррісвіль, США, 2017 р.); VI-ій всеукраїнській науково-практичній конференції «Наукові дослідження: перспективи інновацій у суспільстві і розвитку технологій» (м. Харків, 2017 р.); XVIII-ій міжнародній науково-технічній конференції "Транспортні і транспортно-технологічні системи" (м. Тюмень, 2018 р.); II-ій міжнародній науково-технічній конференції „Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018", (м. Івано-Франківськ, 2018 р.); розширеному семінарі кафедри технічної механіки і автомобільного транспорту Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (м. Івано-Франківськ, 2018 р.); розширеному науково-технічному семінарі кафедри автомобілебудування Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів, 2018 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 28 друкованих працях, з них 3 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 11 статей у наукових фахових виданнях України, 13 тез доповідей та одержано 1 патент на винахід України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури, що містить 156 найменувань, і 14 додатків. Основний текст дисертації викладено на 158 сторінках комп'ютерного набору, включаючи 58 рисунків і 20 таблиць.

По тексту автореферату використано такі позначення: ТЗ – транспор-

тний засіб; ДКГ – дисково-колодкове гальмо; ПТ – пара тертя; ЕО – елементи охолодження; ПТР – поверхнева температура; ОТР – об’ємна температура; ГТР – градієнт температури; ПН – питомі навантаження.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність оцінки енергонавантаженості вентилюваних дисків гальм транспортних засобів та її вплив на регламентовану ефективність згідно з Правилком 13 ЄЕК ООН.

Наведено: мету роботи, задачі та методи дослідження, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, а також перелік місць апробації результатів роботи.

У **першому розділі** докладно проаналізовано: особливості конструкції, режими роботи та види розрахунків фрикційних вузлів ДКГ; роль матових і полірованих поверхонь в процесах складного теплообміну вентилюваних дисків. Показано вплив енергонавантаженості пар тертя ДКГ транспортних засобів на їх експлуатаційні параметри, з яких виділено напружено-деформований стан суцільних дисків. Розглянуто засоби зниження енергонавантаженості фрикційних вузлів гальма.

Аналіз науково-дослідних робіт показав, що існуючі методи оцінки теплового балансу є непридатними для експлуатаційників, а ефективність охолодження удосконалених вентилюваних дисків потребує докладного вивчення.

Другий розділ присвячено теоретичним дослідженням енергонавантаженості пар тертя вентилюваних дисків дисково-колодкових гальм ТЗ.

Вентилювані диски мають розвинену систему вентиляційних отворів і каналів, розташованих в тілі диска між його полірованими і матовими бічними поверхнями. Зазначені поверхні взаємодіють зі швидкісними потоками омиваючого повітря при русі ТЗ, тим самим знижуючи енергонавантаженість удосконалених гальмових дисків (рис. 1). На рис. 1 використано такі позначення: $h_{1,2}$, $r_{m1,2}$ – висота і радіус мікронерівності; $\tau_{1,2}$ – напруження зрізу; t_{cs} , $t_{1,2}$ – температури: спалаху; поверхневі. $c_{1,2}$ – теплоємність матеріалів накладки і диска.

Установлено, що коефіцієнт тепловіддачі конвекцією вентилюваного диска приблизно вдвічі більший, ніж суцільного. Проте охолоджувальна здатність вентилюваного диска знижується на високих швидкостях руху транспортного засобу через збільшення статичного напору омиваючого повітря. Для запобігання цьому на поясі тертя диска виконано отвори під кутом і віялом (див. рис. 1 δ – z), які при обертанні диска послідовно перекриваються накладками. При цьому потоки повітря, що циркулює у порожнинах диска, збурюються, ефективність його вимушеного охолодження зростає.

Як об’єкт досліджень обрано дисково-колодкові гальма вантажного транспортного засобу марки MAN моделі TGA 26.430. У даному гальмі використовується вентилюваний гальмовий диск. Установлено, що при виборі раціонального перерізу каналів і радіусів заокруглення на вході отворів швидкість омиваючого потоку повітря підвищується на 5,0 – 10,0 %. Аналітично визначено втрати механічної енергії потоків повітря, яке рухається по вентиляційних каналах диска. Розташування канавок і отворів віялом на поясі тертя сприяє по-

зитивній зміні напрямку руху потоків повітря. Запропоновано класифікаційну таблицю гідравлічних втрат енергії потоків повітря, яке омиває зовнішні та внутрішні поверхні удосконалених вентиляльованих гальмових дисків гальма транспортного засобу марки MAN.

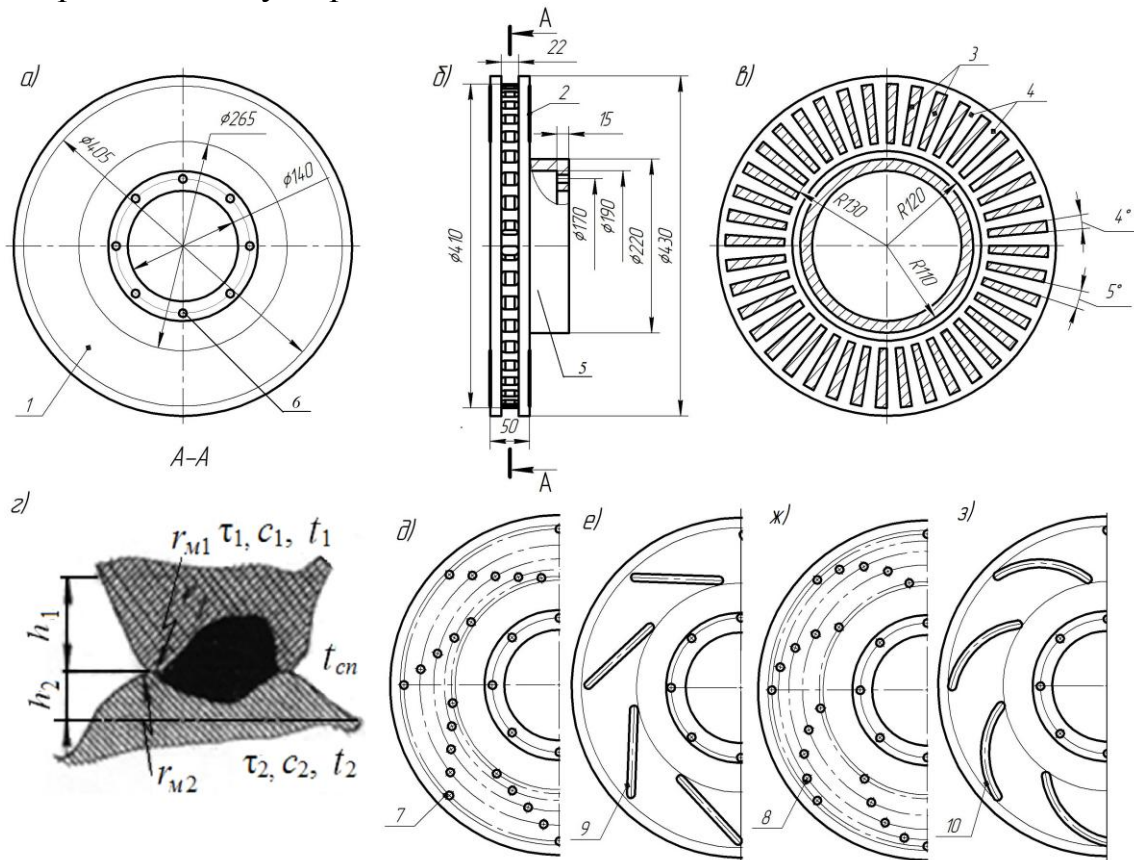


Рис. 1. Головний (а) і збоку (б) вигляди вентиляльованого гальмового диска з фланцем, його поздовжній розріз (в), пляма контакту на мікровиступах ПТ (з) і типи дисків з елементами охолодження (д, е, ж, з): 1 – бічні поверхні диска; 2 – пояси тертя; 3 – радіальні ребра; 4 – вентиляційні канали; 5 – фланець диска; 6 – кріпильні отвори; 7, 8 – вентиляційні отвори, розташовані під кутом і віялом; 9, 10 – канавки, розташовані під кутом і віялом

З урахуванням втрати енергії повітря на вихроутворення на основі рівняння нерозривності його потоку отримано аналітичний вираз для визначення витрати повітря, що проходить крізь гальмовий диск при його вимушеному охолодженні.

Отримано аналітичні залежності для визначення потужності тертя та її складових (табл. 1).

В залежностях (1) – (4) використано такі позначення: r_m , V_m – зведений радіус (м) і об'єм (m^3) мікровиступів пояса тертя диска, м; $V_{кв}$ – швидкість ковзання, м/с; N – нормальне притискне зусилля, Н; L_n – довжина фрикційної накладки, м; k_g – коефіцієнт, який враховує час фрикційної взаємодії мікровиступів пар тертя ($k_g = 2,0 \cdot 10^2$); I – сила струму, А; U – трибоЕРС в кінці гальмування, В; t_{max} – максимальна ПТР на плямі контакту мікровиступів, °С; α_L – коефіцієнт зовнішньої тепловіддачі, Вт/($m^2 \cdot c$); (dt/dL) – ГТР по довжині контакту, °С/мм; R_t – термічний опір контакту, ($m^2 \cdot c$)/Вт; ρ' – питомий електричний

опір, $(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)/\text{м}$; ω – кутова швидкість диска, с^{-1} ; M_T – гальмовий момент, що розвивається ПТ гальма, $\text{Н} \cdot \text{м}$; ε – коефіцієнт, який враховує вплив ЕО вентилязованого диска на теплову складову; f – динамічний коефіцієнт тертя.

