

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
Інститут транспорту та логістики
Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-
транспортних машин**

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

**до дипломної роботи
освітньо-кваліфікаційного рівня магістр**

напряму підготовки 070106 Автомобільний транспорт
спеціальності 8.07010601 Автомобілі та автомобільне господарство

на тему: «Удосконаленням гальмової системи автомобілів для
підвищення ефективності гальмування»

Виконала: студент групи АТ-16дм
Фісенко В.В.

.....
(підпис)

Керівник: доц. Полупан Є.В.

.....
(підпис)

Завідувач кафедри: проф. Горбунов М.І.

.....
(підпис)

Рецензент:

.....
(підпис)

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ГАЛЬМОВИХ ПРИСТРОЇВ.....	12
1.1. Умови роботи гальм при повторно-короткочасному режимі навантаження.....	12
1.2. Основні напрямки розвитку гальмівних пристроїв.....	13
1.3. Вплив температури, що треться на працездатність гальмівного пристрою.....	15
1.4. Аналіз методів теплового розрахунку фрикційних пар гальмівних пристроїв.....	18
1.5. Загальні відомості про фрикційних елементах гальмівних пристроїв.....	22
1.6. Підвищення довговічності фрикційних елементів гальмівних пристроїв.....	32
1.7. Загальна аналітичний опис нестационарних процесів нагрівання та охолодження твердих тіл	35
ВИСНОВКИ ПО ПЕРШОМУ РОЗДІЛУ	44
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ТРИВИМІРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ФРИКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ГАЛЬМІВНОГО ПРИСТРОЇ, ЯКИЙ ПРАЦЮЄ У ПОВТОРНО-КОРОТКОЧАСНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ.....	46
2.1. Аналіз силової навантаженості гальмівних пристроїв.....	46
2.2 . Дослідження теплового стану роботи гальмівних пристроїв.....	47
2.2.1. Аналіз режимів роботи і енергонавантаженості гальмівних пристроїв.....	47

2.2.2. Дослідження процесів теплообміну, що протікають при повторно-короткочасному режимі роботи гальмівного пристрою.....	48
2.2.3. Створення тривимірної розрахункової моделі температурного стану фрикційного матеріалу гальмівного пристрою, що працює в повторно-короткочасному режимі.....	50
ВИСНОВКИ ПО ДРУГОМУ РОЗДІЛУ.....	64
РОЗДІЛ 3. НОВІ ФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЮ.....	65
3.1. Методи ущільнення пористих середовищ піроуглеродом	67
3.1.1. Термоградієнтні газофазні установки.....	68
3.1.2. Теоретична модель термоградієнтних газофазних методів зв'язування піровуглецем порошкових і волоконних наповнювачів.....	70
3.2. Розробка і виготовлення нових композиційних матеріалів на основі вуглець-вуглецю для фрикційних накладок гальмівних пристроїв	74
3.3. Розробка методів поліпшення триботехнічних властивостей нових фрикційних матеріалів	80
ВИСНОВКИ ПО ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛУ.....	88
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ ФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ	89
4.1. Загальні положення.....	89
4.2. Об'єкти випробування	90
4.3. Експериментальна установка і проведення випробувань.....	90
4.4. Вимірювальне обладнання та апаратура	92

4.4.1. Вимірювальний модуль з цифровим збором та обробкою даних	96
4.4.2. Програмне середовище для управління вимірами на діагностичному стенді.....	98
4.5. Оцінка похибок вимірювальних систем	100
4.6. Дослідження впливу різних чинників, що збільшують теплообмін, на тепловий режим роботи колодкового гальма	103
4.6.1. Температурний режим роботи гальмівного пристрою	103
4.6.2. Вплив матеріалу фрикційних пар тертя на тепловий режим роботи гальмівного пристрою і зносостійкість пар тертя	107
4.7. Дослідження впливу температури поверхонь тертя на зміну коефіцієнта тертя і гальмівного моменту.....	111
ВИСНОВКИ ПО ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛУ	118
ВИСНОВКИ.....	119
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	121

ВСТУП

Однією з найважливіших завдань промисловості є підвищення економічності виробництва, якості продукції і, як наслідок, технічного рівня технологічного обладнання всіх видів виробництва. Успішне вирішення цього завдання залежить від розвитку нової техніки, а також від розробки, впровадження та освоєння в стислі терміни нових конструкцій промислового обладнання і транспортних засобів.

Підвищення ефективності і надійності вузлів і деталей автомобілів, спрямоване на інтенсифікацію їх продуктивності, є однією з основних задач машинобудування. Збільшення продуктивності механізмів і машин при експлуатації призводить до того, що їх вузли і деталі неминуче піддаються впливу значних навантажень і енергій. При цьому, погашення останніх в свою чергу призводить до розсіювання механічної енергії в теплову в малих обсягах вузла тертя, що неминуче веде до нагрівання його пар тертя. Тому до одним з відповідальних і найбільш навантажених вузлів автомобілів відносяться гальмівні пристрої, що забезпечують безпеку в експлуатації і в значній мірі впливають на рівень надійності. Циклічне підвищення температури пар тертя при роботі гальма викликає незворотні зміни мікроструктури пар тертя, що сприяють утворення тріщин, крім того, виділення теплоти в зоні тертя гальмівного вузла сприяє розм'якшенню фрикційних матеріалів, наслідком чого є різке падіння коефіцієнта тертя і надійності гальма.

Тенденція до зменшення конструктивних обсягів гальмівних механізмів, що отримала велике поширення в останні роки, призводить до різкого зниження інтенсивності охолодження їх фрикційних вузлів. Все це призводить до нерівномірного зносу пар тертя, значного падіння коефіцієнта тертя, підвищених температур гальм автомобілів, а в підсумку, до їх нестабільної роботи.

Актуальність теми

З аналізу практики експлуатації автомобілів можна зробити висновок, що одним з найбільш вразливих місць серед механізмів є гальмівні пристрої. Робота гальмівних пристроїв відрізняється надзвичайною різноманітністю умов і факторів, що впливають на знос і довговічність їх фрикційних елементів.

Велике число включень, значні робочі швидкості механізмів, ударні навантаження, присутність абразивних частинок, високі робочі температури в зоні тертя і інші фактори призводять до нестабільної роботи основних робочих органів гальм, фрикційних пар, а також до швидкого їх зносу.

На підставі фундаментальних досліджень гальмівних пристроїв механізмів і машин, проведених багатьма вченими, можна зробити висновок, що рішення проблеми створення надійної фрикційної пари сучасних високонавантажених гальм механізмів і машин можливо тільки при застосуванні більш теплостійких матеріалів і при одночасній розробці конструкцій гальм, що забезпечують освіту найменших температур нагрівання поверхонь тертя.

До теперішнього часу не досягнуто бажаного практичні результати щодо поліпшення стану стабільності роботи і довговічності фрикційних елементів гальмівних пристроїв шляхом створення нових високоефективних фрикційних матеріалів.

Таким чином, актуальними є завдання розробки нових фрикційних матеріалів, що забезпечують стабільні показники роботи гальмівного пристрою і досить невисокі температури, що труться. Використання нових фрикційних матеріалів створює реальні можливості підвищення ефективності надійності і безпеки роботи і відкриває резерви підвищення енергоемності гальмівних пристроїв автомобілів.

Цілі і завдання дослідження

Мета роботи - підвищення ефективності гальмування автомобілів застосуванням нових фрикційних матеріалів на основі вуглець-вуглецю з піровуглецевою матрицею.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Провести аналіз і оцінку працездатності гальмівних пристроїв автомобілів і виявити шляхи підвищення ефективності їх роботи.
2. Провести аналіз існуючих математичних моделей розрахунку теплового стану фрикційних поверхонь гальмівних пристроїв.
3. Дослідити вплив теплової навантаженості фрикційного сполучення гальмівних пристрою на зміну коефіцієнта тертя.
4. Розробити математичну модель об'ємного температурного стану фрикційного матеріалу гальмівного пристрою, що працює в повторно короткочасному режимі роботи.
5. Визначити раціональні теплофізичні показники розробляються фрикційних матеріалів на основі наведеної математичної моделі.
6. Розробити і виготовити фрикційний матеріал на основі вуглець-вуглецю.
7. Провести експериментальні дослідження з метою перевірки адекватності моделі і визначення закономірностей зміни коефіцієнта тертя пропонує фрикційних матеріалів.
8. Повісті порівняльний аналіз фрикційних матеріалів, що застосовуються в сучасних гальмівних пристроях автомобілів, в тому числі і пропонує фрикційних матеріалів на основі вуглецевих волокон з піровуглецевою матрицею.
9. Провести натурні експериментальні дослідження запропонує фрикційних матеріалів з поліпшеними триботехнічними показниками.

Об'єкт дослідження. Процеси теплообміну фрикційних поверхонь гальмівних пристроїв автомобілів, що виникають роботі гальма.

Предмет дослідження. Взаємозв'язок теплового стану вуглець-вуглецевої фрикційної накладки гальмівного пристрою автомобілів з реалізованим коефіцієнтом тертя.

Методи дослідження. У теоретичній частині використовуються методи математичної фізики, аналітичного рішення диференціальних рівнянь, метод колокацій. В експериментальній частині використовуються методи вимірювання теплофізичних і триботехнічних параметрів гальмівного пристрою шляхом використання вимірювального модуля з цифровим зніманням та обробкою даних на базі ПЕОМ.

Наукова новизна отриманих результатів

- Отримано аналітичні залежності для моделювання об'ємного температурного стану фрикційної накладки, за допомогою яких вперше встановлено характер зміни температурних полів за обсягом фрикційного матеріалу при повторно-короткочасному режимі роботи гальмівних пристроїв автомобілів з урахуванням втрат теплоти з бічних поверхонь фрикційної накладки і відмінності теплофізичних параметрів фрикційного матеріалу з різних напрямків.

- Уточнена аналітична залежність розрахунку теплового стану фрикційного матеріалу при гальмуванні шляхом введення додаткового числа показників роботи гальма, а саме щільності теплового потоку при дійсному розподілі питомої тиску в зоні контакту поверхонь і вектору приросту температури вздовж поверхонь тертя, що дозволяє з більшою точністю оцінювати теплову навантаженість гальмівної накладки при різних умовах експлуатації гальм.

- На основі розробленої математичної моделі об'ємного температурного стану поверхонь тертя виявлені раціональні теплофізичні характеристики нового фрикційного матеріалу, які дозволили знизити теплову навантаженість гальмівних пристроїв в середньому на 15%.

- Вперше встановлено вплив швидкості відносного ковзання третьових поверхонь, температури і сили притиснення фрикційної накладки гальмівних пристроїв автомобілів на зміну коефіцієнта тертя вуглець-вуглецевого фрикційного матеріалу .

Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблено математичну модель і запропонована методика розрахунку об'ємного температурного стану фрикційного матеріалу гальмівних пристроїв автомобілів, що працюють в повторно-короткочасному режимі, що дозволяє оцінити теплову навантаженість фрикційного вузла гальмівного пристрою.

2. Розроблено фрикційний матеріал з поліпшеними триботехнічними показниками на основі вуглець-вуглець.

3. Виконано порівняльний аналіз фрикційних метеріалів, застосовуваних у сучасних гальмівних пристроях автомобілів, в тому числі і розроблених фрикційних матеріалів на основі вуглець-вуглецю, що дозволяє рекомендувати запропоновані матеріали до застосування в високонавантажених гальмівних пристроях.

4. Розроблено доступна технологічна схема отримання пропонованих фрикційних матеріалів на основі вуглець-вуглець з піровуглецевою матрицею.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ГАЛЬМОВИХ ПРИСТРОЇВ

1.1. Умови роботи гальм при повторно-короткочасному режимі навантаження

Автомобільний транспорт є основним засобом транспортування вантажів і пасажирів. Цим пояснюється широта і різноманітність областей застосування і умов експлуатації гальмівних пристроїв.

Розрізняють три режими роботи гальмівних пристроїв [1, 2]:

1. Короткочасний режим - температура поверхні тертя гальма не встигає досягти величин, що допускаються для даного типу фрикційного матеріалу, а внаслідок великих пауз між гальмуваннями температура на поверхні тертя знижується до температури навколишнього середовища.
2. тривалий режим - період гальмування настільки великий, що температура на поверхні тертя досягає деякого значення сталої температури і тривалий час утримується на цьому рівні.
3. Повторно-короткочасний режим - періодично повторюються процеси гальмування, а інтервал між гальмуваннями відносно малий і температура на поверхні тертя зростає від гальмування до гальмування і може досягти величини сталої температури.

у даній роботі розглядаються гальмівні пристрої, що експлуатуються в повторно-короткочасному режимі роботи.

Нагрівання поверхонь тертя гальмівних пристроїв автомобілів в процесі роботи визначається не тільки роботою гальмування і конструкцією гальмівного вузла, але і кількістю гальмувань на годину, швидкістю почала контактування елементів фрикційного вузла, конструктивними особливостями механізму і параметрами зовнішнього середовища.

1.2. Основні напрямки розвитку гальмівних пристроїв

Підвищення надійності, довговічності і ефективності використання гальмівних пристроїв, транспортних проходить за такими основними напрямками: конструктивне удосконалення механічної частини й приводу існуючих гальм, створення нових конструктивних різновидів, розробка і застосування нових матеріалів з підвищеними фрикційними властивостями.

В даний час в транспортних машинах переважно поширені колодкові гальма з зовнішнім або внутрішнім розташуванням гальмівних колодок щодо поверхні тертя контртіла, з шарнірним або жорстким кріпленням колодок до гальмівних важелів.

Проте, як показала практика, колодкові гальма в даний час вже не в повній мірі задовольняють умовам надійності і ефективності роботи .

На кафедрі ПТМ МВТУ ім. Н. Е. Баумана створений ряд оригінальних конструкцій дисково-колодкових гальм. Габарити гальма в середньому на 25%, а вага - на 20% нижче, ніж у колодкового рівній потужності.

Основною перевагою дисково-колодкових гальм [7, 8, 9] є їх підвищена енергоємність, в 2-4 рази перевищує енергоємність колодкового гальма. Висока енергоємність дисково-колодкового гальма обумовлена кращими умовами тепловіддачі в навколишнє середовище, т. К. Коефіцієнт взаємного перекриття фрикційної пари становить 0,1-0,2, також дисково-колодкового гальма має компактну малогабаритну конструкцію.

Одним з основних напрямів удосконалення гальмівних пристроїв є розробка і застосування нових матеріалів з підвищеними фрикційними властивостями.

Фрикційний матеріал повинен забезпечувати необхідну величину і стабільність коефіцієнта тертя, добре прірабативала до контртіло, бути

корозійно-стійким, негорючим, мати достатню механічну міцність, зносостійкість, теплостійкість, мати відповідні теплофізичні властивості і т. д.

На (рис. 1.1) показані основні шляхи підвищення надійності та ефективності роботи гальмівних пристроїв. Зі схеми видно, що підвищення надійності гальма досяжно шляхом розробки і впровадження нових сучасних фрикційних матеріалів.