Таблиця 1

Характеристики складових потужності пар тертя гальма

Найменування параметрів	Розрахункові залежності, Дж/с
Загальна потужність тертя та її складові:	$\sum W = W_{\text{мех}} + W_{\text{тепл}} + W_{\text{ел}};$ (1)
механічна	$W_{\text{мех}} = 0,6r_m V_{\text{кв}} N / L_H,$ (2)
електрична	$W_{\text{ел}} = k_{\varepsilon} \cdot I \cdot U,$ Дж/с, де $I = \sqrt{\frac{t_{\text{max}} \cdot \alpha_{\text{л}} \cdot (dt/dL) \cdot V_m \cdot \tau}{R_t \cdot \rho' \cdot N}},$ (3)
теплова	$W_{\text{тепл}} = 10^{-3} \omega \cdot M_T = 10^{-3} V_{\text{кв}} \cdot f \cdot N \cdot \varepsilon / (2 \cdot \pi),$ (4)

Коефіцієнт ε визначено експериментально-розрахунковим шляхом за залежністю:

$$\varepsilon = 1 / \ln(t_0 - t_c), \quad (5)$$

де t_0, t_c – температури повітря на вході та виході із системи охолодження диска, $^{\circ}\text{C}$.

На зносо-фрикційні властивості ПТ впливають такі фактори: глибина проникнення мікроступів пояса тертя диска в мікроступи накладки, нормальні й тангенціальні напруження, що діють на мікроступи, їх пружні та пластичні деформації. Визначено частку питомої енергії, витраченої на деформацію одиниці об'єму поверхневого шару диска при плоскому напруженому стані:

$$W_{\text{П}} = \frac{1 + \mu_{\delta}}{3E_{\delta}} (\sigma_n^2 + \tau^2 - \sigma_n \cdot \tau), \quad (6)$$

де σ_n, τ – напруження в площині дії нормального і тангенціального навантаження; μ_{δ}, E_{δ} – коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга матеріалу диска.

З урахуванням об'єму мікроступів пояса тертя диска, деформованих за одиницю часу, визначено механічну складову потужності тертя:

$$W_{\text{мех}} = W_{\text{П}} \cdot V_{\text{од}} = W_{\text{П}} \cdot h \cdot V_{\text{кв}} \cdot t_p, \quad (7)$$

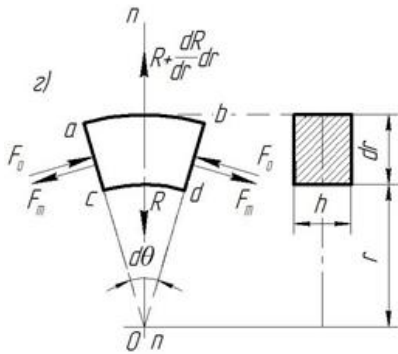
де h – величина деформації в напрямку, перпендикулярному поверхні навантаження диска.

Інтенсивність електротермомеханічного тертя характеризується величинами електричних і теплових струмів, на мікроступах ПТ (див. рис. 1 з) утворюються електротеплові плями контактів. Товщини контактних шарів відіграють суттєву роль у формуванні їх питомого електротермічного опору, тобто впливають на енергонавантаженість поверхневих і приповерхневих шарів ПТ.

Аналітично встановлено, що: зі збільшенням часу дії імпульсних електричних і теплових струмів товщина електротеплових шарів збільшується; товщина теплового шару накладки в середньому є на 26 % меншою, ніж диска через нижчий коефіцієнт теплопровідності її матеріалу; товщина теплового шару

на порядок вище від товщини електричного.

Напружений стан диска визначено для нескінченно малого об'єму, навантаженого поверхневими й об'ємними силами (рис. 2):



$$- \text{сила інерції} - dC = \frac{\gamma}{g} hr^3 \omega^2 dr d\theta, \quad (8)$$

$$- \text{радіальна сила} - R = \sigma_r h r d\theta, \quad (9)$$

$$- \text{колова сила} - F_0 = \sigma_\theta h dr, \quad (10)$$

$$- \text{сила тертя} - F_m = fpA, \quad (11)$$

Рис. 2. Навантажений елемент диска виділений з пояса тертя

де γ – вага одиниці об'єму матеріалу диска; dr , h – висота і ширина прямокутного перерізу елементарного об'єму диска; r – внутрішній радіус пояса тертя диска; $d\theta$ – елементарний кут виділеного навантаженого елемента диска; g – прискорення вільного падіння тіла; ω – кутова швидкість; f – динамічний коефіцієнт тертя; p – ПН; A – контактна площа фрикційної взаємодії пар тертя; σ_r , σ_θ – напруження: радіальні, колові.

Установлено, що найбільшими є напруження:

– температурні (σ_θ) на внутрішньому радіусі $2r_1$ вентиляційного отвору диска

$$\sigma_{\theta \max} = \frac{\gamma \omega^2}{4g} \left[r_2^2 (3 + \mu_\theta) + r_1^2 (1 - \mu_\theta) \right]; \quad (12)$$

– радіальні в точках колового перерізу на радіусі $r_0 = \sqrt{r_2 r_1}$

$$\sigma_{r \max} = \frac{3 + \mu_\theta}{8} \frac{\gamma \omega^2}{g} (r_2 - r_1)^2, \quad (13)$$

при умові, що $\sigma_{\theta \max} > \sigma_{r \max}$; де $2r_2$ – зовнішній радіус диска.

Механічні напруження на поверхні пояса тертя диска за величиною дорівнюють питомим навантаженням між парами тертя. Місця максимальних стрибків напружень на поверхнях дисків є осередками зародження мікротріщин.

Установлено, що найбільші напруження виникають у вентиляційному диску з отворами на його поясі тертя, які є концентраторами напружень.

Визначено напружено-деформований стан диска з фланцем з розташуванням отворів віялом (рис. 3 а, б, в) і під кутом (рис. 3 г, д, е). Лівий бік диска має кругову зону температурних напружень (σ_t) зі збільшенням до периферії: 234,3 МПа (див. рис. 3 б) і 259,2 МПа (див. рис. 3 д). Максимальні σ_t виникають біля отворів, розташованих ближче до внутрішнього радіуса диска. Напруження з розташуванням отворів віялом та під кутом становлять, відповідно, 281,1 МПа (див. рис. 3 а, б) і 311,5 МПа (див. рис. 3 г, д).

Установлено, що максимальні температурні напруження виникають у порожнині гальмового диска з фланцем під вентиляційними каналами на лівій його частині. При розташуванні отворів віялом вони становлять 328,1 МПа (рис. 3 в), під кутом – 363,8 МПа (рис. 3 е).

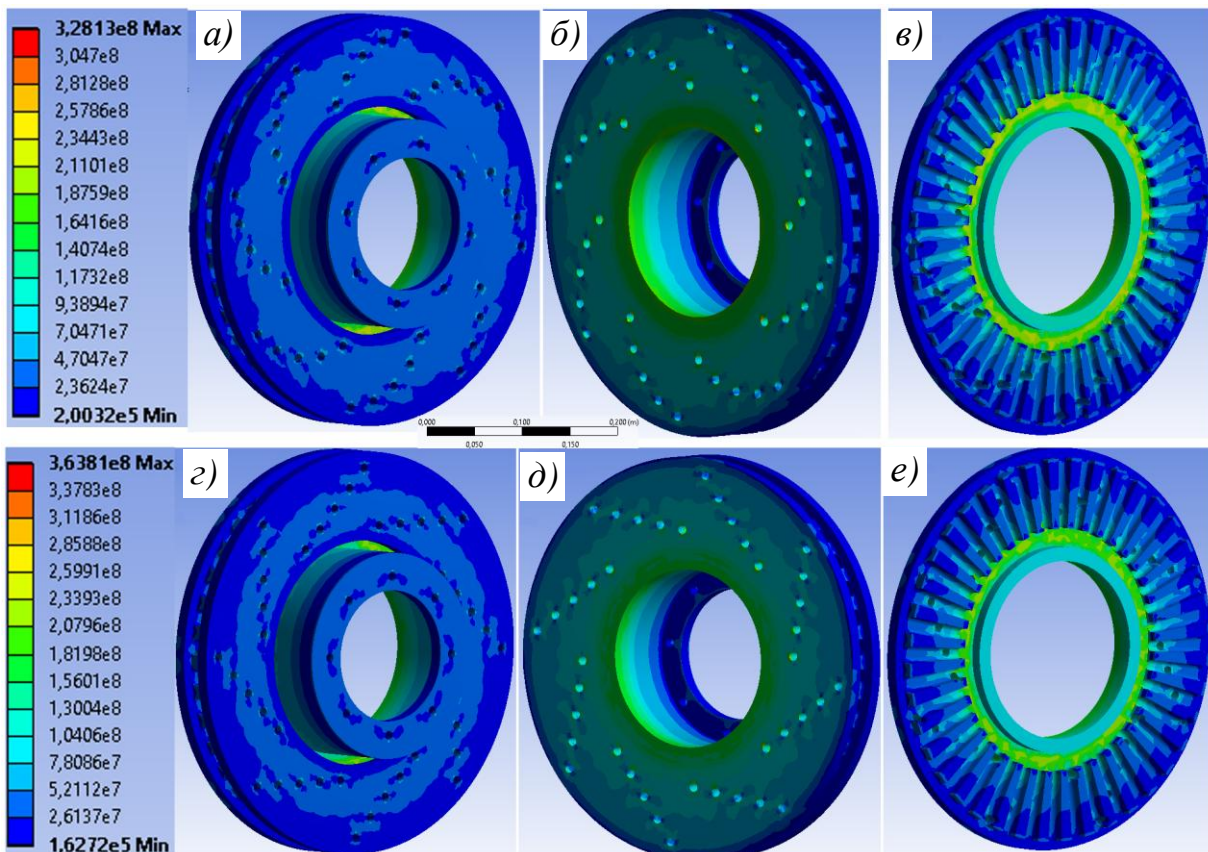


Рис. 3. Еквівалентні напруження правої (*a*, *z*) та лівої (*б*, *д*) поверхонь диска і по перерізу вентиляційних каналів (*в*, *е*), утворених радіальними ребрами, з розташування отворів віялом (*a*, *б*) та під кутом (*z*, *д*) на поясі тертя диска автомобіля MAN

Досліджено диски зі сталі 20X13 (пояс тертя диска), в яких спостерігалися поперечні макротріщини, що мають хвильовий характер поширення.

Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням енергонавантаженості металополімерних пар тертя дисково-колодкового гальма вантажного транспортного засобу марки MAN. Досліджено серійні та удосконалені вентилязовані диски гальма, випробування яких проводили на модельному стенді та в експлуатаційних умовах.

Наведено методику експериментальних досліджень та обґрунтовано засоби її реалізації. Основними вимірюваними та розрахунковими параметрами були: поверхневі й ОТР пар тертя та їхні градієнти; динамічний коефіцієнт тертя; швидкість ковзання; ПН, сумарні напруження, гальмовий момент та ваговий знос накладок. Запропоновано температурний метод оцінки теплового балансу вентилязованих дисків шляхом послідовної теплоізоляції їхніх поверхонь в лабораторних та експлуатаційних умовах при різній енергонавантаженості ПТ гальма. Ефективність удосконалених вентилязованих дисків гальм вантажного транспортного засобу марки MAN оцінювали в чотири етапи. Обробку експериментальних даних виконано з довірливою вірогідністю 0,95.

Установлено, що отвори сприяють створенню об'ємних вихорів в порожнинах вентиляційних каналів, а западини – завихренню омиваючих повітряних потоків, формуючи плоский вихор між поверхнями тертя.

За результатами досліджень аналітично визначено напружений стан серійного й удосконаленого вентиляваних гальмових дисків при об'ємній температурі 150 °С.

Установлено закономірність впливу коефіцієнтів взаємного перекриття ПТ з дисками різних конструктивних варіантів на основні експлуатаційні параметри: ПТР та їх градієнти, динамічні коефіцієнти тертя, знос і гальмовий момент ДКГ транспортного засобу.

За величиною відношення $(t_1 - t_0)/(t_2 - t_0)$ (де t_1, t_2, t_0 – температури: поверхонь тертя до випробування, перед початком наступного гальмування, навколишнього середовища) визначено ефективність ЕО удосконалених вентиляваних дисків гальм, пари тертя яких оснащено термопарами (табл. 2).

Таблиця 2

Енергонавантаженість удосконалених вентиляваних дисків гальма вантажного автомобіля марки MAN

Конструктивні виконання робочої поверхні диска:		Коефіцієнт взаємного перекриття, K_{63}	I		II		Відхилення температури, %		
			Середня ОТР диска, °С		ГТР по серединній товщині диска, °С/мм				
			без	з	без	з	I	II	
			фланця(ем)						
серійного		0,184	148,1	136,4	0,68	0,79	7,9	16,2	
удосконаленого з розташуванням	канавок	віялом	0,216	127,3	115,1	1,01	1,15	9,6	13,9
		під кутом	0,210	131,4	118,4	0,85	0,96	9,9	12,9
	отворів	віялом	0,192	129,2	117,9	0,96	1,04	8,7	8,3
		під кутом	0,192	133,5	121,2	0,79	0,88	9,2	11,4

Проаналізовано основні експлуатаційні параметри серійних та удосконаленого вентиляваних дисків у складі гальма вантажного транспортного засобу марки MAN (рис. 4, 5).

На рис. 4 і 5 використано такі позначення для вентиляваних гальмових дисків: ① – серійні; ②, ③ та ④, ⑤ – з розташуванням на поясі тертя канавок та отворів віялом і під кутом.

З табл. 2 і рис. 4 випливає:

– середня ОТР вентиляваного диска з та без фланця відрізняється на 7,9 %, глибинний градієнт температури – на 13,9 %, що пояснюється наявністю фланця;

– ОТР вентиляваних гальмових дисків з ЕО коливається в межах 8,7 – 9,9%, а глибинних ГТР – 7,7 – 12,2%.

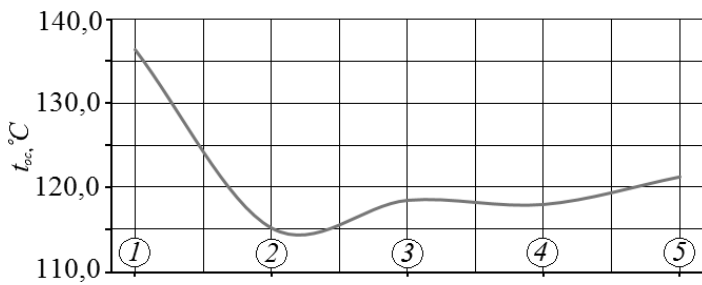


Рис. 4. Значення середньої об'ємної температури вентильованих серійного й удосконаленого дисків гальма ТЗ марки MAN

вого напівдиска поширюються крізь ребра вентиляційних каналів у лівий напівдиск, підвищуючи його енергонавантаженість. Значна кількість теплоти відводиться конвективно у вентиляційних каналах від правого напівдиска.

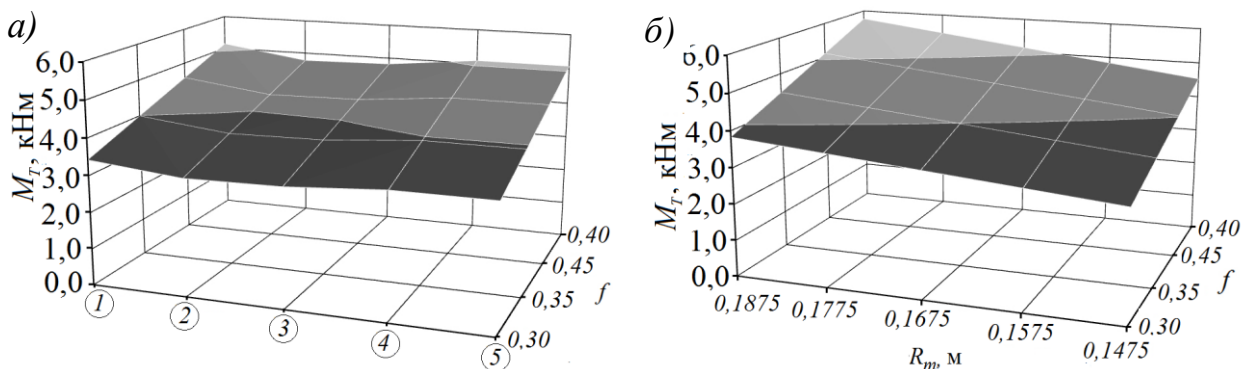


Рис. 5. Закономірності зміни гальмового моменту, що розвивається гальмом вантажного автомобіля марки MAN з удосконаленим вентильованим диском, в залежності від: *а* – динамічного коефіцієнта тертя (f) і конструктивного виконання; *б* – середнього радіуса (R_m) пояса тертя диска і f

Елементи охолодження, виконані на поясі тертя удосконаленого вентильованого диска, зменшують його енергонавантаженість у середньому на 15,6 % (рис. 6 *а – л*). Порівняно із серійним диском найбільше зменшення середньої об'ємної температури відбувається в диску з канавками віялом (15,6 %), найменше – з канавками під кутом (13,2 %).

Внаслідок появи теплових струмів при фрикційній взаємодії ПТ відбувається кондуктивний теплообмін в зоні під поясом тертя (рис. 6). Установлено, що під фланцем теплоти акумулюється на 70,44 % більше, ніж над ним. Над поясом тертя правого напівдиска її на 21,42 % більше, ніж під ним.