Проблема розробки нових фрикційних матеріалів стає все більш актуальною в зв'язку з дедалі більшим впровадженням дисково-колодкових гальм, що володіють більш високими температурами поверхонь тертя і теплового балансу. Підвищена температура поверхонь тертя дисково-колодкових гальм пояснюється їх зменшеними обсягами і підвищеними



Рис.1.1. Шляхи підвищення надійності та ефективності роботи гальмівних пристроїв

питомими тисками в порівнянні з Двоколодкове і барабанними гальмівними пристроями, які отримали найбільше поширення в даний час.

1.3. Вплив температури, що труться на працездатність гальмівного пристрою

Одним з основних явищ, які супроводжують фрикційне взаємодія в гальмах, є нагрів пар тертя. Практично вся механічна енергія, що поглинається гальмом, перетворюється в тепло. Температура, що розвивається на поверхні тертя, є комплексною характеристикою енергонагруженості гальма [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18], більш загальної порівняно з окремо взятими параметрами режиму роботи, такими як швидкість ковзання, тиск, коефіцієнт тертя.

Підвищення температури викликає такі зміни в елементах фрикційної пари, що впливають на процес тертя:

- зміна механічних властивостей пари тертя;
- зміна швидкості протікання дифузійних і хімічних явищ;
- фазові і структурні зміни;
- виникнення внутрішніх напружень і деформацій.

Комплекс цих явищ в свою чергу впливає на характер фрикційного взаємодії, тому створення нових гальм повинно супроводжуватися дослідженням характеру їх теплового навантаження, а тепловий розрахунок повинен бути обов'язковою частиною проектного розрахунку будь-якого навантаженого гальма.

Надійність роботи гальмівного пристрою в основному визначається температурним полем фрикційної пари [19, 20, 21, 29]. Це пов'язано з тим, що фрикційно-ізносна характеристика фрикційних матеріалів значною мірою залежать від температури. У більшості фрикційних матеріалів зі збільшенням температури коефіцієнт тертя зменшується, а знос зростає [30]. Характер зміни фрикційно-ізоносних властивостей різних матеріалів істотно залежить

від граничного значення температури, при якому відбувається різке збільшення інтенсивності зносу і зміна коефіцієнта тертя. Наявність таких граничних температур наочно зображено на графіках фрикційної теплостійкості найбільш поширених в машинобудуванні фрикційних матеріалів (рис. 1.2, 1.3 і 1.4). У зв'язку з цим температуру нагрівання використовують як критерій навантаженості гальма. Причому для гальмівних пристроїв найдоцільніше в якості такого критерію розглядати температуру поверхні тертя [15, 29].

Погіршення працездатності гальм відбувається також у зв'язку з виникненням температурних деформацій елементів фрикційної пари тертя. Величина деформацій визначається градієнтом температур, а також конструкцією елементів фрикційної пари. Так, при високих температурах, внаслідок нерівномірного нагрівання і змінної товщини контртіла, в ньому

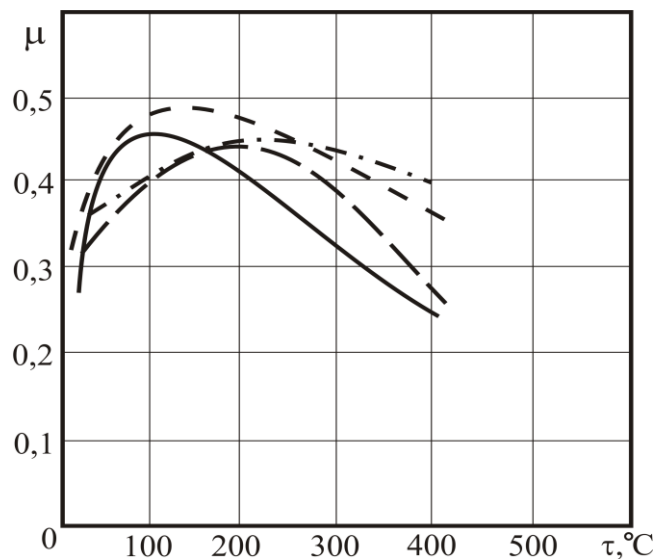


Рис. 1.2. Залежності коефіцієнта тертя фрикційних пар від температури при терті в парі зі сталлю 45 [22].

— — ЭМ-2; - - - - 6 КХ-; - · - · - - АГ-1 Б; - - - - 6 КФ-58.

можуть виникати значні теплові напруги і деформації, що призводять до появи пригорань і локальних руйнувань на поверхні тертя. Крім того, теплові деформації значно впливають на процес тертя, внаслідок того, що вони призводять до зменшення контурної площі торкання елементів пари тертя, при цьому теплові навантаження ще більше зростають і викликають збільшення напруг і деформацій, що призводить до підвищеного зносу.

Нагрівання фрикційної пари вимагає збільшення габаритів приводу гальмівного пристрою і його потужності, так як в результаті температурного розширення елементів фрикційної пари доводиться збільшувати величину необхідного відходу фрикційного матеріалу від металевого контртіла.

в окремих випадках нагрівання гальма може призвести до інших небажаних наслідків, таких як нагрівання сполучених з гальмом деталей (шин, робочої рідини, ущільнень, підшипників коромисла і т. д.), виділення шкідливих газів та інше.

Недооцінка теплових явищ в гальмах сучасних машин може привести до ненормальною роботі гальма і навіть до аварії, особливо в зв'язку з безперервним збільшенням швидкостей руху, вантажопідйомності і інтенсивності роботи.

1.4. Аналіз методів теплового розрахунку фрикційних пар гальмівних пристроїв

Найбільш поширені методики теплового розрахунку наведені на (рис. 1.5). Увага процесу повторно короткочасного гальмування було приділено М. П. Александровим і В. Г. Іноземцева, які вивели залежності температури на будь-якій відстані від поверхні тертя.

Однак ці функції не в повній мірі відображають всю дійсність теплових процесів, оскільки вони не враховують: фізику що протікають теплових процесів, що виникають при повторно-короткочасному режимі

Автор	Одноразовое торможение	Повторно-кратковременное торможение
М. П. Александров	$\theta_{cp}(\tau) = \frac{\alpha_{T, \Pi i} \cdot \Psi_{Vi} \cdot W_{T, \Pi} \cdot b_i}{\lambda_i \cdot t_T \cdot A_{a1}} \times$ $\times \left(\frac{1}{3} \cdot \tau_N + F_{oi} \cdot \tau_w - \frac{2 \cdot \tau_N}{\pi^2} \times \right.$ $\times \sum_{n_i=1}^{\infty} \frac{1}{n_i^2} \cdot \exp(-\pi^2 \cdot n_i^2 \cdot F_{oi} \cdot \tau);$	$\theta_{cp}(\xi, \tau) = \frac{\alpha_{T, \Pi i} \cdot \Psi_{Vi} \cdot W_{T, \Pi} \cdot b_i}{\lambda_i \cdot t_T \cdot A_{a1}} \times$ $\times \left(-\xi_i \cdot \left(1 - \frac{\xi_i}{2}\right) \cdot \tau_N + \right.$ $+ \frac{1}{3} \cdot \tau_N + F_{oi} \cdot \tau_w -$ $- \frac{2 \cdot \tau_N}{\pi^2} \cdot \sum_{n_i=1}^{\infty} \frac{1}{n_i^2} \cdot \exp(-\pi^2 \times$ $\times n_i^2 \cdot F_{oi} \cdot \tau) \times$ $\times \cos \pi \cdot n_i \cdot \xi_i) +$ $+ \frac{\alpha_{T, \Pi i} \cdot W_{T, \Pi} \cdot \Psi_{Vi}}{m_i \cdot c_i} \times$ $\times \left(\frac{\exp(-k_i \cdot t_{oxz})}{1 - \exp(-k_i \cdot t_{oxz})} - \right.$ $\left. - \frac{\exp(-n_2 \cdot k_i \cdot t_{oxz})}{1 - \exp(-k_i \cdot t_{oxz})} \right)$
В. Г. Иноземцев	$\Delta \tau_{HK} = \frac{q_a}{\xi \cdot \alpha_0} \cdot \left(1 - e^{-0.667 \cdot \frac{c \cdot \alpha_0}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot c}} \cdot \sqrt{f}}\right);$	$\Delta \tau_{max} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{\alpha \cdot F_{\Pi}}{Gc} (t_T + t_{OI})}} \cdot \left(\frac{q_a}{f} \cdot \left(1 + \frac{G \cdot c \cdot v}{v_H \cdot \alpha \cdot F_{\Pi}}\right) \times \right.$
В. А. Ибрагимов	$T(t_0; r; z) = T_0 + T_0 \times$ $\times B(\rho) / \rho = \frac{r}{R_1} \times$ $\times (k_1 \cdot t + k_2 \cdot t^2) \cdot \left(\frac{1}{\pi} + \right.$ $+ \frac{2}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{\infty} \tilde{Q}(\tau; p) / \tau_{=1} \times$ $\times \cos \frac{p}{2} \cdot \pi);$	$\times \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot F_{\Pi} \cdot t_T}{Gc}}\right) \cdot \frac{v \cdot t_T}{v_H} + \frac{q_a}{f} \cdot \left(1 + \frac{G \cdot c \cdot v_{OI}}{v_{OI} \cdot \alpha \cdot F_{\Pi}}\right) \times$ $\times \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot F_{\Pi} \cdot t_{OI}}{Gc}}\right) \cdot \frac{v_{OI} \cdot t_{OI}}{v_{OI}} \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot F_{\Pi} \cdot t_T}{Gc}} \right)$
Т. Г. Фараджев	$\Delta T_H(t) = \frac{Q}{k \cdot B_i + \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot t}}}$	
Т. М. Аскеров	$v_{n\Delta\tau_{max}} = \frac{\alpha \cdot \Delta x \cdot v_r + \lambda \cdot v_{n\Delta\tau(m-1)} \cdot \Delta x}{\lambda + \alpha \cdot \Delta x}$	
М. Г. Чиковани	$T = T_{cp} + T_{об} + T_{ед} + T_{всн}$	

Рис.1.5. Методики теплового розрахунку гальмівних пристроїв

гальмування, втрати теплоти з бічних поверхонь фрикційних пар, реальний характер розподілу питомого тиску по довжині накладки, вектор приросту

температури уздовж поверхні тертя, можливу анизотропність фрикційного матеріалу, режим роботи гальмівного пристрою.

Передача тепла від нагрітого гальмівного вузла до навколишнього середовища (повітря) відбувається різними способами: теплопровідністю (кондукцією), конвекцією і випромінюванням (радіацією).

Теплопровідність являє собою передачу тепла від одного тіла до іншого під впливом перепаду температур без помітного переміщення частинок.

Конвекція є передачу тепла шляхом перемішування одних порцій повітря з іншими. Якщо це перемішування відбувається природним шляхом, то конвекція називається природною. При механічній дії на перемішування відбувається вимушена конвекція.

Випромінюванням (радіація) - передача теплової енергії у вигляді теплових променів.

Зрозуміло, що теплопередача в кожен період часу є процесом комбінованим, тобто тепло передається одночасно різними способами.

Процес теплообміну між рідиною (газом) і твердим тілом охоплюється поняттями конвективного теплообміну. Цей процес здійснюється одночасним дією теплопровідності і конвекції. Їх сукупна дія називається конвективним теплообміном, тепловіддачею зіткненням або просто тепловіддачею.

Стосовно роботи більшості нормально замкнутих гальмівних пристроїв відомо, що в загальмованому стані тепловіддача гальмівного пристрою в навколишнє середовище відбувається в основному природною конвекцією і випромінюванням, а в розгальмування стані - вимушеної конвекцією і випромінюванням.

В існуючих методиках розрахунку внаслідок відносно невисоких максимальних температур нагрівання окремих елементів гальмівних пристроїв $t_{уст}^{max}$ ($\approx 300-500$ °C) тепловіддачею випромінюванням нехтують. Тоді всі питання, пов'язані з теплообміном гальмівних пристроїв, зводяться до

вивчення природної і вимушеної конвективного тепловіддачі гальм в процесі їх роботи. Однак у зв'язку з поступовим підвищенням енергоємності гальмівних пристроїв такі зневаги можуть привести до невірних результатів.

Як вже говорилося вище, основним чинником, що викликає конвективний теплообмін, є різниця температур між дотичними тілами.

В оцінці процесів конвективного теплообміну вирішальне значення набуває вивчення температурних полів дотичних тіл, що беруть участь в конвективному теплообміні.

при самому загальному аналізі можливості збільшення тепловіддачі існуючих гальмівних пристроїв можна зробити висновок, що теплообмін через фрикційні елементи гальмівного пристрою може бути збільшений.

Наприклад, встановлено, що через гальмівні колодки відводиться дуже мала частина загальної кількості тепла, що виділяється при гальмуванні (3 - 4%). Останнє пояснюється, як правило, теплоізоляційними властивостями фрикційної обкладки [22, 23].

З робіт з теорії теплопередачі [24, 25, 26, 27, 28] відомо, що потік тепла через стінку одиничної площі прямо пропорційний коефіцієнту теплопровідності і обернено пропорційний товщині стінки .

Розглядаючи сучасні конструкції гальмівних колодок колодкових нормально замкнутих гальмівних пристроїв, можна зробити висновок, що тепловідвід через них може бути збільшений. По-перше, за рахунок застосування фрикційного матеріалу більш теплопровідного в порівнянні з матеріалами, які отримали широке поширення в даний час; по-друге, за рахунок зменшення його товщини при одночасному збільшенні площі теплообміну гальмівних колодок.

Вищевикладені обставини призводять до значного підвищення і збереження високих робочих температур в зоні контакту фрикційних пар і надалі до швидкого їх зносу.

Більш глибокий аналіз можливості збільшення теплообміну колодкових гальм дозволяє намітити шляхи для прийняття конкретних конструктивних рішень з метою удосконалення конструкцій серійно випускаються гальмівних пристроїв.

1.5. Загальні відомості про фрикційних елементах гальмівних пристроїв

та гальмові пристрої машин різних типів і режимів роботи різко відрізняються величиною поглиненої енергії і параметрами температурного поля фрикційного вузла.

Фрикційні вузли гальмівних пристроїв по навантаженості і величиною середньої об'ємної температури діляться [1] на три групи:

- перша - легкі умови роботи (короткочасна об'ємна температура до 200 °С, тривала - до 120 °С, тиск - до 0,8 мПа),
- друга - середні умови роботи (короткочасна об'ємна температури до 400 °С, тривала - до 250 °С, тиск - до 1,5 мПа), а
- третина - важкі умови роботи (короткочасна об'ємна температура до 600 °С, тривала - до 450 °С, тиск - до 6 мПа).

По величинам температури робочих поверхневих шарів фрикційних елементів гальмівні пристрої можна розділити на п'ять груп: з вельми легким режимом роботи - до 100 °с, з легким - до 250 °с, з середнім - до 600-700 °с, з важким - до 1000 °С, з надважких - більше 1000 °С. Наведену класифікацію доцільно застосовувати при підборі матеріалів фрикційних пар більшості існуючих гальмівних пристроїв.