Температурні деформації в місцях спряження неробочих поверхонь напівдисків з ребрами спричинюють хвилястість або горбатість їхніх поверхонь тертя. Це призводить до збільшення ПН і виникнення локальних плям контактів на поясах тертя диска з температурами спалаху. Унаслідок цього зносо-фрикційні властивості різко погіршуються. При тривалій дії поверхневих та глибинних ГТР в тілі вентильованих дисків зароджуються і розвиваються мікротріщини з подальшим їх виходом на поверхню поясів тертя.

Пояси тертя диска піддаються симетричному циклу навантаження (рис. 7). У зоні концентратора напружень напівцикли розтягу зароджують додаткові за-

Установлено, що при збільшенні R_m від 0,1475 до 0,1875 м, f від 0,3 до 0,45, гальмовий момент зростає з 3,01 до 5,75 кНм, тобто на 47,6 %.

Доведено, що лівий напівдиск охолоджується швидше за правий за рахунок кондуктивної теплопередачі теплоти у його фланець. Теплові струми з правого напівдиска поширюються крізь ребра вентиляційних каналів у лівий напівдиск, підвищуючи його енергонавантаженість. Значна кількість теплоти відводиться конвективно у вентиляційних каналах від правого напівдиска.

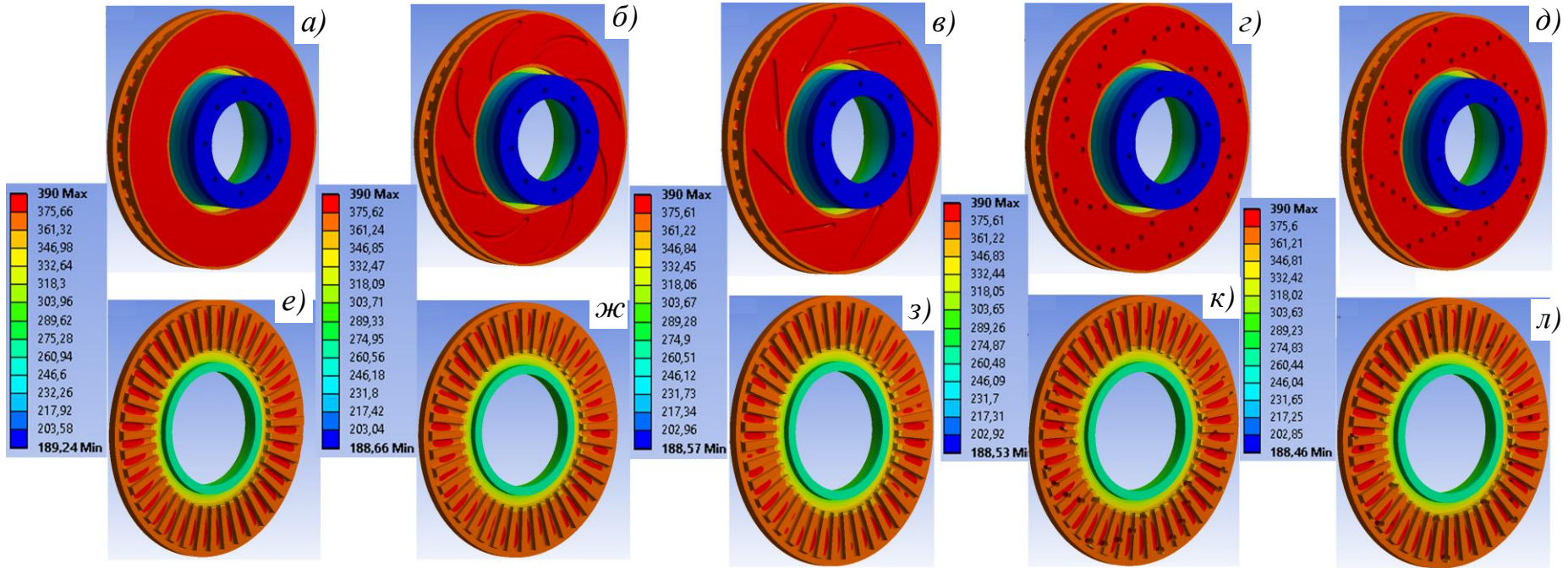


Рис. 6. Термограми дисків з фланцем ДКГ вантажного ТЗ марки MAN (а, б, в, г, д) і їхніх перерізів по вентиляційних каналах, які утворені радіальними ребрами (е, ж, з, к, л): а, е – серійного; з різним розташуванням на поясі тертя дисків: б, ж – канавок віялом; в, з – канавок під кутом; г, к – отворів віялом; д, л – отворів під кутом

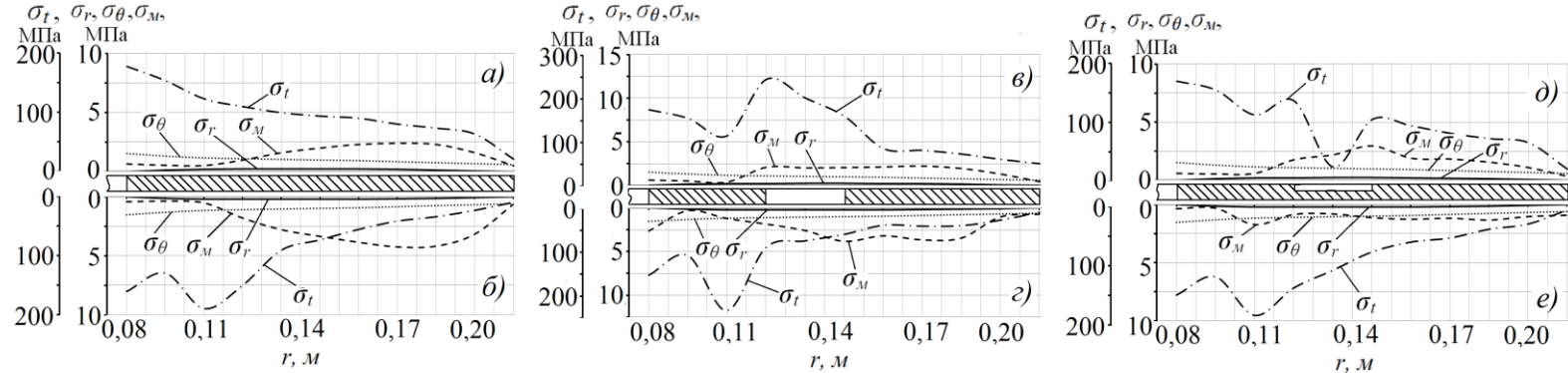


Рис. 7. Розподіл різних видів напружень, що виникають в тілі лівого напівдиска серійного (а, б), з отвором (в, г) і з канавкою (д, е) гальмового диска вантажного транспортного засобу марки MAN в залежності від його радіуса на зовнішній (зверху) і внутрішній (знизу) поверхні напівдиска: $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_M, \sigma_t$ – напруження: радіальні і колові, механічні й температурні, що виникають від дії відцентрових сил і при фрикційній взаємодії

лишкові напруження стиску для напівциклу стиску, а напівцикли стиску формують додаткові залишкові напруження розтягу для напівциклу розтягу, збільшуючи амплітуди напружень циклу з врахуванням дії залишкових напружень.

Проаналізовано напруження (табл. 3), яким піддаються гальмові диски транспортних засобів. Установлено, що:

– наскрізні отвори є концентраторами механічних напружень, на які накладаються температурні напруження, зумовлені великими поверхневими ГТР;

Таблиця 3

Напруження у вентильованих дисках гальма вантажного автомобіля

Конструктивні виконання робочої поверхні диска:			Максимальні температурні напруження диска, МПа		Відхилення, %
			без фланця	з фланцем	
серійного			241,56	280,43	13,7
удосконаленого з розміщенням	канавок	віялом	239,17	267,32	10,5
		під кутом	238,72	292,09	18,3
	отворів	віялом	285,32	328,13	13,0
		під кутом	280,52	363,81	22,9

– канавки, виконані під кутом на поверхнях гальмового диска, компенсують ефект розширення його тіла;

– місцем зародження мікротріщин є внутрішній радіус пояса тертя диска.

Четвертий розділ присвячено методам та засобам підвищення ефективності суцільних та вентильованих дисково-колодкових гальм ТЗ.

Оцінено ефективність вимушеного повітряного охолодження пар тертя ДКГ з суцільним та вентильованим дисками на основі їх багатопарової теплової моделі (рис. 8). Розглянуто особливості запропонованих теплових моделей.

Отримано аналітичні залежності для визначення коефіцієнтів теплопередачі й термічного опору та визначено їхні величини (табл. 4). Тут використано такі позначення: $K_1 \dots K_6$ – коефіцієнти теплопередачі; q – тепловий потік; α_1, α_2 – коефіцієнти тепловіддачі; $\lambda_1 \dots \lambda_5$ – коефіцієнти теплопровідності; $\delta_1 \dots \delta_5$ – товщини шарів (рис. 8); Δt – перепад ПТР суцільного диска; R_{ii} – термічний опір товщини диска.