Аналіз конструкцій гальмівних пристроїв різних типів [1, 7, 8, 9, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47], їх несправностей і відмов при експлуатації [2], а також основних вимог, що пред'являються до гальм, вказує на особливе значення фрикційних матеріалів в проблемі надійності і довговічності гальмівних пристроїв. Так, багато вимог, що

пред'являються до гальм, відносяться по суті до якості і властивостями фрикційних матеріалів.

В процесі гальмування енергія механізму перетворюється на фрикційної контакті пари тертя в тепло. Ряд авторів вказують [16, 23], що в тепло в кінцевому результаті переходить практично вся робота сил тертя. Звідси випливає, що основною вимогою, що пред'являються до фрикційним матеріалами, є збереження фрикційно-ізносних характеристик у всьому діапазоні зміни теплового режиму гальма. Іншими словами, властивості матеріалу в допустимому для нього діапазоні температур не повинні різко змінюватися і, таким чином, не повинні впливати на робочі характеристики гальма.

До фрикційним матеріалів висувають ряд вимог. Так, ці матеріали повинні мати малий модуль пружності, при якому температурні напруги, викликані градієнтом температур, будуть мінімальними. Висока теплопровідність необхідна для запобігання в тонкому поверхневому шарі виникнення температури плавлення матеріалу, щоб виключити можливість наволаківання металу на фрикційний матеріал і подальше схоплювання. Тому фрикційний матеріал повинен володіти також найвищою точкою плавлення або розм'якшення. Висока питома теплоємність дозволяє матеріалу поглинати велику кількість тепла при мінімальній підвищенні температури, а велика об'ємна теплоємність дозволяє знизити габарити контртіла. Низький коефіцієнт теплового розширення фрикційного матеріалу зменшує теплові напруги між внутрішньою і зовнішньою поверхнями елемента пари тертя.

До фрикційним матеріалів висувають вимоги швидкої пріпрацьованності, корозійної стійкості, вогнебезпечності, водомаслостійкості. Крім того, фрикційні матеріали повинні допускати механічну обробку. Висока механічна міцність, стійкість проти теплової втоми, відсутність тенденцій до пошкодження поверхні тертя сполученої деталі, забезпечення плавності

гальмування, стабільність і рівномірність зміни хімічного і фазового складу, структури і т. Д. - Необхідні властивості працездатних фрикційних матеріалів.

В даний час випускається велика кількість різноманітних фрикційних матеріалів, складних за своїм складом, з різноманітними фрикційними характеристиками та різноманітними фрикційними характеристиками та призначених до різноманітних умов використання.

Більшість з випускаються нашою промисловістю фрикційних матеріалів має в своєму складі азбест, що володіє високими фрикційними характеристиками і добре чинить опір зношування. Істотним недоліком цих матеріалів є порівняно низька температура розкладання їх пов'язує, при якій вони втрачають свої фрикційні властивості. Асбофрикційні матеріали за способом виготовлення поділяються на ткані, формовані, пресовані і вальцьовані [1, 29].

У якості органічних сполучних для асбофрикційні матеріалів застосовуються природні і синтетичні каучуки, смоли, різного виду пеки, бітумінозні речовини і т. П. Фрикційні на каучуковому сполучному [1] мають відносно високий і стійкий коефіцієнт тертя при нагріванні до 250 °С, після чого каучук починає деструктувати, що призводить до зниження зносостійкості і міцності матеріалу. Для вулканізації в ці фрикційні матеріали додають сірку. Фрикційні матеріали на смоляному сполучному (фенол-крезол-формальдегідні смоли) мають більш високу зносостійкість, але дещо менше значення і стабільність коефіцієнта тертя (до 180 °С), ніж матеріали на каучуковому сполучному. Однак при температурі вище 400 °С коефіцієнт тертя їх більш стабільний. Фрикційні матеріали на комбінованому сполучному (суміш каучуків і смол) володіють якостями, властивими матеріалами на каучуковому і смоляному сполучному. Збільшення смоли веде до збільшення твердості, термостійкості і зносостійкості матеріалу, а збільшення каучуку знижує твердість, але зате збільшує величину і стабільність коефіцієнта тертя.

Застосування комбінованого сполучного дає можливість створювати теплостійкі фрикційні матеріали з високими фрикційними характеристиками.

Великий вплив на фізико-механічні та фрикційні характеристики надають наповнювачі, які додають до складу фрикційних матеріалів. Як наповнювачі найчастіше використовують оксиди і солі металів, сплави металів у вигляді стружки або нарубленого дроту, металевої вати, порошоків, а також графіт. Додавання до складу фрикційних матеріалів різних наповнювачів по-різному впливає на умови роботи матеріалу і на його фрикційні характеристики. Наприклад, введення металевої стружки обумовлює заклинювання продуктів зносу, отже, збільшує коефіцієнт тертя, а введення графіту зменшує задираки на поверхні тертя.

На основі результатів дослідження фрикційних матеріалів в лабораторних і експлуатаційних умовах [45] було встановлено, що з усього різноманіття фрикційних матеріалів на азбестового основі для гальм працюють в повторно-короткочасному режимі, найбільш відповідним матеріалом виявилася вальцована стрічка ЕМ-2 ГОСТ 15960-70. Склад композиції ЕМ-2 наступний [1, 29]: коротковолокнистий азбест - 28%, наповнювачі - залізний сурик і окис цинку - 50%, сполучна - каучук СКБ - 20%, пом'якшувач - ПОЛІД - 2%. При різних умовах роботи вальцована стрічка бкВ-10 має стабільний і високий коефіцієнт тертя, величина якого досягає 0,3-0,45. Її характеристики не залежать від випадкового потрапляння мастила, так як вона має незначну здатність вбирати воду і мінеральні масла.

У зв'язку з інтенсифікацією режимів роботи обладнання гальмівні накладки, виготовлені з композиції ЕМ-2, за своєю теплостійкості і особливо зносостійкості не задовольняють збільшеним вимогам. У зв'язку з цим був розроблений ряд нових асбофрикційних композицій, зокрема, матеріали шифру 8-45-62, 8-229-63, 43-2-66, 242-9-71 і т. Д. [1]. Випробування матеріалу 5-229-63 в лабораторних і виробничих умовах показали його підвищену зносо- і термостійкість і високі фрикційні якості.

Позитивними властивостями асбофрикційних матеріалів типу пластмас є: забезпечення позитивного градієнта механічних властивостей по глибині матеріалу за рахунок поганої теплопровідності, мала схильність до захоплювання з металами, задовільна робота в умовах багаторазового передеформування. Однак в важко навантажених гальмах ряду машин за своїми властивостями пластмаси поступаються металокерамічним матеріалами [1,11].

Металопластмасові матеріали, з поєднанням металокераміки і пластмас дозволяють, використовуючи позитивні властивості кожного з них, отримувати фрикційні матеріали з хорошими експлуатаційними характеристиками. Отримання таких фрикційних матеріалів засноване на просочуванні смолами, наприклад, фенолформальдегідною смолою, пористих металокерамічних матеріалів, на основі заліза.

Фрикційні характеристики пари тертя гальм багато в чому залежать від якості матеріалу металевого елемента пари, що треться. Довільний поєднання фрикційного матеріалу з металевим елементом може привести до незадовільних результатів. Згідно [48, 49] для гальмівних контртіло знаходять застосування звичайні і леговані сталі 35Л, 55Л, 30ГЛ, 45, чавун марки не нижче СЧ25-48 і алюміній, армований карбідом кремнію SiC. Після механічної обробки поверхня тертя уміцнюють термічно ТВЧ до твердості 38-42 HRC на глибину 2-3 мм, а потім шліфують до чистоти 7.

Проте, як показав досвід експлуатації і проведені дослідження працездатності [48] нормально замкнених гальмівних пристроїв, контртіла, виготовлені зі сталі 55Л і загартовані ТВЧ до твердості 38-42 HRC, не витримують в напружених умовах експлуатації гарантійного терміну служби (18 місяців з дня введення в експлуатацію) і виходять з ладу передчасно. Цим, наприклад, і пояснюється застосування підприємствами різних матеріалів і різних методів зміцнення робочих поверхонь гальмівних контртіло.

В останні роки все інтенсивніше застосовуються дискові гальмівні

пристрої. У зв'язку з цим різні організації ведуть розробки нових композиційних фрикційних матеріалів, які задовольняли б сформованим умовам експлуатації автотранспорту [31].

Сучасні композиційні матеріали, або композити (V-BKS), що застосовуються в залізничному (ЖД) транспорті, являють собою поєднання сполучного (смоли або каучуку) з волокнами, а також з мінеральними і органічними наповнювачами різних видів і процентного вмісту (використання азбесту з 1989 р в європейських державах заборонених до застосування).

Порівняння властивостей матеріалу V-BKS та сірого чавуну показує:

- коефіцієнт тертя V-BKS значно стабільніше;
- знос композитів більш рівномірний, а його величина в 2-6 разів нижче;
- фрикційні властивості при наявності вологості такі ж, як і у чавуну.

властивості і галузі застосування різних фрикційних матеріалів наведені в табл. 1.4.

Колодкові гальма типу LL і К можуть застосовуватися в існуючих і нових вантажних вагонах. При цьому до фрикційному матеріалу пред'являються дуже високі вимоги, тому що гальма повинні розроблятися з урахуванням особливостей експлуатації на альпійських переходах. У табл. 1.5 наведені фрикційні матеріали, розроблені фірмою BECORIT спеціально для цих груп гальм.

Робоча група МСЗ підготувала технічні умови на застосування композиту V-BKS в міжнародному масштабі. Допуск до експлуатації колодок з цього матеріалу дозволяє виробникам рухомого складу відразу оснащувати їм вагони і рухомий склад інших видів для міжнародного сполучення. Залізниці німеччині (DBAG), федеральні залізниці Швейцарії (SBB) і національне товариство залізниць Франції (SNCF) мають намір до 2005 р обладнати весь експлуатований парк вантажних вагонів гальмівними колодками на базі V-BKS.

З підвищенням швидкості і маси поїздів прості і економічні колодкові

гальма вже не можуть забезпечувати необхідну ефективність гальмування, так як термічні навантаження на колеса зростають до неприпустимих значень. Тому в першу чергу в вагонах пасажирських міжміських високошвидкісних і приміських поїздів широко використовуються альтернативні дискові гальма.

На противагу колодкового гальма тут можна найкращим чином узгоджувати між собою компоненти пари тертя як конструктивно, так і за вибором матеріалів. В результаті виходить гальмівна система з низькими експлуатаційними витратами, що працює без різких поштовхів і сильного шуму при зупинці поїзда. При розробці накладок здійснений перехід на більш м'яку систему сполучного матеріалу і тим самим покращено тепловідвід від накладки за рахунок більш щільного прилягання її до диска.

Таблиця 1.4

Фрикційні матеріали гальмівних колодок ЖД транспорту

Тип колодки	Коефіцієнт тертя f	Область застосування (осьова навантаження)	Максимальна швидкість, км / год	Вимоги
LL	0,1-0,17 (дуже низький)	Область компетенції МСЗ (22,5 т.)	120	Безпека при великій вологості (величина f , як у чавуну), температурна стабільність при розсіюється до 45 кВт в протягом 34 хв і більше.
L	0,15-0,22 (низький)	Регіональні, частково міжнародні повідомлення (18 т.)	160	Максимальна температура 400 °С без зниження величини μ .
K	0,22-0,3 (високий)	Область компетенції МСЗ (22,5-25 т.)	100-120	Безпека при великій вологості, в тому числі при малому натисканні, температурна стабільність при розсіюється до 45 кВт протягом 34 хв і більше.
K, hoch	0,3-0,35 (дуже високий)	Чи не для альпійських переходів (25-30 т.)	100	застосування в одно-колодкових конструкціях типу Pusherbrake, в тому числі при великому натисканні.

Огляд гальмівних колодок компанії BECORIT

Тип колодки	Коефіцієнт тертя μ .	Марка	Область застосування	Проект або серійне виробництво
LL	0,1-0,17	L173-17	Вантажні вагони, заміна сірого чавуну	DBAG, NSB, SBB, K
SNCF	0,22-0,3	920-1	Новий рухомий склад	DBAG,
SNCF K, hoch	0,3 -0,35	541, K301	Потяги метрополітену, маневрові локомотиви	Сінгапур (міська залізниця)

Примітка: DBAG - залізні дороги Німеччини; NSB - залізні дороги Норвегії; SBB - Федеральні залізниці Швейцарії; SNCF - Національне товариство залізниць Франції.

Для компаній-виробників і споживачів накладок, принаймні для великих, було також вигідним обмеження їх номенклатури декількома типорозмірами. Завдяки тому, що допуск на застосування накладок видає МСЗ, можливо їх необмежене використання в поїздах міжнародного сполучення.

Вимоги до фрикційним матеріалами дискового гальма для залізничного транспорту коротко виглядають наступним чином:

- швидкість початку гальмування - до 300 км / год,
- коефіцієнт тертя - 0,32 -0,44;
- матеріал диска - чавун (сірий або з кулястим графітом), сталеве лиття;
- питомий тиск при натисканні - 0,2-1,5 мПа.

Постійне вдосконалення фрикційних матеріалів для гальм залізничного рухомого складу обумовлено зростанням вимог до них. Завдяки цьому з'явилися нові спеціальні матеріали, в тому числі і призначені для використання в особливих умовах.

Прикладом таких цілеспрямованих розробок можуть служити альтернативні фрикційні металокерамічні матеріали на основі заліза, бронзи або міді. У табл. 1.6 наведені властивості і області застосування різних накладок для дискових гальм.

Ефективність гальмування оцінюється за кількістю виділеної і поглинається енергії, яка вимірюється в джоулях. Якщо до 1990-х років фахівці в області гальмівній техніки вважали найвищим досягненням забезпечення сприйняття енергії гальмування 11 МДж в розрахунку на оду вісь (поїзди TGV-PSE першого покоління), то в даний час вже без проблем досягнуті значення вище 15 МДж (поїзд TGV- A), близькі до конкретної реалізації системи розрахованої на 22 МДж, випробовуються на стендах матеріали на енергію гальмування 28 МДж і розробляються нові на 40 МДж і більш.

Граничні напруги в гальмівній системі контртіло - накладка визначаються: розтягують напруженнями в контртіло, викликаними термічної деформацією; максимально допустимою температурою матеріалу накладки.

Таблиця 1.6

Властивості і галузі застосування фрикційних накладок

Рухомий склад	Вимоги / властивості	Області застосування
Трамвай, метрополітен, міські залізниці. Гальмівний контртіло з сірого чавуну або сталевого лиття	Зносостійкість, відсутність шуму, висока термостійкість на обмоторенних осях при екстремому гальмуванні	Швидкість до 100 км / год, питомий тиск до 200 Н / см ² максимальна температура 400 °С
Приміське сполучення. Гальмівний контртіло з чавуну (сірого або з кулястим графітом)	Невеликий і рівномірне спрацьовування накладки, незначний знос контртіла, відсутність шуму	Швидкість до 140 км / год, питомий тиск до 80 Н / см ² максимальна температура 400 °С
Область компетенції МСЗ. Гальмівний контртіло з чавуну (сірого або з кулястим графітом)	Стабільність коефіцієнта тертя при високій швидкості, відсутність плям від прожогів, незначна чутливість до вологості	Швидкість до 200 км / год, питомий тиск до 80 Н / см ² максимальна температура 400 °С
Високошвидкісні поїзди . Гальмівний контртіло з чавуну (сірого або з кулястим графітом)	Незначне падіння ефективності при нагріванні, відсутність плям пріжогов при високій швидкості, хороші демпфіруючі властивості	Швидкість до 300 км / год, питомий тиск до 50 Н / см ² максимальна температура 900 °С
Високошвидкісні поїзди . Гальмівний контртіло з легованої сталі, накладки з металокераміки	Високий коефіцієнт тертя, низький рівень шуму, хороша теплопередача, оптимальне співвідношення ціни і якості, низька чутливість до вологості	Швидкість до 350 км / год, питомий тиск до 90 Н / см ² максимальна температура 900 °С
Потужні гальма для поїздів міжнародних і далеких приміських сполучень. Гальмівний контртіло з легованої сталі	Термостійкість без помітного падіння ефективності при нагріванні, висока зносостійкість, гарна теплопередача	Швидкість до 200 км / год, питомий тиск до 60 Н / см ² максимальна температура 550 (600) °С

При цьому слід мати на увазі, що внаслідок деформації контактуючих поверхонь накладки і гальмівного контртіла передача енергії не є однорідною. У зонах перегріву (плямах прижогов) температура і зумовлені нею напруги в контртіло перевищують допустимі. Це означає, що, наприклад, при максимальній розрахунковій температурі 600 °С в зоні плям припикання контртіла і накладки фактична температура досягає 800-1000 °С. У зв'язку з цим гальмівну систему слід проектувати в розрахунку на значно вищі температури.

Матеріали фірми BECORIT аналогічного призначення наведені в табл. 1.7.

Таблиця 1.7

Матеріали гальмівних накладок компанії BECORIT для гальм

Марка	Коефіцієнт тертя f	Властивості	Застосування
T 539	0,35	Висока механічна міцність	Трамвай
T539	0,38	Зносостійкість	Трамвай
V 30 T 550	0,35	Зносостійкість, низька чутливість до вологості	За дозволом МСЗ
T 918	0,35-0,38	Недорогі універсальні накладки.	За дозволом МСЗ
T 543	0,35	Зносостійкість, стабільність коефіцієнта тертя	За дозволом МСЗ
T 984	0,35	Спеціальна розробка для високої швидкості прослизання	DBAG, T
ICE926	0,35-0,38	Висока зносостійкість	на розсуд МСЗ
T 946	0,40	Універсальні накладки з високим коефіцієнтом тертя	Приміські поїздки зі швидкістю до 140 км / ч.
T 930-K	0,35	Спеціальні накладки з низькою чутливістю до вологості	Країни Скандинавії
T 922 -1	0,32	Низький коефіцієнт тертя, для гальмівних контр тел	Великобританія
T 928	0,35	для алюмінієвих дисків, армованих карбідом кремнію SiC	Потяги ICE, міської залізниці Копенгагена
T 950-1	0,35-0,40	Висока термостійкість (нова розробка)	SBB, для максимальної температури 600 °С (сталевий диск)
BM 40	0,38	Металокераміка з високою термостійкістю і низьким зносом	Кінцеві моторні вагони поїздів ICE, поїзди BM
TGV-A41	0,38	Металокераміка з істотно підвищеною зносостійкістю	SBB

Отже, подальша оптимізація можлива тільки за умови, що існуюча неоднорідна передача тепла може бути змінена на однорідну відповідними конструктивними заходами, до яких можна віднести:

- гальмівне контртіло: симетричне кріплення, можливість вільного розширення у вільному напрямку;
- гальмівну накладку, подальше сегментування поверхні тертя для кращого прилягання до контртіло.

протягом декількох останніх років виробники гальм і фрикційних матеріалів досліджують на придатність нові матеріали. До них відносяться композиційні матеріали на основі вуглець-вуглецю, що застосовуються в сучасних літаках і гоночних автомобілях «Формули-1» і є досить перспективними в області термостійкості і зносостійкості. Їх характеристики в порівнянні з основними видами фрикційних матеріалів наведені в табл. 1.8.

Таблиця 1.8

Матеріали пар тертя

Пара тертя	Максимальна швидкість, м / с.	Проблема	Гранична температура, °C
Сталь по сталі	до 140	Низький коефіцієнт тертя, теплові напруги	до 1000
Сталь по чавуну	до 45	Низький коефіцієнта тертя, теплові напруги, швидкий знос	до 1000
Сірий чавун - органічна речовина	до 28	термоудар, швидкий знос	до 450
Сталь - пластмаса	до 28	Теплові напруги, швидкий знос	до 350
Сталь - металокераміка	до 111	Теплові напруги	до 900
Al-SiC - органічна речовина	до 70	Максимальна температура	до 450
вуглець - вуглець	до 140	Окислення , чутливість (орієнтовно) до низьких температур	до 1200

1.6. Підвищення довговічності фрикційних елементів гальмівних пристроїв

Зношування фрикційних елементів колодкових гальм залежить від ряду факторів: швидкості обертання гальмівного шківa, величини питомої тиску, температури в зоні контакту фрикційної пари та інших.

Проте ряд досліджень [1, 2, 11, 28] показують і переконують, що визначальним фактором при зносі фрикційних матеріалів є вплив нагріву, або температурний знос.

при терті відбувається швидке нагрівання тонких поверхневих шарів, що труться з великим виділенням тепла.

у разі тертя пари "метал - пластмаса" відведення тепла майже односторонній, так як теплопровідність металу приблизно в 400 разів більше теплопровідності пластмаси, тому відбувається локалізація тепла в місцях контакту поверхонь тертя, миттєве підвищення температури в малих активних обсягах пластмаси, що призводить до різкого зниження міцності властивостей і інтенсивного зносу.

Дослідження, проведені Е. Е. Глуховим [23] при вивченні зносостійкості пластмас при терті, дали наступну залежність деформованості пластмас від температури:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (e^n - 1) \ln \frac{\tau + \tau_0}{\tau_0}, \quad (1.1)$$

$$\text{де } n = \frac{\sigma}{\sigma_0} e^{-\frac{T_0}{T}};$$

Σ - деформація пластмаси;

$\sigma, /$ - напруження;

$\Sigma_0, /_0, /_0, T_0$ - постійні для даного досвіду величини;

T - температура.

Аналіз виразу (1.1) показує, що на знос пластмаси в процесі тертя вирішальний вплив справляє величина температури, при якій відбувається її деформація (стирання).

Роботи професора М. П. Александрова під ВНІПТМАШЕ показали, що величина зносу гальмівних пластмасових фрикційних обкладок на азбестового основі є нелінійної функцією температури, як це показано на (рис. 1.6).

У машинобудуванні до недавнього часу гальмівні обкладання зазвичай виготовлялися з гальмівної азбестового стрічки по ГОСТ 1198-55, просоченої бітумом (тип А) або смолою (тип Б) [29].

Значне число істотних недоліків: надмірна пружність, низька зносостійкість, дефіцитність довговолокнистого азбесту, що йде на її виготовлення, і вкрай непостійний коефіцієнт тертя призвели до повної заміни її Вальцьована стрічкою.

Вальцьована стрічка допускає велику сталу температуру роботи гальма (220 ° проти 175-200 ° для азбестового стрічки), вона еластична, володіє відносно стабільним коефіцієнтом тертя (0,42 і вище).

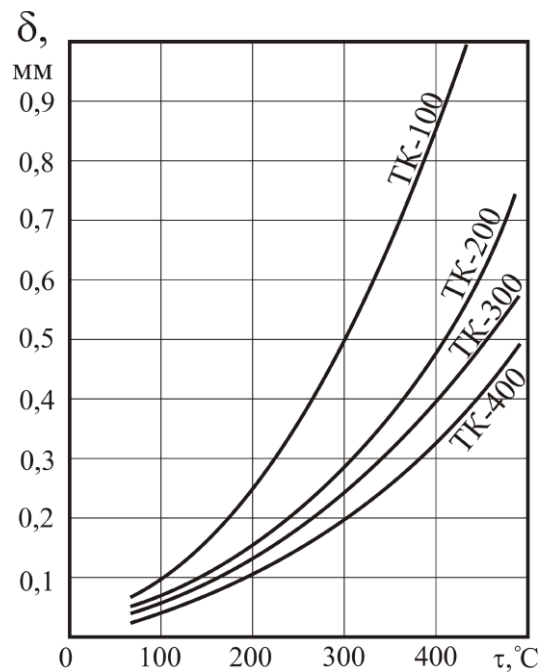


Рис 1.6. Графік залежності зносу фрикційних обкладок колодкових гальм різних типорозмірів від температури нагріву

Однак, її зносостійкість теж недостатня в умовах сучасних вимог до колодковим гальмах автомобільного транспорту.

Питання підвищення довговічності фрикційних гальмівних обкладок може бути розглянуто з двох точок зору. З одного боку, це пряме якісне поліпшення застосовуваних в гальмівних пристроях фрикційних матеріалів, з іншого - створення гальмівних пристроїв з умовами роботи, що приводять до значного підвищення довговічності вже існуючих фрикційних матеріалів.

Як уже зазначалося вище, ВНПАТІ працював над створенням нових рецептур зносостійких фрикційних матеріалів на азбестового основі. Тільки в одному 1960 році випробовувалися різні матеріали марок (за матеріалами ВНІПТМАШ) [23];

6-6-57

8-67-59

7 - КФ- 31

8 - 55а-59 (гарячого формування)

8 - 55а-59

6-1 - 8-60-59 6-6-57

60

8-62-59

і інші.

Хороші результати отримані при випробуваннях матеріалів марок "8-74к-64" і "8-45-62". Їх зносостійкість в 4,3 ... 6 разів вище, ніж матеріалу марки ЕМ-2 (серійна вальцована стрічка) при більш стабільному коефіцієнті тертя.

Однак підвищення довговічності фрикційних обкладок колодкових гальм автомобілів шляхом створення нових високо-зносостійких фрикційних матеріалів не дало поки вагомих результатів в широких експлуатаційних масштабах.

Тому, на наш погляд, необхідно шукати вирішення питання шляхом розробки і впровадження принципово нових високоефективних і зносостійких композиційних фрикційних матеріалів.

1.7. Загальна аналітичний опис нестационарних процесів нагрівання та охолодження твердих тіл

Процеси переносу теплоти за рахунок теплопровідності при відсутності внутрішніх джерел тепла, коли температура системи змінюється не тільки від точки до точки, але і з плином часу називаються нестационарними тепловими процесами [24]. Вони мають місце при нагріванні (охолодженні) різних заготовок і виробів, виробництві скла, випалюванні цегли, вулканізації гуми, пуску і зупинці різних теплообмінних пристроїв, енергетичних агрегатів і т. Д.

Серед практичних задач нестационарної теплопровідності найважливіше значення мають дві групи процесів: а) тіло прагне до теплового рівноваги; б) температура тіла зазнає періодичні зміни.

До першої групи належать процеси прогріву або охолодження тіл, поміщених в середу з заданим тепловим станом, наприклад, прогрів болванки в печі, охолодження металевих брусків і чушок, охолодження гартує деталі і т. п.

До другої групи відносяться процеси в періодично діючих підігрівачах, наприклад теплові процеси регенераторів, насадка яких то нагрівається димовим газом, то охолоджується повітрям. На рис. 1.6 показаний характер кривих, отриманих при нагріванні однорідного твердого тіла в середовищі з постійною температурою $t_{жс.}$. По міру нагрівання температура в кожній точці асимптотично наближається до температури нагріваючого середовища. Як видно з малюнка, найбільш швидко змінюється температура точок, що лежать поблизу поверхні тіла. Зі збільшенням часу прогріву ця різниця буде зменшуватися і теоретично через досить великий проміжок часу вона дорівнюватиме нулю. Таким чином, нестационарні теплові процеси завжди пов'язані зі зміною внутрішньої енергії або ентальпії речовини.

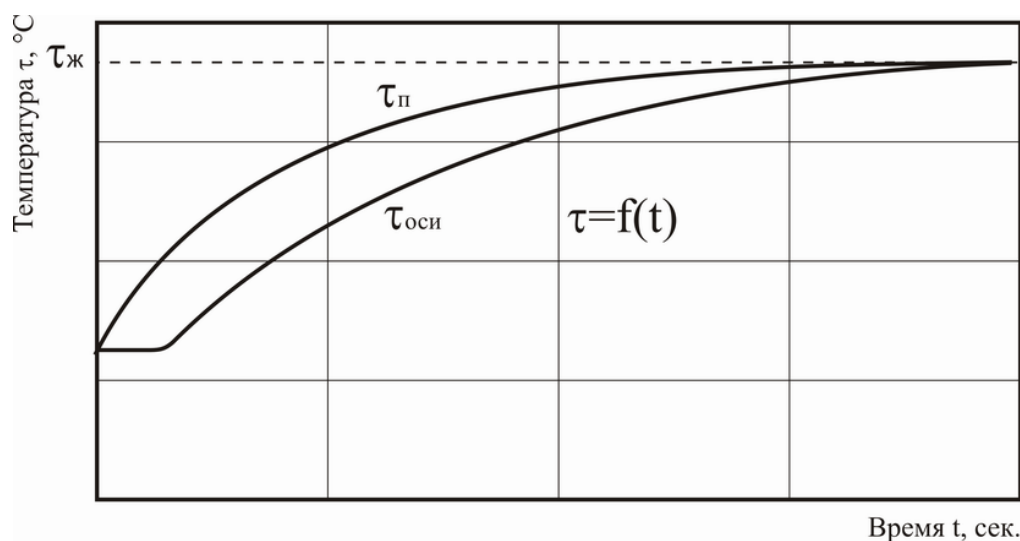


Рис.1.7. Характер зміни температури тіла при нагріванні в часі [29]

Рішення теплової задачі тертя в гальмі, в загальному випадку, передбачає вирішення трьох завдань:

- визначення кількості тепла, що надходить в кожен елемент пари тертя;
- рішення задачі про поширення тепла в елементі пари тертя;
- визначення здатності елемента пари тертя віддавати тепло в навколишнє середовище.

При розрахунках гальмівних пристроїв передбачається, що в процесі гальмування кінетична енергія загальмовує мас повністю перетворюється в тепло [12, 29, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54] і в основному, розподіляється між елементами пари тертя. Частина тепла безпосередньо від поверхні тертя передається в навколишнє середовище.