Умову неідеального імпульсного теплового контакту в парі «накладка – диск» моделювали за допомогою введення між контактуючими поверхнями додаткових (буферних) шарів кінцевих елементів замість третього тіла. Товщину буферного шару враховували при визначенні коефіцієнтів теплопередачі у другому та п'ятому шарах теплової моделі різних типів дисків (рис. 8).

Товщину буферного шару та його теплофізичні властивості розраховували з умови створення ним термічного опору заданої величини, яка залежить від величини імпульсних контактних ПН, мікрошорсткостей плям контакту і теплофізичних властивостей елементів трибоспряження.

Тепловий потік, який діє на пояс тертя диска, дорівнює:

$$q_i = \frac{E_i}{A \cdot \tau}, \frac{Bm}{m^2}, \quad (20)$$



Рис. 8. Багатошарова теплова модель пари тертя дисково-колодкового гальма із суцільним (а) і вентиляваним (б) дисками: q_1, q_2, q_3, q_4 – теплові потоки; $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ – коефіцієнти теплопередачі; I, II, III, IV, V, VI – нумерація шарів, що беруть участь у теплообміні

Таблиця 4

Оцінка інтенсивності теплопередачі в суцільному та у вентиляваному гальмових дисках (пара тертя «диск – накладка»)

Нумерація шарів	Вид теплообміну:	Розрахункова залежність	Величини	
			$K_i, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$R_{ti} \times 10^{-2}, (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$
суцільний диск				
I	радіаційно-конвективний	$K_1 = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right); \quad (14)$	57,1	1,75
II	конвективний	$K_2 = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right); \quad (15)$	15,45	6,47
III	конвективний	$K_3 = 1 / \left(\frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\lambda_2} \right); \quad (16)$	12,34	8,10
вентилюваний диск				
IV	радіаційний і складний	$K_4 = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right); \quad (17)$	67,37	1,48
V	конвективний	$K_5 = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right); \quad (18)$	15,45	6,47
VI	конвективний	$K_6 = 1 / \left(\frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\lambda_2} \right). \quad (19)$	12,31	8,10

де E – енергія, яку поглинають гальма передньої (1/3 ваги) та задньої (2/3) осі транспортного засобу; A – площа пояса тертя диска; τ – час, за який колесо при гальмуванні здійснює один оберт.

Тепловий потік, який пронизує тіло диска, становить:

$$q_i = K_i(t_1 - t_2), \frac{Bm}{M^2}, \quad (21)$$

де K_i – коефіцієнт теплопередачі; t_1, t_2 – поверхневі температури поясів тертя диска.

Визначено основні конструктивні й вагові параметри дисків категорій ТЗ і установлено, що термічний опір товщини диска є величиною, оберненою до коефіцієнта теплопередачі (табл. 5).

Таблиця 5

Визначення конструктивних і вагових параметрів дисків гальм різних категорій транспортних засобів

Назва параметра	Розрахункові залежності
Співвідношення радіусів суцільного диска з фланцем	$R_{cp} / R_o = R_n / R_{cp}. \quad (22)$
Співвідношення площ охолоджувальної поверхонь до нагрівальної дисків: суцільного; вентильованого	$A_o / A_n = C_m / C_{II}; \quad (23)$
	$\sqrt[3]{A_o} / A_n = C_m / C_{II}; \quad (24)$
Діаметр і маса: суцільного і вентильованого дисків легкового і вантажного ТЗ (рис. 10)	$D = 0,032 \delta^2 + 1,8714 \delta + 233,05; \quad (25)$
	$m = 0,0174 \delta^2 - 0,3309 \delta + 5,8772. \quad (26)$
суцільних дисків для категорій ТЗ (рис. 11):	$D = -0,264 \delta^4 + 11,602 \cdot \delta^3 - 189,23 \cdot \delta^2 + 1362,5 \delta - 3400,3; \quad (27)$
	$m = -0,0067 \delta^5 + 0,3621 \delta^4 - 7,6649 \delta^3 + 79,872 \delta^2 - 408,81 \delta + 823,82; \quad (28)$
вентильованих дисків для категорій ТЗ (рис. 12):	$D = 4,3741 \delta - 193,51; \quad (29)$
	$m = 0,0181 \delta^2 - 0,3624 \delta + 6,0937. \quad (30)$

У табл. 5 використано такі позначення: R_o, R_n – відстані від кріпильного отвору і серединної поверхні пояса тертя диска до його краю; R_{cp} – радіус серединної поверхні пояса тертя, $R_o = R_{cp} + R_n$; A_n, A_o – площі диска: нагрівальна, охолоджувальна; C_{II}, C_m – коефіцієнти випромінювання полірованих і матових поверхонь диска; D, δ – діаметр і товщина диска або напівдиска; m – маса диска.

За результатами розрахунків (вирази 22–30) побудовано графічні залежності (рис. 9 – 12) і зроблено висновок про доцільність збільшення радіуса середньої лінії і зменшення внутрішнього радіуса пояса тертя диска. Це забезпечить збільшення гальмового моменту і зниження поверхневих ГТР диска.

Досліджено вплив продуктів зношування на електротермомеханічне тертя та інтенсивність зношування робочих поверхонь пар тертя. Показано, що при видаленні продуктів зношування із зони фрикційної взаємодії динамічний коефіцієнт підвищується на 10 – 15 %, а інтенсивність зношування мікроставів зростає в декілька разів.

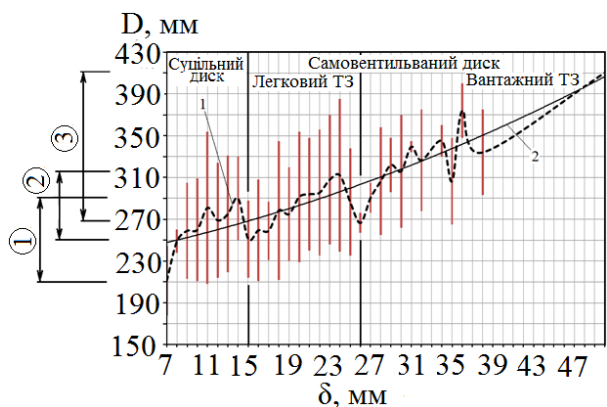


Рис. 9. Гістограма розкиду значень діаметра залежно від товщини гальмових дисків (крива 1) і поліноміальна закономірність (крива 2) їх зміни

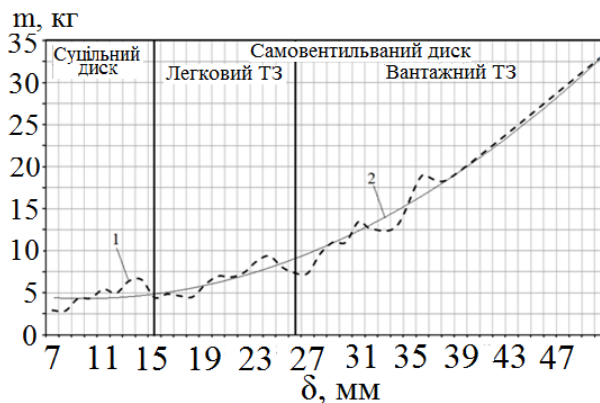


Рис. 10. Закономірності зміни маси гальмових дисків від їхньої товщини: 1, 2 – крива: несистематизована, поліноміальна

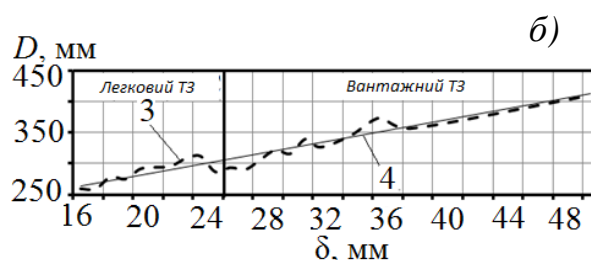
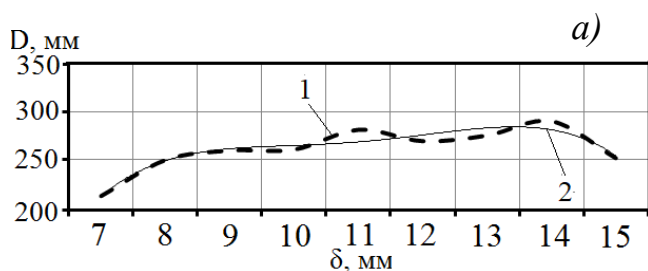


Рис. 11. Закономірності зміни діаметрів суцільних (а) і вентильованих (б) гальмових дисків від їх товщини для різних категорій транспортних засобів з масою: а – 1,2 – 12,5 т; б – легкових – 1,485 – 2,850 т; вантажних – 2,9 – 26,0 т: 1, 3 і 2, 4 – криві: несистематизовані і поліноміальні