При вирішенні задачі поширення тепла в елементах фрикційної пари гальма на поверхні тертя задаються граничні умови, тобто. Е. Задається інтенсивність теплового потоку. Для її визначення необхідно обчислити поточну реалізовану потужність тертя. Питання визначення роботи гальмування для гальмівних пристроїв розглянуті М. П. Александровим [16, 29]. Аналіз залежності поточної потужності тертя від характеристик фрикційного теплостійкості наведено в роботі [14].

Частка тепла, що надходить в кожен момент часу в поверхні пари тертя, враховується за допомогою коефіцієнта розподілу теплових потоків $\langle \eta \rangle$. У літературі наводяться формули для визначення цього коефіцієнта [11] при різних конструктивних умовах. Згідно Ньюкомбу в гальмівних пристроях в чавунне контртіло надходить 99% тепла при роботі в парі з азбосмоляними накладками і 96% - з металокерамічними.

Дослідження температурного поля елементів пари тертя базується на рішенні рівняння теплопровідності Фур'є з відповідними граничними умовами. Однак отримання точних рішень задачі про поширення тепла в

елементах гальма дуже важко з ряду причин, серед яких можна назвати наступні:

- складність конфігурації реальних деталей;
- різноманітність і складність граничних умов;
- складність взаємодії реальних деталей при терті;
- наявність деталей з різними фізичними властивостями.

Зазвичай завдання спрощують, виходячи з практичних вимог і обчислювальних можливостей.

Аналітичний опис процесів теплопровідності включає в себе диференціальне рівняння і умови однозначності.

диференціальне рівняння теплопровідності при відсутності внутрішніх джерел тепла має вигляд [24, 28]:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \tau}{\partial z^2} \right). \quad (1.2)$$

умови однозначності задаються у вигляді:

$$(1.3) \quad \left. \begin{array}{l} \text{фізичних параметрів } L, c, \rho; \\ \text{форми і геометричних розмірів об'єкта } l_0, l_1, l_2, \dots, l_n; \end{array} \right\}$$

температури тіла в початковий момент часу $t = 0$, $l = l_0 = f(x, y, z)$.

Граничні умови можуть бути задані у вигляді граничних умов третього роду:

$$\left(\frac{\partial \tau}{\partial n} \right)_{n=0} = -\frac{\alpha}{\lambda} (\tau_{n=0} - \tau_{жс}). \quad (1.4)$$

Диференціальне рівняння теплопровідності (1.2) разом з умовами однозначності (1.3) і граничними умовами (1.4) дає закінчений математичний вигляд, що описує розглянуту задачу. Рішення її полягає в пошуку функції,

$$\tau = f(x, y, z, t, \alpha, a, \tau_0, \tau_{ж}, l_0, l_1, \dots, l_n) \quad (1.5)$$

яка задовольняла б рівняння (1.2) і умов (1.3) і (1.4).

1.7.1. Окремі випадки рішення рівняння теплопровідності

Охолодження (нагрівання) необмеженої пластини.

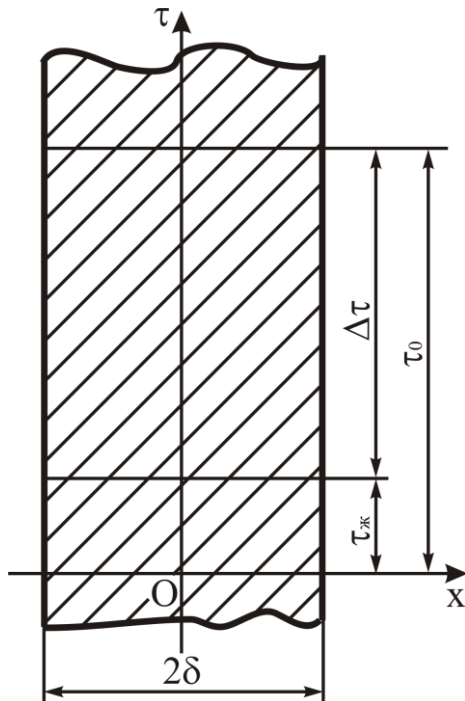


Рис. 1.8. До охолодженню плоскої необмеженої пластини

Якщо товщина пластини мала в порівнянні з її довжиною і шириною, то така пластинка називається необмеженою [24, 28].

При заданих граничних умовах коефіцієнт тепловіддачі однаковий для всіх точок поверхні пластини. Зміна температури відбувається тільки в одному напрямку по товщині пластини, в двох інших напрямках температура не змінюється, тоді в просторі завдання є одномірною. Початковий розподіл температури задаємо деякою функцією $\tau(x, 0) = f(x)$.

Охолодження відбувається в середовищі з постійною температурою $\tau_{ж} = const$. На обох поверхнях відведення теплоти здійснюється при постійному в часі коефіцієнті тепловіддачі. Відлік температури пластини для будь-якого моменту часу будемо вести від температури навколишнього середовища $\Delta\tau = \tau - \tau_{ж}$.

Внаслідок одномірності завдання диференціальне рівняння (1.2) приймає вигляд:

$$\frac{\partial \Delta \tau}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \Delta \tau}{\partial x^2} \quad (1.6)$$

Початкові умови:

при $t=0$ $\Delta \tau = \Delta \tau_0 = f(x)$ - $\tau_{жс} = F(x)$.

При заданих умовах охолодження завдання стає симетричною, і початок координат для зручності поміщаємо відповідно до рис. 1.8. При цьому граничні умови для осі і поверхні приймають вид [24]:

$$\left. \begin{array}{l} \text{а) на осі пластини при } x = 0 \left(\frac{\partial \Delta \tau}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 ; \\ \text{б) на поверхні пластини при } x = \tau_m \left(\frac{\partial \Delta \tau}{\partial x} \right)_{x=\delta} = -\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \Delta \tau_{x=\delta} . \end{array} \right\} \quad (1.7)$$

Рішення диференціального рівняння (1.6) будимо шукати за допомогою методу поділу змінних у вигляді добутку двох функцій, одна функція від t , а інша від x [24]:

$$\Delta \tau = \Delta \tau(t, x) = \varphi(t) \cdot \psi(x). \quad (1.8)$$

Підставляючи вираз (1.8) в початкове диференціальне рівняння (1.6), отримуємо:

$$\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} \cdot \psi(x) = a \cdot \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} \cdot \varphi(t),$$

або

$$\varphi'(t) \cdot \psi(x) = a \cdot \psi''(x) \cdot \varphi(t).$$

В останньому рівнянні змінні легко розділяються і його можна переписати у вигляді, в якому ліва частина рівняння буде функцією тільки від t , а права - тільки від x .

$$\frac{\varphi'(t)}{\varphi(t)} = a \cdot \frac{\psi''(x)}{\psi(x)} \quad (1.9)$$

Після нескладних математичних висновків і перетворень [24, 28] отримуємо остаточний вираз для температурного поля при охолодженні (нагріванні) однорідної пластини,

$$\Delta\tau = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{\mu_n}{\delta \cdot (\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n)} \cdot \left(\int_{-\delta}^{+\delta} F(x) \cdot \cos \left(\mu_n \cdot \frac{x}{\delta} \right) \cdot dx \right) \cos \left(\mu_n \cdot \frac{x}{\delta} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot t}{\delta^2}} \quad (1.10)$$

де δ - товщина пластини;

μ_n - корені характеристичного рівняння [24] ;

$\int_{-\delta}^{+\delta} F(x) \cdot \cos \left(\mu_n \cdot \frac{x}{\delta} \right) \cdot dx$ - початковий розподіл температури;

$\frac{a \cdot t}{\delta^2} = F_0$ - число Фур'є.

охолодження (нагрівання) нескінченно довгого циліндра.

Циліндр радіусом r_0 віддає теплоту навколишньому середовищу через свою бічну поверхню, при цьому коефіцієнт тепловіддачі в усіх точках однаковий і залишається постійним протягом всього періоду охолодження (нагрівання). Температура навколишнього середовища постійна $\tau_{ж}$. Відлік температури нескінченно довгого циліндра для будь-якого моменту часу будемо вести від температури навколишнього середовища $\Delta\tau = \tau - \tau_{ж}$. При цьому рівняння теплопровідності приймає вид:

$$\frac{\partial \Delta \tau}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \Delta \tau}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Delta \tau}{\partial r} \right) \quad (1.11)$$

Граничні і початкові умови [24]:

при $t = 0$ і $0 < r < r_0$

$$\Delta \tau = \Delta \tau|_0 = f(r) - \Delta \tau|_{\infty} = F(r);$$

при $t > 0$ і $r = 0$

$$\left(\frac{\partial \Delta \tau}{\partial r} \right)_{r=0} = 0;$$

при $t > 0$ і $r = r_0$

$$\left(\frac{\partial \Delta \tau}{\partial r} \right)_{r=r_0} = -\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \Delta \tau_{r=r_0}.$$

Завдання вирішується також за допомогою поділу змінних.

Після математичних висновків і перетворень [24, 28] отримуємо остаточний вираз для температурного поля при охолодженні (нагріванні) нескінченно довгого циліндра, (1.12)

$$\tau_R = \sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{2}{r_0^2 \cdot (J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n))} \cdot \left(\int_0^{r_0} r \cdot F(r) \cdot J_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{r_0}\right) dr \right) \cdot J_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{r_0}\right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot t}{r_0^2}}$$

де r - радіус циліндра;

μ_n - корені характеристичного рівняння [24];

J_0 - функція Бесселя першого роду нульового порядку;

J_1 - функція Бесселя першого роду першого порядку;

$\int_0^{r_0} r \cdot F(r) \cdot J_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{r_0}\right) dr$ - початковий розподіл температури;

$$\frac{a \cdot t}{\delta^2} = F_0 - \text{число Фур'є.}$$

Рівняння 1.10 і 1.12 дозволяють отримати значення температури τ в будь-якій точці пластини і циліндра для будь-якого моменту часу t при будь-якому початковому розподілі температури за обсягом твердого тіла.

ВИСНОВКИ ПО ПЕРШОМУ РОЗДІЛУ

1. Аналіз умов роботи і напрямків розвитку гальмівних пристроїв дозволив зробити висновок, що підвищення надійності та ефективності роботи гальмівних пристроїв можна досягти розробкою нових фрикційних матеріалів мають велику теплопровідність, теплоємність і зносостійкість.

2. Виявлено тенденції в розвитку гальмівних пристроїв полягають у все більшому впровадженні дискових гальмівних пристроїв завдяки їх підвищеної енергоємності при порівняно невеликих обсягах вузла тертя.

3. Підвищення ефективності роботи гальмівного пристрою, що полягає в стабілізації коефіцієнта тертя і зниження теплової напруженості фрикційного вузла можна досягти шляхом зменшення товщини фрикційної накладки і збільшення поверхонь охолодження вузла тертя.

4. Проаналізовано та розглянуті теплові процеси, що проходять при повторно-короткочасному режимі роботи. Розглянуто приватні рішення рівняння теплопровідності Фур'є стосовно до гальмівного пристрою.

Мета і завдання досліджень.

Відповідно до викладеного метою даної роботи є підвищення ефективності гальмування автомобілів застосуванням нових фрикційних матеріалів на основі вуглець-вуглецю з піровуглецевою матрицею.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання дослідження:

- провести аналіз і оцінку працездатності гальмівних пристроїв підйомно-транспортних машин і виявити шляхи підвищення ефективності їх роботи;

- провести аналіз існуючих математичних моделей розрахунку теплового стану фрикційних поверхонь гальмівних пристроїв;

- дослідити вплив теплової навантаженості фрикційного сполучення гальмівних пристрою на зміну коефіцієнта тертя;

- розробити математичну модель об'ємного температурного стану фрикційного матеріалу гальмівного пристрою, що працює в повторно короткочасному режимі роботи;
- визначити раціональні теплофізичні показники розробляються фрикційних матеріалів на основі наведеної математичної моделі;
- розробити
- провести експериментальні дослідження з метою перевірки адекватності моделі і визначення закономірності зміни коефіцієнта тертя пропонуваніх фрикційних матеріалів;
- повісті порівняльний аналіз фрикційних матеріалів, що застосовуються в сучасних гальмівних пристроях автомобілів, в тому числі і пропонуваніх фрикційних матеріалів на основі вуглецевих волокон з піровуглецевою матрицею;
- провести натурні експериментальні дослідження запропонуваніх фрикційних матеріалів з поліпшеними триботехнічними показниками.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ТРИВИМІРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ФРИКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ГАЛЬМІВНОГО ПРИСТРОЇ, ЯКИЙ ПРАЦЮЄ У ПОВТОРНО- КОРОТКОЧАСНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ

2.1. Аналіз силової навантаженості гальмівних пристроїв

Відомо, що від режиму силової навантаженості гальмівних пристроїв в значній мірі залежать їх основні параметри, питомі тиску, коефіцієнти тертя, гальмівні моменти, деформації та коливання гальмівних шківів і колодок з накладками, температура поверхонь тертя, інтенсивність теплообміну, довговічність пар тертя і ін. Тому оцінка силової навантаженості робочих деталей гальмівних пристроїв є дуже важливим етапом перед проектуванням нових або удосконаленням старих конструкцій.

Дослідження, присвячені аналізу силової навантаженості гальмівних пристроїв, проводилися в роботах [1, 2, 29, 48, 49, 50, 55, 56, 57, 58, 59, 60], де переважно розглядалися двоколодкові барабанні гальмівні пристрої, які отримали широке розповсюдження в машинобудуванні. Згідно з цим питомий тиск виникаючий між колодкою та гальмом дорівнює:

$$q = \frac{u}{\mu \cdot r \cdot 2 \sin \omega} \quad (2.1)$$

Коли обидві колодки працюють однаково, окружна сила тертя однієї колодки.

$$u = \frac{M_t}{2r} \quad (2.2)$$

2.2 . Дослідження теплового стану роботи гальмівних пристроїв

2.2.1. Аналіз режимів роботи і енергонавантаженості гальмівних пристроїв

Призначення і широка область використання різних механізмів і машин багато в чому визначають різноманітність режимів роботи гальмівних пристроїв.

Розрізняють три можливі режими роботи механізмів, машин і їх гальмівних пристроїв: короткочасний, тривалий і повторно-короткочасний режим.

Найбільш складні умови експлуатації гальмівних пристроїв зустрічаються в механізмах, що працюють в повторно-короткочасному режимі [11, 29, 53], таких як автомобілі. Робота даних машин обумовлена дискретним дією механізмів і проявляється у формі випадково повторюваних гальмувань різної енергонавантаженості. Такий режим роботи найбільш характерний для гальмівних пристроїв автомобілів.

Дискретність роботи самого гальмівного пристрою характеризується величиною тимчасового інтервалу між двома послідовними гальмуваннями. При роботі гальмівних пристроїв величини пауз приймають ряд випадкових значень, які характеризуються певними статистичними оцінками.

Існуючі норми поділяють весь спектр можливих умов роботи гальмівних пристроїв на вісім груп згідно з групами класифікації.