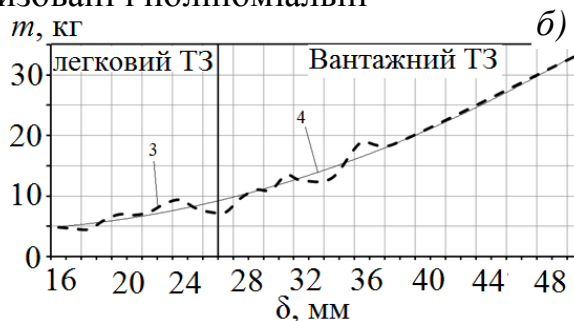
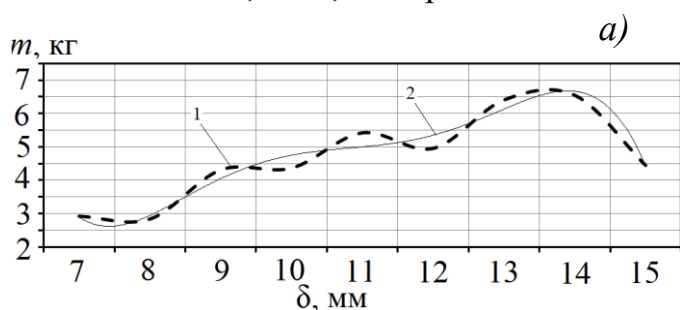


Рис. 12. Закономірності зміни маси суцільних (а) і вентильованих (б) гальмових дисків від їх товщини для різних категорій транспортних засобів: 1, 3 і 2, 4 – криві: несистематизовані і поліноміальні

Визначено: енергетичний баланс фрикційних вузлів гальма при електро-термомеханічному терті залежно від їхніх геометричних параметрів і з урахуванням теплової та електричної складової потужності тертя; об'ємну інтенсивність зношування робочої поверхні накладки та її ресурс; раціональну площу робочої поверхні накладки з урахуванням зведеного радіуса мікроставів пояса тертя диска.

Установлено залежність фактичного ресурсу фрикційної накладки від динамічного коефіцієнта тертя, притисного нормального зусилля за різних швидкостей руху транспортного засобу (рис. 13).

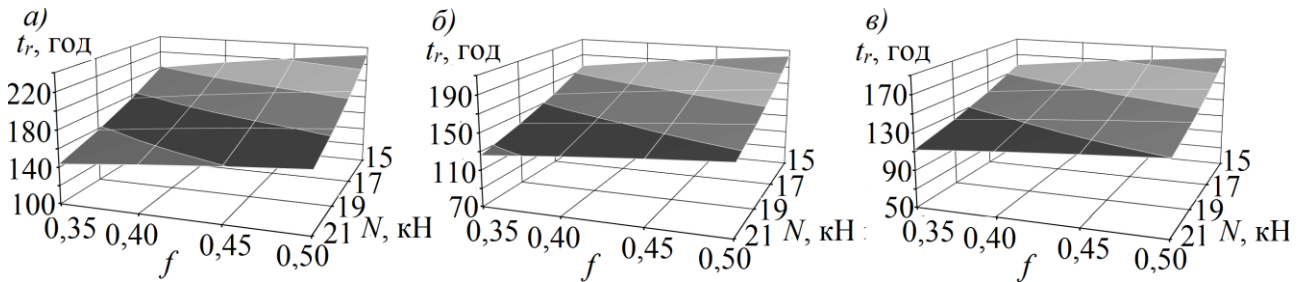


Рис. 13. Залежність фактичного ресурсу фрикційних накладок (t_r) гальма з удосконаленим вентиляльованим диском від динамічного коефіцієнта тертя (f) і притискового нормального зусилля (N) при різних швидкостях ковзання (V_k): $a - V_k=14,0$ м/с; $b - V_k=16,0$ м/с; $c - V_k=18,0$ м/с

Підвищення ефективності та надійності металополімерних пар тертя ДКГ ТЗ досягнуто за рахунок введення в пояси тертя диска циліндричних вставок, виготовлених з напівпровідникових матеріалів. Вони при фрикційній взаємодії з матеріалами накладок формують нові ПТ «полімер – власний напівпровідник», «полімер – домішковий напівпровідник», «напівпровідник – напівпровідник» з різними переходами електропровідностей: $p-n-p$, $p-n-n$, $p-n$, $p-p$ і $n-n$. Унаслідок цього утворюються мікротермоелектробатареї, які працюють в режимах мікротермоелектрогенераторів і мікротермоелектроохолодильників, знижуючи енергонавантаженість гальма до 15,0%.

Запропоновано метод проектування різних типів дисків гальм категорій транспортних засобів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконаних теоретичних й експериментальних досліджень дисково-колодкових гальм передньої осі вантажного транспортного засобу марки MAN моделі TGA 26.430 при керованому імпульсному підведенні теплоти до пар тертя та оцінки напружено-деформованого стану вентиляльованих гальмових дисків з елементами охолодження (отворами та канавками, розташованими під кутом та віялом) на їхніх поясах тертя з урахуванням специфіки роботи гальм в умовах енергонавантажених випробувань типу I та II згідно з правилами 13 ЄЕК ООН, визначено раціональні конструктивні та експлуатаційні параметри пар тертя транспортних засобів категорії N3, які забезпечують покращання зносо-фрикційних властивостей гальма.

1. Уперше запропоновано методи оцінки: теплового балансу вентиляльованих дисків при теплоізоляції їхніх поверхонь в лабораторних та експлуатаційних умовах з різними рівнями енергонавантаженості, що дозволило знизити: металомісткість дисків до 10%; енергонавантаженості удосконалених вентиляльованих дисків з елементами охолодження до 19 %. Ефективність оцінювали з урахуванням взаємозв'язку конструктивних параметрів, напружено-деформованого стану тіла диска та регламентованих експлуатаційних параметрів пар тертя гальма, що підвищило точність розрахунків до 15 %. Установлено, що 92 – 96% акумульованої теплоти – це повздовжні теплові потоки, решта – поперечні.

2. Сформульовано та розв'язано математичні задачі для оцінки:

– гідравлічних втрат при русі потоків повітря в удосконаленому вентиляованому гальмовому диску з елементами охолодження, втрат кількості повітря, коефіцієнтів теплопередачі та ефективності вимушеного охолодження;

– напружено-деформованого стану пружного суцільного диска з центральним отвором для випадку плоского напруженого стану з урахуванням конструктивних параметрів його елементів і маси. Установлено області максимальних деформацій і максимальних напружень на поясі тертя диска. Визначено напружено-деформований стан різних типів удосконалених вентиляованих гальмових дисків при допустимих експлуатаційних параметрах із залученням методу скінченних елементів і за допомогою комп'ютерного моделювання. Показано, що залишкові термічні напруження в тілі різних типів гальмових дисків досягають 20% від поточних термічних напружень при об'ємних температурах 150,0 – 200,0 °С.

3. Запропоновано принципи конструювання суцільних й удосконалених вентиляованих дисково-колодкових гальм різних категорій транспортних засобів на основі системного підходу. Отримано аналітичні вирази та проведено обчислення з визначення раціональних: радіусів гальмових дисків; площ матових і полірованих поверхонь для ефективного вимушеного їх охолодження. Знайдено функціональні залежності вигляду $D = f(\delta)$ і $m = f(\delta)$ (де D , δ – зовнішній діаметр диска і його товщина; m – маса диска), з урахуванням яких визначено раціональні параметри різних типів дисків для всіх категорій транспортних засобів.

4. Оцінено ресурс полімерних накладок колодок різних типів гальмових дисків для всіх категорій транспортних засобів з урахуванням потужності тертя. Вона містить механічну, теплову й електричну складові. Визначено енергетичний рівень мікроступів пояса тертя диска і раціональну площу робочої поверхні накладок варіюванням її шириною, довжиною і зведеним радіусом мікроступів поверхні тертя диска. Досягнуто збільшення ресурсу накладок в 1,25 раза. Запропонований метод використовується також при розрахунку ресурсу накладок барабанно- і стрічково-колодкових гальм.

5. Запропоновано систему і метод зниження енергонавантаженості пар тертя гальма з теплоізолюванням від тіла диска поясом тертя, в який вмонтовано циліндричні трубки, заповнені власними і з домішками напівпровідниковими речовинами. При фрикційній взаємодії з робочими поверхнями накладок ці речовини змінюють свої властивості так, що утворюються мікротермоелектробатареї, які працюють в режимах мікротермоелектрогенераторів і мікротермоелектроохолодильників, знижуючи енергонавантаженість гальма.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

1. Принудительное охлаждение трибосистемы ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки (часть 1) / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Э. С. Пирвердиев, Н. А. Вольченко, В. С. Витвицкий, В. М. Чуфус // Вісник Азербайджанської інженерної академії. – Баку. – 2017. – №3(9). – С. 18–30. (Здобувачем розроблено багатопарову теплову модель охолодження фрикційного вузла).