Ці норми визначають лише середнє значення числа гальмування механізму і не враховують розсіювання даних характеристик. Очевидно, що повторно-короткочасний режим роботи гальмівних пристроїв є найбільш важким, тому що силові навантаження і напруги, що виникають при роботі гальма, повторюються, а температурні навантаження і напруги накопичуються від циклу до циклу, приводячи до постійного зростання температур в зоні контакту орієнтовно за законом, близькому до експоненціального, до моменту

досягнення теплового балансу фрикційного вузла. При цьому в зоні контакту виникають максимальні температури, викликають значне падіння коефіцієнта тертя в зоні тертя фрикційного матеріалу з контртілом, і знижують ресурс роботи пари тертя. Однак надійність роботи гальмівних пристроїв і ресурс їх пари тертя визначається не тільки режимом роботи і навантаженості, але і впливом навколишнього середовища, в якій вони експлуатуються. Таким чином, гальмівні пристрої, що працюють в повторно-короткочасному режимі, експлуатуються в найбільш складних умовах, що характеризуються максимальними навантаженнями і температурами.

2.2.2. Дослідження процесів теплообміну, що протікають при повторно-короткочасному режимі роботи гальмівного пристрою

На початку роботи механізму гальмування все тепло, що утворюється при гальмуванні, майже повністю акумулюється поверхнями, що труться, температура яких різко зростає. У міру прогрівання елементів гальма відведення тепла в навколишнє середовище збільшується.

Теплоутворення відбувається протягом деякого періоду часу t_T (рис. 2.1) (період ковзання тертьових поверхонь гальма до зупинки механізму). Внаслідок обмеженості поверхонь тертя і значної кількості тепла, що утворюється при гальмуванні, до кінця гальмування температура поверхні фрикційної обкладки і гальмівного барабану підвищується до τ_1 (точка а).

Потім настає період охолодження t_2 . При відключенні тормозного механізму (точка б) відбувається розчеплення поверхонь які труться, процеси охолодження обкладинки (крива б-в) і контртіла (б-г) в період t_2 протікають за різними законами. Потім гальмування повторюється, колодки замикаються, і знову починається нагрів поверхонь до температури τ_4 (точка д).

Наступного період гальмування різниця температур точок β і z зменшується, і до кінця гальмування температури обкладання і поверхні металевго контртіла (під колодкою) будуть однаковими і рівними τ_4 .

Різна теплопровідність матеріалів контртіла і фрикційної накладки не викликає різниці температур поверхонь тертя, але викликає різницю в теплових потоках: велика частина йде на нагрів контртіла, менша - через обкладання на нагрів важелів і колодок.

При повторно-короткочасному режимі роботи гальма період охолодження не великий, і гальмо не встигає охолотитися до початкової температури. Значення її до моменту подальшого гальмування вище, ніж на початку попереднього періоду. Після ряду послідовних гальмувань температура поверхонь тертя досягне максимальної для даного режиму роботи величини, т. б. так званої сталої температури $\tau_{ст.}$, при якій подальше зростання температури не відбуватиметься, оскільки кількість тепла, що отримується при гальмуванні, стає рівною кількості тепла, яке віддається в навколишнє середовище.

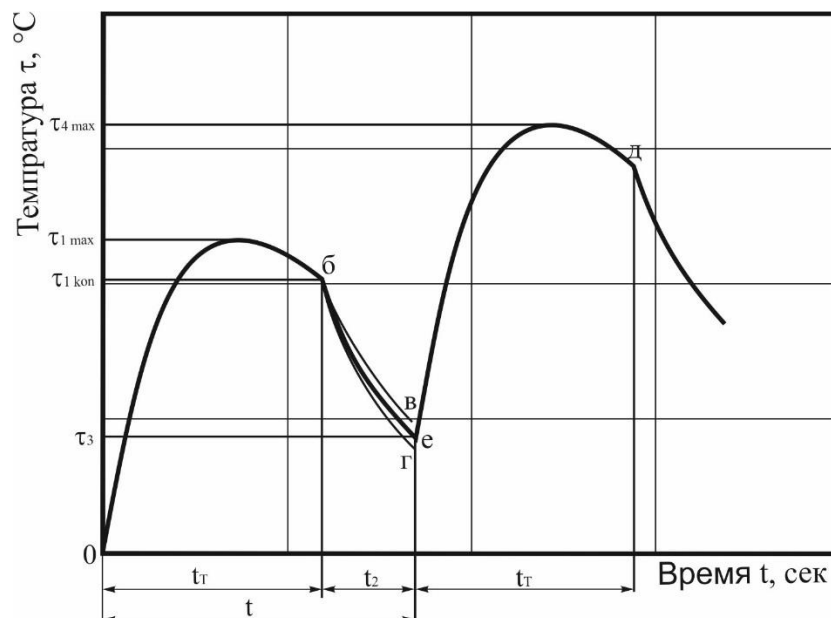


Рис. 2.2. Діаграма нагріву поверхні тертя металевго контртіла гальмівного пристрою, що працює в повторно-короткочасному режимі

Стала температура поверхні тертя контртіла може, отже, бути визначальним показником в характеристиці теплового режиму гальмівного пристрою. Чим вище $\tau_{вст.}$, тим в менш сприятливих умовах роботи знаходяться фрикційні елементи, тим інтенсивніше відбувається знос останніх. Процес теплообміну гальмівного пристрою з навколишнім середовищем протягом всього періоду роботи гальма є досить складним. Навіть протягом одного циклу тепловіддача гальмівного пристрою відбувається за різними законами.

Відповідно до двох різних періодів робочого стану гальмівного пристрою будемо розрізняти два основні періоди тепловіддачі гальмівного вузла.

- тепловіддача гальма в розгальмування стані при номінальних оборотах барабану (теповіддача вимушеної конвекцією).
- тепловіддача при перехідних процесах.

у кожному з цих періодів теплообмін відбувається двома шляхами: через металеве контртіло і через гальмівні колодки гальмівного пристрою.

2.2.3. Створення тривимірної розрахункової моделі температурного стану фрикційного матеріалу гальмівного пристрою, що працює в повторно-короткочасному режимі

При гальмуванні процес тертя гальмівної накладки і контртіла відбувається в точках фактичного контакту. Сумарна площа цих точок контакту становить лише незначну частку геометричній площі, що перекривається гальмівний накладкою. Так як виділення тепла відбувається лише в точках фактичного контакту, щільності теплових потоків і температурні спалаху в них можуть досягати досить великих величин, що викликають світіння поверхні тертя і перехід металу в цих точках в пластичний стан. При цьому відбувається деформація металу або його

швидкий знос, і місце температурної спалаху переміщається відповідно до зміни контактних питомих тисків.

Поширення теплового потоку на всю геометричну площу тертя відбувається поблизу поверхні тертя, і його щільність різко знижується в порівнянні з точками фактичного контакту, набуваючи значення, відповідні геометричні розміри контактуючих тіл. Відповідно змінюється і температура в поверхневих шарах.

Температурне поле накладки слід оцінювати виходячи з щільності теплового потоку, розподіленого по всій геометричній площі підведення тепла. Це дає деяке осередненним значення температури на поверхні тертя. У поєднанні з оцінкою величини температурних спалахів осередненним значення температури на поверхні може служити критерієм для визначення напруженого стану контртіла і умов роботи фрикційного матеріалу.

Знаходження об'ємного температурного поля твердого тіла володіє кінцевими розмірами, досить складне завдання. Однак внутрішній обсяг майже будь-якого твердого тіла можна представити у вигляді перетину ряду площин і елементарних поверхонь, що в свою чергу полегшує вирішення поставленого завдання [61]. На рис. 2.2 показана розрахункова схема для визначення об'ємного температурного поля фрикційного матеріалу гальмівного пристрою, що працює в повторно-короткочасному режимі. Згідно розрахунковій схемі рішення поставленого завдання можна представити як добуток безрозмірних температур безмежної труби і двох безмежних пластин:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \theta_{r1} \cdot \theta_b \cdot \theta_l \cdot \tau_H; \\ \tau_2 &= \theta_{r2} \cdot \theta_b \cdot \theta_l \cdot \tau_H;\end{aligned}\tag{2.3}$$

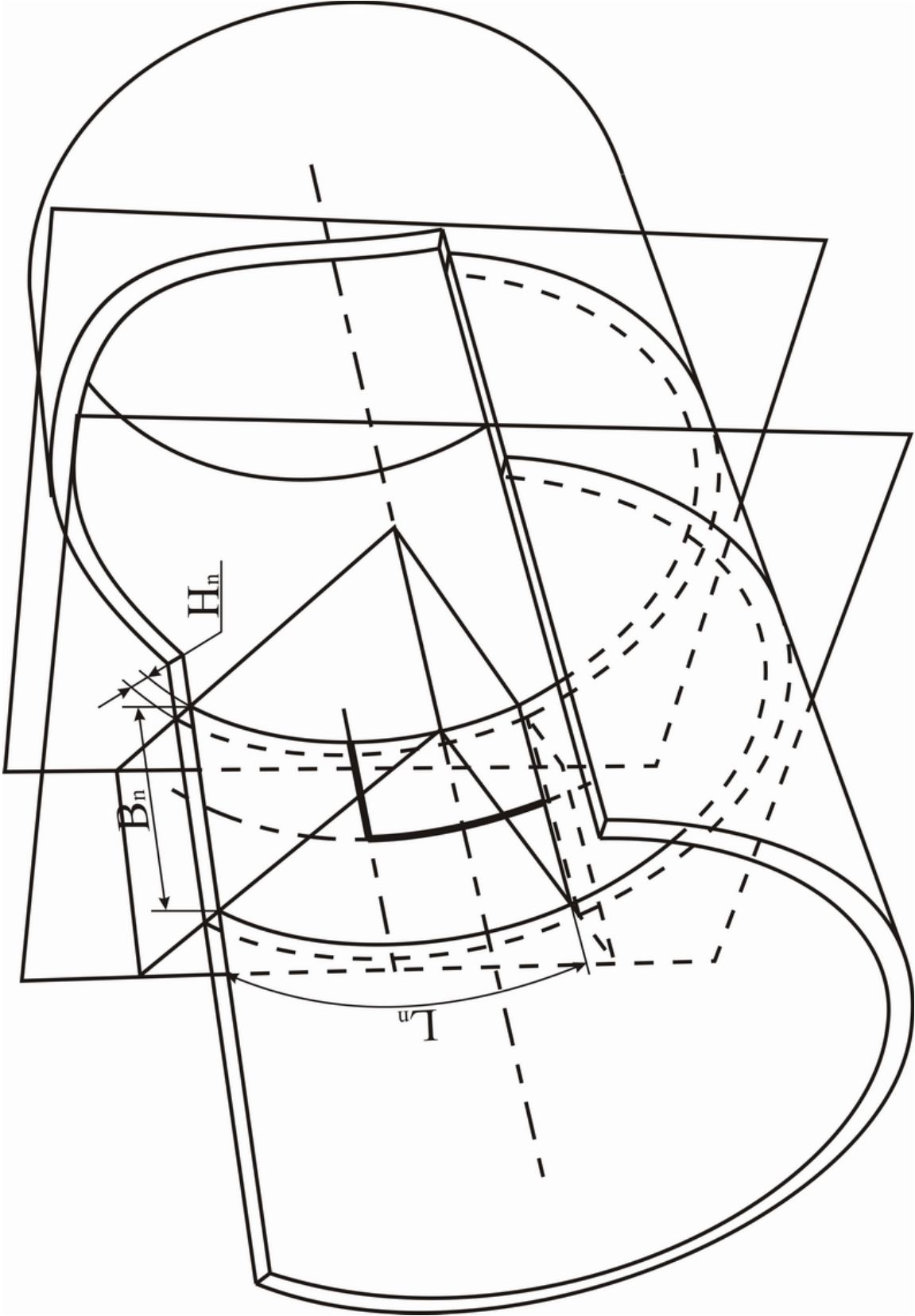


Рис. 2.3. Розрахункова схема для визначення об'ємного температурного поля фрикційного матеріалу гальмізованого пристрою, що працює в повторно-короткочасному режимі

де τ_1, τ_2 , - Температури накладки в будь-який момент часу в будь-якій точці внутрішнього обсягу накладки у всіх трьох етапах гальмування відповідно;

θ_{r1}, θ_{r2} , - зміна безрозмірною температури по глибині накладки у всіх трьох етапах гальмування відповідно;

θ_b, θ_l - зміна безрозмірною температури по ширині і довжині накладки відповідно;

τ_H - початкова температура процесу.

Згідно [11, 52] поширення тепла в матеріалі накладки і контртіла можна досліджувати без урахування їх кривизни на підставі однорідного рівняння теплопровідності для тертя двох напівобмежених тіл,

$$\frac{\partial(\Delta\tau)}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2(\Delta\tau)}{\partial h^2} \quad (2.4)$$

де $\Delta\tau$ - підвищення температури на глибині h від поверхні тертя;

t - поточне значення часу.

Для умови, коли на одиниці поверхні рівномірно нагрітого тіла ($h=0$) в початковий момент часу ($t=0$) виділяється кількість тепла q , рішення рівняння (2.4) має вигляд

$$\Delta\tau = \frac{\bar{q}}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot c \cdot \sqrt{t_T}}} \cdot e^{-\frac{h^2}{4 \cdot a \cdot t_T}} \quad [11], \quad (2.5)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності,

γ - питома вага нагрівається матеріалу,

c - питома теплоємність матеріалу,

t_T - час гальмування,

$$a = \frac{\lambda}{\gamma \cdot c} - \text{коефіцієнт температуропровідності.}$$

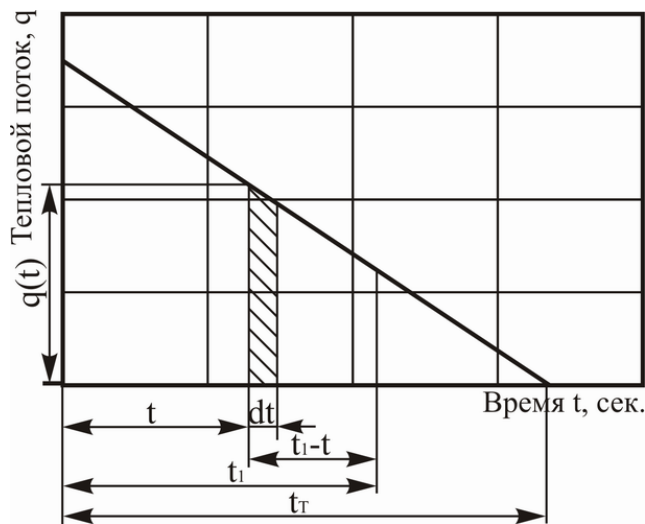


Рис. 2.4. Зміна щільності теплового потоку в залежності від часу для

При рівномірно уповільненому русі для періоду нагріву в процесі гальмування кількість тепла, що виділяється на одиниці поверхні в одиницю часу, може бути представлено прямою лінією графіка, зображеного на рис. 2.4.