2. Электротермомеханический износ и разрушение ободов тормозных шкивов буровых лебедок (часть VI) / А. Х. Джанахмедов, Э. С. Пирвердиев, В. С. Скрыпник, Д. Ю. Журавлев, В. С. Витвицкий // Вісник Азербайджанської інженерної академії. – Баку. – 2016. – №2(8). – С. 18–33. *(Здобувачем встановлено закономірності зміни інтенсивності тепловіддачі від матових та полірованих поверхонь ободу шківа).*

3. Энергонагруженность трибосопряжений дисково-колодочных тормозов транспортных средств / Н. А. Вольченко, П. А. Поляков, В. С. Скрыпник, В. С. Витвицкий // Международн. научно-исследоват. журнал «Евразийский Союз Ученых». Технические науки. – №3(48), 2 часть, 2018. – С. 51–59. *(Здобувачем математично описано сили, що діють на елементарний об'єм пояса тертя диска, та напруження, які діють на нього).*

Статті у наукових фахових виданнях України:

4. Витвицкий В. С. Влияние конструкции фрикционного узла на электротермомеханическое трение / В. С. Витвицкий // Проблеми тертя та зношування. – Київ. – 2016. – № 3(72). – С. 57–63. *(Здобувачем досліджено вплив основних експлуатаційних параметрів на електротермомеханічне тертя фрикційного вузла).*

5. Возный А. В. Энергонагруженность пар трения в дисково-колодочных тормозных устройствах / А. В. Возный, В. С. Витвицкий, О. Б. Стадник // Проблеми тертя та зношування. – Київ. – 2017. – № 1(74). – С. 49–64. *(Здобувачем досліджено розподіл теплових потоків при різних компоновальних схемах розміщення пар тертя гальма).*

6. Вольченко Д. А. Влияние конструкции фрикционного узла на электротермомеханическое изнашивание / Д. А. Вольченко, Е. Ю. Андрейчиков, В. С. Витвицкий // Наук.-техн. та виробн. журнал Підйомно-транспортна техніка. – Одеса. – 2016. – № 4(52). – С. 78–86. *(Здобувачем досліджено вплив конструкції фрикційного вузла на його зношування).*

7. Вольченко Д. А. Нанотрибологические процессы в парах трения ленточно-колодочных тормозов / Д. А. Вольченко, В. С. Скрипник, В. С. Витвицкий // Наукові нотатки, міжвуз. зб. за галузями знань «Технічні науки». – Луцьк, 2016. – Вип. 55. – С. 68–71. *(Здобувачем досліджено стан поверхневих і приповерхневих шарів металополімерних пар тертя гальма).*

8. К вопросу об использовании динамических моделей дисково-колодочных тормозов транспортных средств / Д. А. Вольченко, А. В. Возный, О. Б. Стадник, В. С. Витвицкий // Проблеми тертя та зношування. – Київ. – 2017. – № 2(75). – С. 24–37. *(Здобувачем запропоновано метод проектування різних типів гальмових дисків).*

9. К вопросу расчета и проектирования различных типов дисков для тормозов подкатегорий автотранспортных средств / М. В. Киндрачук, А. И. Вольченко, В. Я. Малык, Д. Ю. Журавльов В. С. Витвицкий // Проблеми тертя та зношування. – Київ. – 2018. – № 3 (80). – С. 4–15. *(Здобувачем розроблено метод оцінки енергонавантажженості пар тертя дисково-колодочкових гальм).*

10. Напряженно-деформированное состояние при многоочаговом зарождении и развитии микротрещин в тормозных шкивах буровых лебедок /

А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, В. С. Витвицкий // Проблемы тертя та зношування. – Київ. – 2016. – № 1(70). – С. 20–32. *(Здобувачем оцінено кінетику стану робочої поверхні металополімерного вузла тертя).*

11. Энергонагруженность различных типов дисков в тормозных устройствах подъемно-транспортных машин (часть первая) / Н. А. Вольченко, А. В. Возный, А. Н. Вудвуд, О. Б. Стадник, В. С. Витвицкий // Проблемы тертя та зношування. – Київ. – 2017. – № 3(76). – С. 17–27. *(Здобувачем оцінено енергетичний баланс потоку повітря, яке омиває порожнини вентиляованого гальмового диска).*

12. Энергонагруженность различных типов дисков в тормозных устройствах подъемно-транспортных машин (часть вторая) / Д. А. Вольченко, А. В. Возный, М. В. Кашуба, О. Б. Стадник, В. С. Витвицкий // Проблемы тертя та зношування. – Київ. – 2017. – № 4(77). – С. 29–35. *(Здобувачем розроблено елементи багатоструменевої ежекторної системи охолодження гальмових дисків).*

13. Энергонагруженность различных типов дисков в тормозных устройствах транспортных самолетов / М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, А. В. Возный, О. Б. Стадник, В. С. Витвицкий // Проблемы тертя та зношування. – Київ. – 2018. – № 1(78). – С. 4–16. *(Здобувачем досліджено вагові та енергетичні характеристики різних типів гальмових дисків).*

14. Экспериментальные исследования энергонагруженности пар трения дисково-колодочных тормозов транспортных средств (часть третья) / А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, А. В. Возный, И. О. Бекиш, В. С. Витвицкий // Проблемы тертя та зношування. – Київ. – 2018. – № 2(79). – С. 28–40. *(Здобувачем розроблено методикау експериментальних досліджень енергонавантаженості різних типів дисків).*

Матеріали конференцій:

15. Возный А. Теория и проектирование тормозных дисков с охлаждением типа «многоструйный эжектор» дисково-колодочного тормоза / А. Возный, И. Бекиш, В. Витвицкий // Матеріали XXXV міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії», Переяслав-Хмельницький, 27–28 лютого 2017 р. – С. 162–165. *(Здобувачем запропоновано елементи конструкції багатоструменевої системи охолодження гальма і теоретичне обґрунтування її ефективності).*

16. Возный А. В. Оптимизация конструктивных и эксплуатационных параметров фрикционных узлов дисково-колодочных тормозов / А. В. Возный, В. Я. Малык, О. Б. Стадник, В. С. Витвицкий // Матеріали X міжн. наук.-практ. конф. студентів та молодих вчених «Нові виклики. Нові досягнення», Краматорськ, 15 вересня 2017. – С. 36 – 40. *(Здобувачем запропоновано оригінальний підхід до проектування фрикційних вузлів дисково-колодочних гальм).*

17. Возный А. В. Применение дисково-колодочных тормозов в подъемно-транспортных машинах / А. В. Возный, О. Б. Стадник, В. С. Витвицкий // Proceedings of V International scientific conference “Science of the third

millennium". Morrisville, USA, Lulu Press., 29 April 2017. – С. 34 – 38. *(Здобувачем оцінено енергонавантаженість пар тертя дисково-колодкового гальма).*

18. Возный А. В. Системотехника при исследовании пар трения дисково-колодочных тормозов подъемно-транспортных машин / А. В. Возный, О. Б. Стадник, В. С. Витвицкий // Матеріали V міжн. наук.-практ. конф. студентів та молодих вчених «Наукові розробки: перспективи 21 сторіччя», Краматорськ, 19 квітня 2017. – С. 48 – 54. *(Здобувачем за допомогою системотехніки досліджено енергонавантаженість пар тертя гальмівних пристроїв).*

19. Возный А. В. Энергонагруженность пар трения с полупроводниковыми веществами дисково-колодочных тормозных устройств / А. В. Возный, В. Я. Малык, В. С. Витвицкий, П. С. Красин // Proceedings of X International scientific conference "Scientific thought transformation". Morrisville, USA, Lulu Press., 22 Sep. 2017. – С. 22 – 26. *(Здобувачем розроблено конструкцію гальмівного диска з напівпровідниковими включеннями в його поясі тертя).*

20. Вольченко Д. А. Снижение энергонагруженности пар трения дисково-колодочного тормоза / Д. А. Вольченко, А. В. Возный, И. О. Бекиш, В. С. Витвицкий // Матеріали VI всеукраїнської наук.-практ. конф. «Наукові дослідження: перспективи інновацій у суспільстві і розвитку технологій», Харків, 13 жовтня 2017. – С. 52 – 56. *(Здобувачем досліджено зниження енергонавантаженості фрикційних вузлів за рахунок роботи термобатарей).*

21. Вольченко Д. А. К вопросу снижения водородного износа пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки (часть вторая) / Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, В. С. Витвицкий // Матеріали всеукраїнської наук. техн. конф. «Нафта і газ. Наука – освіта – виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку». – Дрогобич, 10-11 березня 2016. – С. 15-19. *(Здобувачем проаналізовано механізм водневого зношування сталевих поверхонь тертя).*

22. Вольченко Н. А. Оценка напряженно-деформированного состояния дисков в тормозных устройствах транспортных средств / Н. А. Вольченко, П. А. Поляков, В. С. Витвицкий // Механика, оборудование, материалы и технологии. – Краснодар: «ПринтТерра», 2018. – С. 564–573. *(Здобувачем досліджено напружено-деформований стан гальмових дисків).*