Виходячи з рис. 2.5 і рівняння (2.5), можна записати зміна температури $d(\Delta\tau)$ до моменту часу t_1 , яке викликається кількістю тепла $q(t)dt$, що виділяється на одиниці поверхні:

$$d(\Delta\tau) = \frac{q(t) \cdot dt}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot c \cdot \sqrt{t_1 - t}}} \cdot e^{-\frac{h^2}{4 \cdot a \cdot (t_1 - t)}} \cdot dt, \quad (2.6)$$

де t_1 - значення часу, при якому визначається температура.

з урахуванням віддачі тепла з поверхні тertia в навколишнє середовище маємо,

$$q(t) = q_a \cdot \left(1 - \frac{t}{t_T}\right) - \alpha \cdot \Delta\tau_n \quad (2.7)$$

де $q_a = \frac{\alpha_N \cdot B_T \cdot v_0 \cdot A}{F}$ - кількість тепла, що виділяється на одиниці поверхні в одиницю часу (щільність теплового потоку) на початку процесу підвищення температури;

α - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні тертя в навколишнє середовище;

$\Delta\tau_n$ - надлишкова температура поверхні, на якій виділяється тепло;

N_α - коефіцієнт розподілу теплових потоків;

B_T - дотична гальмівна сила;

v_0 - початкова швидкість гальмування;

A - термічний еквівалент роботи;

F - площа поверхні, на якій виділяється тепло.

на підставі рівнянь (2.6) і (2.7) отримуємо диференціальне рівняння для визначення температури нагрівання контртіла [11].

$$d(\Delta\tau) = \frac{q_a \cdot \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) - \alpha \cdot \Delta\tau_n}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot c} \cdot \sqrt{t_1 - t}} - e^{-\frac{h^2}{4 \cdot a \cdot (t_1 - t)}} \cdot dt \quad (2.8)$$

Інтегруючи ліву частину рівняння (2.8) в межах від 0 до $\Delta\tau$, а праву частину - від 0 до t , отримуємо

$$\Delta\tau = \frac{q_a}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot c}} \cdot \left(\left(2 - \frac{4}{3} \cdot \frac{t_1}{t_T} - \frac{1}{3} \cdot \frac{h^2}{a \cdot t_T} \right) \cdot \sqrt{t_1} \cdot e^{-\frac{h^2}{4 \cdot a \cdot t_1}} - \frac{4}{3} \cdot \sqrt{t_1 - t} \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_T} - \frac{h^2}{4 \cdot a \cdot t_T} \right) \times \right. \\ \left. \times e^{-\frac{h^2}{4 \cdot a \cdot (t_1 - t)}} - h \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot \left(1 - \frac{t_1}{t_T} - \frac{1}{6} \cdot \frac{h^2}{a \cdot t_T} \right) \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (t_1 - t)}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot t_1}} \right) \right) \right) \quad (2.9)$$

де символом erf позначений інтеграл ймовірностей, який визначається за спеціальними таблицями або за графіком (рис. 2.5).

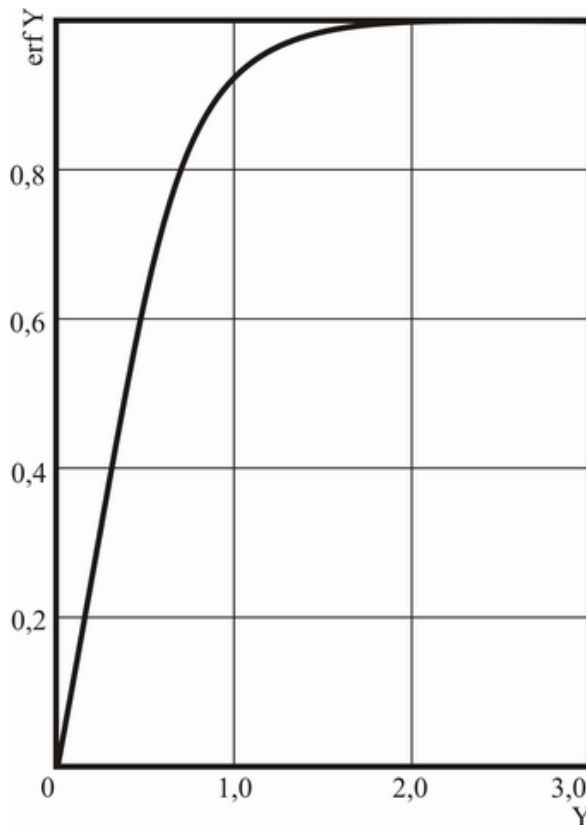


Рис. 2.5. Графік залежності інтеграла ймовірностей $erf Y$ від параметра Y

Підвищення температури $\Delta\tau$ в процесі нагрівання пари тертя ($t_l < t_0$) розраховується за виразом (2.9) при $t = t_l$ [11]:

$$\Delta\tau = \frac{q_a}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot c}} \cdot \left(\left(2 - \frac{4}{3} \cdot \frac{t}{t_T} - \frac{1}{3} \cdot \frac{h^2}{a \cdot t_T} \right) \cdot \sqrt{t} \cdot e^{-\frac{h^2}{4 \cdot a \cdot t}} - h \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_T} - \frac{1}{6} \cdot \frac{h^2}{a \cdot t_T} \right) \right) \times \left(1 - erf \left(\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot t}} \right) \right) \quad (2.10)$$

Вираз (2.10) дозволяє визначити температуру фрикційної накладки пари тертя на будь-якій глибині від поверхні тертя. Однак цей вислів не враховує реальний розподіл питомого тиску на контактній поверхні тертя, втрати тепла з бічних поверхонь накладки і вектор приросту температури точок накладки в напрямку обертання контртіла. Для виявлення реальної

картини розподілу температурного поля на поверхні фрикційного матеріалу висловимо щільність теплового потоку через реальний розподіл питомого тиску між колодкою і контртіло,

$$q_a = \frac{M_t \cdot l \cdot \alpha_N \cdot v \cdot (K \cdot \cos \beta + \sin \beta) \cdot A}{4 \cdot K \cdot r_0^2 \cdot f \cdot \sin \omega} \quad (2.11)$$

де t_M - гальмівний момент;

l - нескінченно мала довжина накладки;

N_α - коефіцієнт розподілу теплового потоку для накладки;

v - швидкість ковзання тертьових поверхонь;

K - коефіцієнт пропорційності;

A - механічний еквівалент теплової роботи;

r_0 - радіус контр тіла;

ω - повний кут обхвату накладкою контр тіла;

β - поточний кут обхвату.

Вектор приросту температури точок накладки в напрямку обертання контртіла враховуємо шляхом введення параметра J , який отримуємо з рівняння балансу енергій. Згідно рис 2.6 можна записати

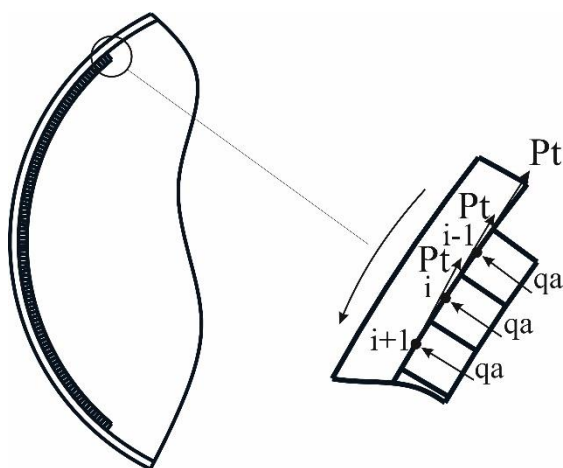


Рис. 2.6. До знаходженню вектора приросту температури на поверхні фрикційного

$$\rho \cdot dF \cdot h \cdot C_N \cdot d\tau = q_a \cdot dF \cdot dt_{\text{матеріалу}}. \quad (2.12)$$

Після перетворення отримуємо:

$$J = \frac{\tau_H + \frac{q_a \cdot t}{\rho \cdot h \cdot C_N}}{\tau_1}, \quad (2.13)$$

де t_1 - температура першої точки накладки з боку входу контргіла.

Ввівши доповнене вираз (2.11) і отриманий вираз (2.13) в рівняння (2.10), отримаємо:

$$\Delta\tau = \frac{q_a \cdot J}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot c}} \cdot \left(\left(2 - \frac{4}{3} \cdot \frac{t}{t_T} - \frac{1}{3} \cdot \frac{h^2}{a \cdot t_T} \right) \cdot \sqrt{t} \cdot e^{-\frac{h^2}{4 \cdot a \cdot t}} - h \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_T} - \frac{1}{6} \cdot \frac{h^2}{a \cdot t_T} \right) \right) \times \\ \times \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot t}} \right) \right). \quad (2.14)$$

Розділивши вираз (2.14) на температуру початку процесу нагрівання, отримаємо безрозмірний температурний коефіцієнт нагріву накладки в процесі тертя.

$$\theta_{r1} = \frac{\frac{q_a \cdot J}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot c}} \cdot \left(\left(2 - \frac{4}{3} \cdot \frac{t}{t_T} - \frac{1}{3} \cdot \frac{h^2}{a \cdot t_T} \right) \cdot \sqrt{t} \cdot e^{-\frac{h^2}{4 \cdot a \cdot t}} - h \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a}} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_T} - \frac{1}{6} \cdot \frac{h^2}{a \cdot t_T} \right) \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h}{\sqrt{4 \cdot a \cdot t}} \right) \right) \right)}{\tau_H}. \quad (2.15)$$

Рівняння (2.11), (2.13), (2.15) спільно дозволяють розрахувати температурне поле по глибині фрикційного матеріалу при нагріванні тертям, не враховуючи втрати теплоти з бічних поверхонь накладки.

Для обліку втрат теплоти з бічних поверхонь визначимо коефіцієнти зміни безрозмірною температури β_θ і λ_θ по ширині і довжині накладки, при цьому зручно представити накладку у вигляді розгортки представляє собою пластину товщиною H_n , довжиною L_n і шириною B_n . Внаслідок цього подання завдання стає симетричною щодо поздовжньої і поперечної осі накладки і можна розглядати чверть накладки з шириною $B_n/2$, довжиною $L_n/2$ і товщиною H_n . Тоді відповідно до виражень (1.10 і 1.12) для охолодження (нагрівання) необмеженої пластини маємо:

$$\theta_b = \frac{\sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{\mu_n}{b \cdot (\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n)} \cdot \left(\int_{-b}^{+b} F(b)_{t=0} \cdot \cos \left(\mu_n \cdot \frac{2 \cdot b}{B_n} \right) \cdot db \right) \cos \left(\mu_n \cdot \frac{2 \cdot b}{B_n} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot t}{B_n^2}}}{\tau_H}, \quad (2.16),$$

$$\theta_l = \frac{\sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{\mu_n}{L \cdot (\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n)} \cdot \left(\int_{-L}^{+L} F(L)_{t=0} \cdot \cos \left(\mu_n \cdot \frac{2 \cdot L}{L_n} \right) \cdot dL \right) \cos \left(\mu_n \cdot \frac{2 \cdot L}{L_n} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot t}{L_n^2}}}{\tau_H} \quad (2.17)$$

де $\int_{-b}^{+b} F(b)_{t=0} \cdot \cos \left(\mu_n \cdot \frac{2 \cdot b}{B_n} \right) \cdot db$ - функція розподілу температури по ширині накладки в початковий момент часу;

$\int_{-h}^{+h} F(L)_{t=0} \cdot \cos \left(\mu_n \cdot \frac{2 \cdot L}{L_n} \right) \cdot dL$ - Функція розподілу температури по довжині накладки в початковий момент часу.

Підставляючи вирази (2.15), (2.16), (2.17) в першу частину виразу (2.3), отримуємо рівняння, що дозволяє розрахувати температуру будь-якої точки

накладки в будь-який період часу нагріву фрикційної пари тертя з урахуванням втрат теплоти з бічних поверхонь фрикційного матеріалу.

Розрахунок температури фрикційного матеріалу в другому періоді гальмування представляє собою завдання визначення зміни температури при конвекційному охолодженні пар тертя. Дане завдання вирішується аналогічним способом. Температура накладки в будь-який момент часу в будь-якій точці внутрішнього обсягу накладки дорівнює:

$$\tau_2 = \theta_{r2} \cdot \theta_b \cdot \theta_l \cdot \tau_H. \quad (2.18)$$

Поширення тепла по глибині матеріалу накладки і контртіла в період природного охолодження, що триває згідно (1.12) дорівнює::

$$\theta_{r2} = \theta_{r3} = \frac{\sum_{n=1}^{n \rightarrow \infty} \frac{2}{r_0^2 \cdot (J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n))} \cdot \left(\int_0^{r_0} r \cdot F(r) \Big|_{t=0} \cdot J_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{r_0}\right) dr \right) \cdot J_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{r_0}\right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot \frac{a \cdot t}{r_0^2}}}{\tau_H} \quad (2.19)$$

де $\int_0^{r_0} r \cdot F(r) \Big|_{t=0} \cdot J_0\left(\mu_n \cdot \frac{r}{r_0}\right) dr$ - функція розподілу температури по глибині накладки в початковий момент часу.

Коефіцієнти безрозмірною температури η_θ і λ_θ визначаються за виразами (2.16), (2.17) з новими розподілами початкової температури вздовж і впоперек накладки, які фактично є розподілами температури в кінцевий період часу попереднього етапу процесу гальмування.

Наведений вище алгоритм розрахунку повторюється n-ну кількість разів з відповідними початковими вхідними параметрами до моменту досягнення теплового балансу, при якому кількість поглиненої енергії, виділяється при гальмуванні, дорівнює кількості енергії, що виділилася в навколишнє середовище. На рис. 2.7, 2.8 показано розподіл температури

поверхні тертя для асбофрикційного матеріалу ЕМ-2, що має такі характеристики: $\lambda = 0,00011 \text{ ккал/м} \cdot \text{с} \cdot \text{°C}$, $\Gamma = 2000 \text{ кг/м}^3$, $\beta = 0,0245 \text{ ккал/кг} \cdot \text{°C}$, І нового фрикційного матеріалу з характеристиками: $\lambda = 0,0024 \text{ ккал/м} \cdot \text{с} \cdot \text{°C}$, $\Gamma = \text{кг/м}^3 1750$, $c = 0,71 \text{ ккал/кг} \cdot \text{°C}$, Після здійснення 96 гальмувань. З правого боку наведені експериментальні, а з лівого - теоретично отримані дані температурного стану фрикційного матеріалу гальмівного пристрою, що працює в повторно короткочасному режимі.

Аналізуючи отримані теоретичні результати і порівнюючи їх з результатами, отриманими експериментальним шляхом, видно, що наведена вище методика теоретичного розрахунку об'ємного температурного стану фрикційного матеріалу відповідає дійсності в плані відображення температури теплового балансу і температурних полів на поверхні тертя шарнірно закріпленої накладки гальмівного пристрою. Так, теоретичний характер наростання температури поверхні тертя фрикційного вузла відповідає реальної зміни температури по тій же поверхні, а відхилення температури теплового балансу фрикційного вузла, отриманої теоретичним шляхом від експериментально отриманих значень, становить не більше 8%.