23. Прогнозування енергонавантаженості пар тертя модульного дисково-колодкового гальма шахтної підйомної машини / Д. О. Вольченко, В. Я. Малик, А. В. Возний, В. С. Витвицкий // Матеріали II міжнародної наук.-техн. конф. „Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018", Івано-Франківськ, 24-27 квітня 2018. – С. 185–188. *(Здобувачем запропоновано удосконалений метод проектування фрикційних вузлів дисково-колодкових гальм).*

24. Энергонагруженность дисково-колодочного тормоза с воздушным охлаждением типа "многоструйный эжектор" / Н. А. Вольченко, П. А. Поляков, А. В. Возный, О. Б. Стадник, В. С. Витвицкий // Матеріали XVIII міжнародної науково-технічної конференції "Транспортні та транспортно-технологічні системи", Тюмень, Изд-во: Тюменский индустриальный университет, 19 апреля 2018. – С. 69–73. *(Здобувачем запропоновано конструкцію багатоструменевої системи охолодження гальма).*

Тези конференцій:

25. Журавльов Д.Ю. Технічні вимоги і умови роботи фрикційних вузлів стрічково-колодкового гальма бурової лебідки / Д. Ю. Журавльов, І. О. Бекіш, В. С. Витвицький // Матеріали міжнародної наук.-техн. конф. «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу». – Івано-Франківськ, 16-20 травня 2016. – С. 296-299. *(Здобувачем оцінено ефективність охолодження фрикційних вузлів).*

26. Проектний та перевірний розрахунок фрикційних вузлів дисково-колодкових гальм / О. І. Вольченко, А. В. Возний, В. С. Витвицький, О. Б. Стадник // Матеріали LXXII наук. конф. проф.-виклад. складу, асп. студент. та співробітників: відокремл. структ. підрозд. націонал. трансп. ун-ту. – Київ, 2016. – С. 527-528. *(Здобувачем визначено конструктивні параметри удосконаленого гальмового диска).*

27. Скрыпник В. С. Робастическая методология разработки фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки / В. С. Скрыпник, Н. А. Вольченко, В. С. Витвицкий // Матеріали міжнародної наук.-техн. інтернет-конференції «Інноваційний розвиток гірничодобувної галузі», Кривий Ріг, 27–28 лютого 2016 р. – С. 284. *(Здобувачем запропоновано робастичний підхід до розроблення, випробування та експлуатації різних типів вузлів тертя).*

Патент

28. Патент України № 117625 G01N 3/56(2006.01). Спосіб випробування матеріалів на зношування при терті по абразивному прошарку / М. Й. Бурда, Л. Я. Роп'як, Ю. М. Бурда, О. В. Рогаль, В. В. Перепічка, В. С. Витвицький; власник Івано-Франківський націонал. техн. ун-т нафти і газу. – № а201700398; заявл. 16.01.2017, опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16. – 7 с. *(Здобувачем запропоновано метод підготовки зовнішніх поверхонь для дослідження матеріалів на зношування).*

АНОТАЦІЯ

Витвицький В. С. Підвищення ефективності пар тертя вентильованих дисково-колодкових гальм автомобілів з урахуванням енергонавантаженості їхніх дисків. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерства освіти і науки України, Львів, 2019.

Дисертація присвячена розробленню методів оцінки теплового балансу та обґрунтуванню необхідності підвищення ефективності охолодження вентильованих дисків дисково-колодкового гальма вантажного автомобіля марки MAN. Розроблено двовимірну теплову модель пари тертя «накладка-диск» для прогнозування її теплопередавальної здатності при стендових та експлуатаційних випробуваннях типу I. Методом скінченно-елементного моделювання досліджено вплив теплових струмів, механічних і теплових напружень, а також їх градієнтів на зародження та розвиток мікротріщин на поясах тертя різних типів дисків. На основі методу математичного планування експерименту отримано регресійні рівняння для визначення основних конструктивних і вагових параметрів різних типів дисків гальм всіх категорій транспортних засобів. Оцінено

ресурс накладок колодок гальма вантажного автомобіля.

Ключові слова: методи оцінки теплового балансу і ефективності охолодження, тепла модель, вентиляований дисковий гальмовий механізм, пояс тертя, отвори та ненаскрізні канавки, транспортний засіб, Правила 13 ЄЕК ООН, випробування I, енергонавантаженість, енергоємність, температурний режим.

АННОТАЦИЯ

Витвицкий В. С. **Повышение эффективности пар трения вентилируемых дисково-колодочных тормозов автомобилей с учетом энергонагруженности их дисков.** – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.02 – автомобили и тракторы. – Национальный университет «Львівська політехніка», Министерства образования и науки Украины, Львов, 2019.

Проанализированы конструкции, режимы работы и оценена энергонагруженность пар трения дисково-колодочных тормозов транспортных средств. Уделено внимание работе вентилируемых тормозных дисков, на поясах трения которых выполнены отверстия и несквозные канавки, расположенные под углом и веерно. Показано влияние энергонагруженности дисков на их напряженно-деформированное состояние, способствующее возникновению микротрещин на поясах трения. Рассмотрены пути снижения энергонагруженности пар трения тормоза. Сформулированы задачи исследований. Предложен температурный метод оценки теплового баланса вентилируемых дисков путем теплоизоляции их поверхностей в лабораторных и эксплуатационных условиях при различных уровнях энергонагруженности пар трения тормоза. Рассмотрен метод оценки эффективности снижения энергонагруженности вентилируемых тормозных дисков с элементами охлаждения, базирующийся на взаимосвязи конструктивных параметров, напряженно-деформированного состояния и регламентируемых эксплуатационных параметров пар трения тормозов. Определены составляющие (механическая, электрическая и тепловая) мощности трения для оценки ресурса накладок дисково-колодочного тормоза грузового транспортного средства.

Ключевые слова: методы оценки теплового баланса и эффективности охлаждения, тепловая модель, вентилируемый дисковый тормозной механизм, пояс трения, отверстия и несквозные канавки, транспортное средство, Правила 13 ЕЭК ООН, испытания I, энергонагруженность, энергоёмкость, температурный режим.

SUMMARY

Vytvytskyi V.S. Increasing the efficiency of friction pairs of ventilated disk-block brakes of cars, taking into account energy load. - On the rights of manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.22.02 – cars and tractors. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

Disk brake mechanisms are considered in the work, namely: structure, operating modes and design features of brake discs; energyloading of spots of

contacts of micropoints of friction pairs; influence of energyloading of friction units of the brakes on their wear and friction properties. The ways of increasing the efficiency of friction units by improving design calculations and constructive modernization of their parts and redistribution of heat flows in the brake disk have been found. The ventilated brake of truck MAN TGA 26.430 was taken as a dynamic model for the disc brake.

Theoretical researches of the energyloading of friction pairs of the brake with ventilated discs with cooling elements were presented. An evaluation of the stress state of various types of ventilated discs with permissible operating parameters was performed by using the finite element method taking into account the design parameters of its elements and masses. The areas of maximum deformations and maximum stresses on the disc's friction belt have been established. The reduction of energyloading of friction pairs due to the implementation of grooves and openings located at an angle and fan on the surfaces of the friction zones of ventilated discs has been considered. The energy balance of air flows washed out the external and internal surfaces of the ventilated brake disc has been estimated.

The energyloading of the metal-polymer friction pairs of ventilated disc brakes has been experimentally investigated. The research was carried out in laboratory and operating conditions by comparing the efficiency of cooling of the series and with the elements of cooling of the ventilated brake discs taking into account the basic operating parameters of the brake friction pairs. The method of estimating the thermal balance of solid discs with a central hole and ventilated discs has been proposed. The method of experimental research has been presented and the means of its realization have been substantiated. The mechanism of origin and development of microcracks on the surfaces of friction belts with grooves and openings in ventilated discs with the consideration of residual stresses has been disclosed.

Methods and tools are considered, namely: estimation of the thermal balance of ventilated discs at the thermal insulation of their surfaces in laboratory and operating conditions with different levels of energyloading; increase of efficiency of ventilated disc brakes with elements of cooling. The method of evaluation of the efficiency of the ventilated brake discs of a truck MAN and the multilayer thermal model of friction pairs with different types of discs have been presented.

The intensity of the heat transfer through a solid and ventilated brake disc was estimated. The influence of the location of friction pads on the friction belt of the solid disc on its energyloading has been illustrated. The estimation of wear of pads of different types of brake discs for all categories of vehicles has been given, taking into account the power of friction of the brake. The influence of wear on the efficiency of electric thermal mechanical friction has been shown. The system and method of reducing the energyloading of friction pairs of disc brakes with semiconductor elements has been proposed.

Keywords: evaluation methods: heat balance, cooling efficiency, thermal model, self-ventilated disc brake mechanism, friction belt, holes and inconsistent grooves, motor vehicle, UNECE Regulation 13, tests I, energyloading, energyintensity, temperature regime.

Підписано до друку 26.02.2019 р. Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк різнографічний. Гарнітура Times New Roman. Авт. арк. 0, 9. Наклад 100.

Видавець та виготівник «Симфонія форте»

76019, м. Івано-Франківськ, вул. Крайківського, 2, тел. (0342) 77-98-92

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців
та виготівників видавничої продукції: серія ДК № 3312 від 12.11. 2008 р.