Таким чином, при проектуванні нових фрикційних матеріалів, знаючи основні геометричні параметри гальмівних пристроїв, режими роботи механізмів і умови охолодження, можна здійснити підбір раціональних теплофізичних параметрів фрикційного матеріалу, які б забезпечували більш сприятливі теплові умови роботи фрикційного вузла гальмівного пристрою. Переймаючись різними теплофізичними параметрами існуючих фрикційних матеріалів, дана методика розрахунку з достатньою точністю дозволяє визначити характер розподілу температурного поля за обсягом фрикційного вузла і температуру теплового балансу. Що в свою чергу дає можливість зробити висновки про придатність того чи іншого фрикційного матеріалу для застосування в новому проектуваному або в уже існуючому гальмівному пристрої.

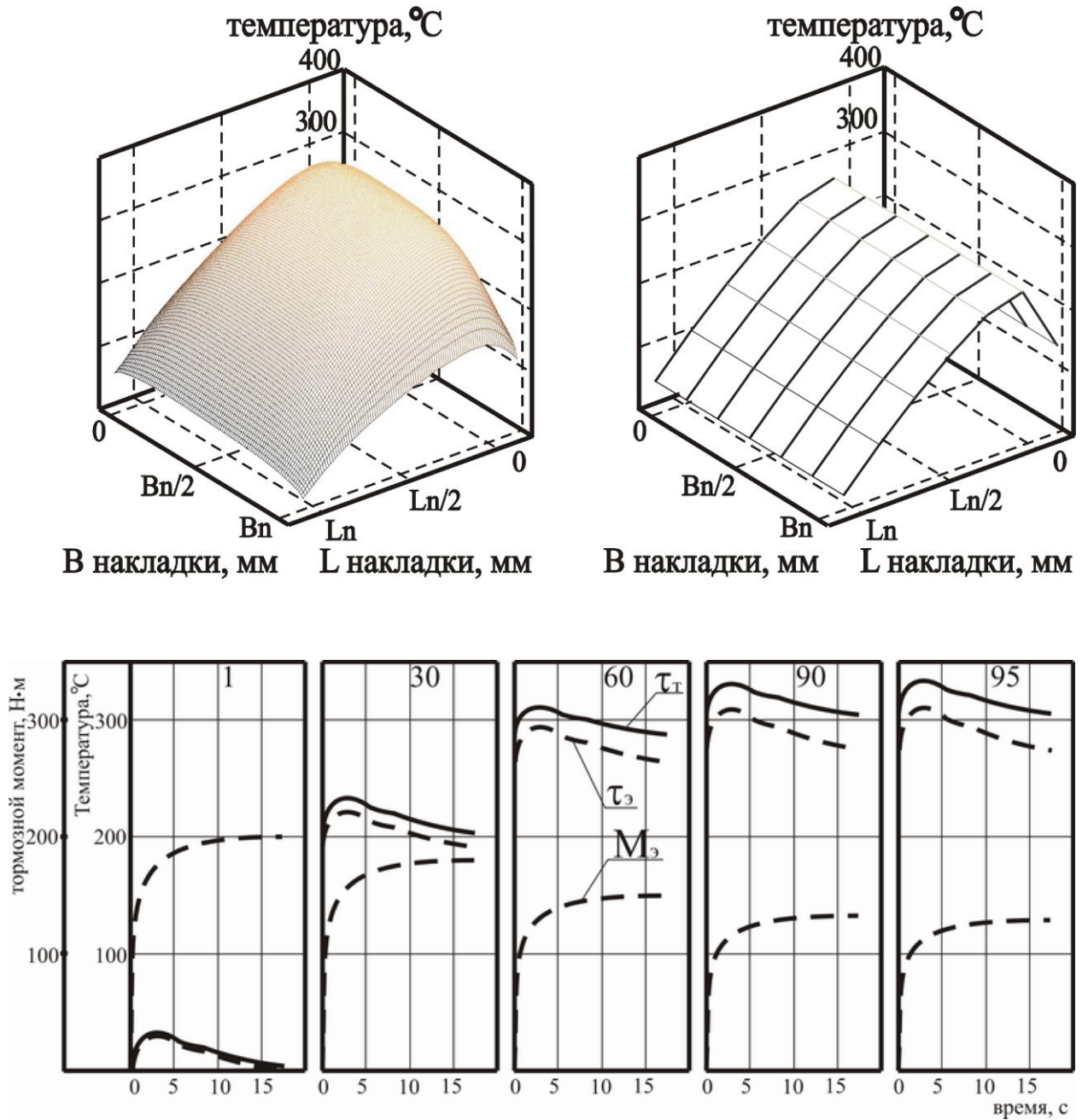


Рис. 2.7. Результати теоретичного та експериментального дослідження об'ємного температурного стану фрикційного матеріалу EM-2 гальмівного пристрою що працює, в повторно-короткочасному режимі;
 ———— — теоретично результати, - - - - - експериментальні результати.

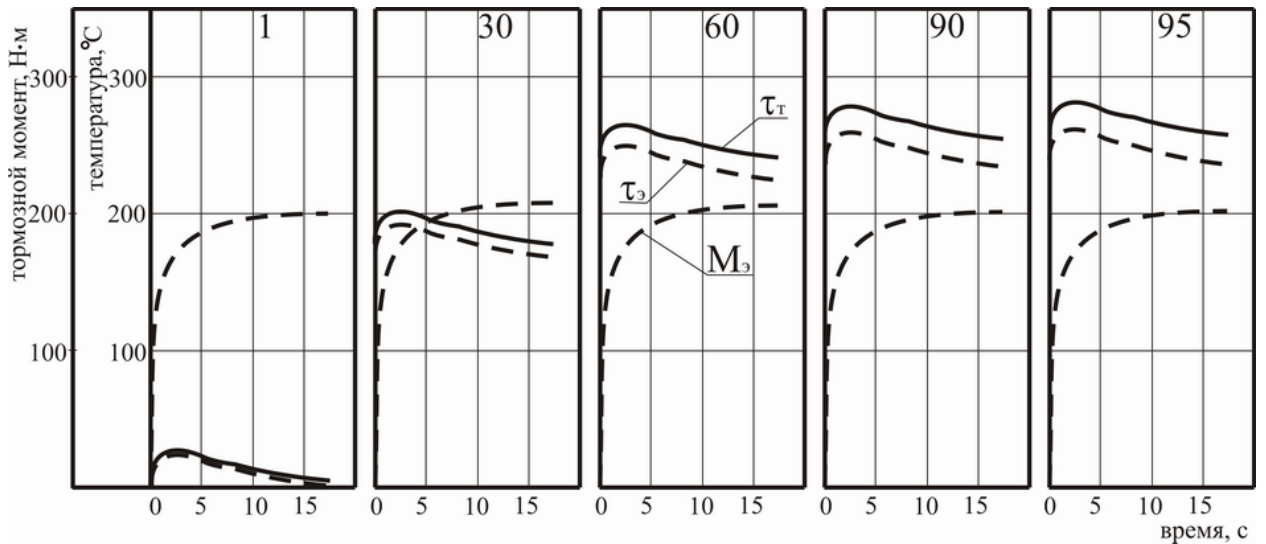
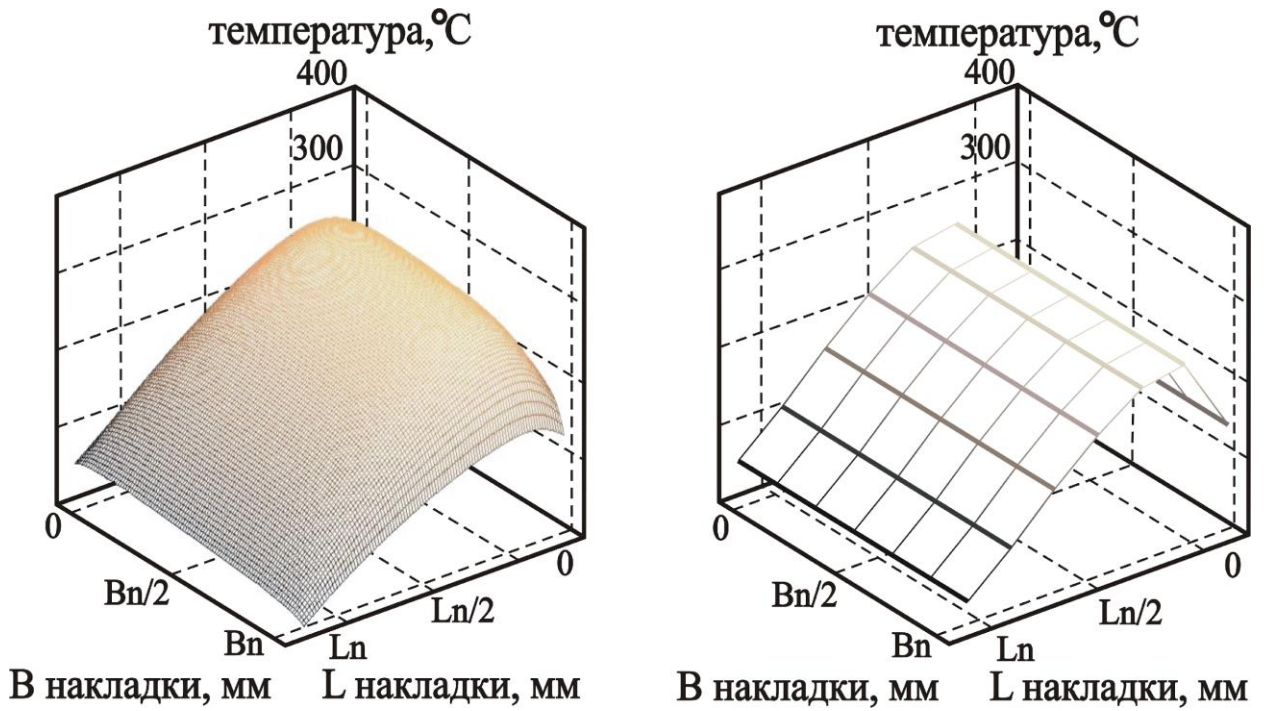


Рис. 2.8. Результаты теоретического расчета объемного температурного stanu фрикционного материала з поліпшеними теплофізичними параметрами гальмівного пристрою, що працює в повторно-короткочасному режимі;
— — — — — теоретично результати, - - - - - експериментальні результати.

ВИСНОВКИ ПО ДРУГОМУ РОЗДІЛУ

1. На підставі дослідження умов роботи вантажних автомобілів виявлені найбільш небезпечні і енергонапружені режими роботи гальмівних пристроїв.

2. Уточнена закономірність нестационарного режиму зміни температури, поверхонь гальмівного пристрою що труться, що працює в повторно-короткочасному режимі, за рахунок виділення основних процесів теплообміну, що виникають на всіх етапах одного циклу роботи гальмівного пристрою.

3. Отримано аналітичний вираз щільності теплового потоку при реальному розподілі питомої тиску в зоні контакту поверхонь тертя і вектора приросту температури уздовж поверхні тертя.

4. На основі загальної теорії теплопровідності, розроблена математична модель об'ємного температурного стану фрикційного матеріалу гальмівного пристрою, що працює в повторно-короткочасному режимі, що враховує відмінність його теплофізичних параметрів за різними напрямками.

5. Шляхом проведення експериментальних досліджень підтверджено адекватність теоретичних даних, отриманих за допомогою наведеної математичної моделі.

РОЗДІЛ 3. НОВІ ФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЮ

Технологія виробництва графітових матеріалів була розроблена більше 100 років тому А. Бюксмейстером (1878-1880) в Росії, Е. Ачесон і Г. Кастнер в США (1887-1893) [62, 63] .

Вуглець-вуглецеві композитні матеріали (ВВКМ) з'явилися в 1958 - початку 1960-х років [64, 65, 66] і є графітову або вуглецеву матрицю, зміцнений вуглецевими волокнами. У порівнянні з іншими матеріалами ВВКМ мають більш високі характеристики (рис. 3.1), стійкість до теплових ударів та інші переваги.

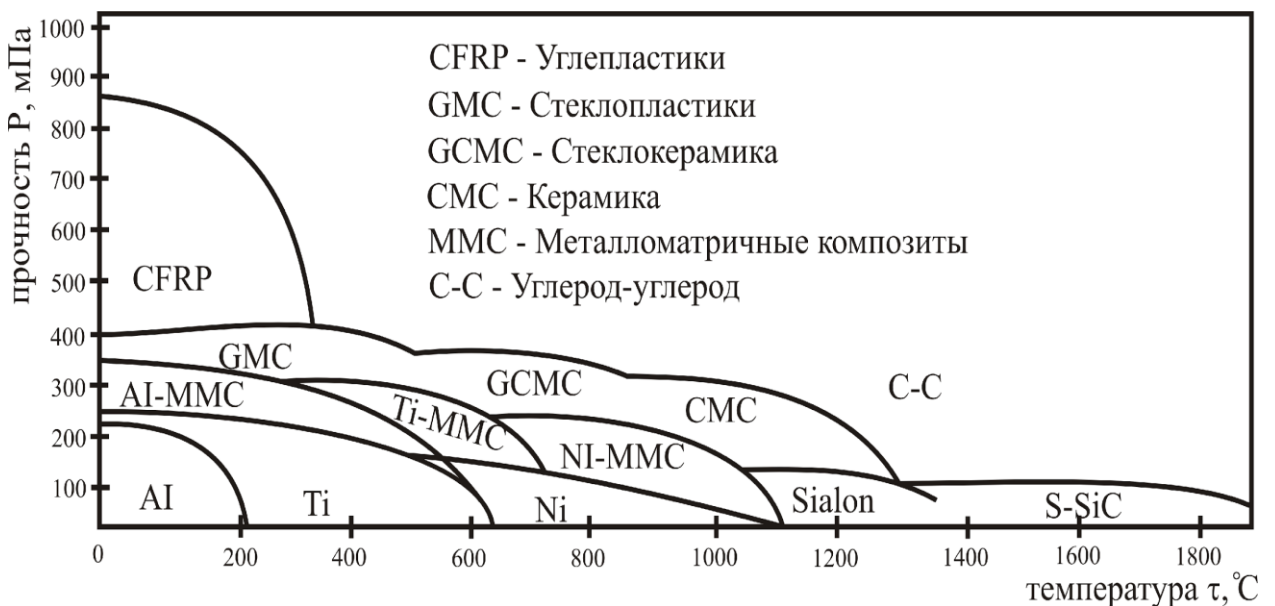


Рис. 3.1. Характеристики конструкційних матеріалів

Основними споживачами графітових матеріалів до теперішнього часу були металургія, хімічна промисловість і атомна енергетика. В даний час світові ціни графітових матеріалів знаходяться в межах від 3 \$ / кг (електродний продукція) до 40-200 \$ / кг для спеціальних конструкційних і особливо чистих матеріалів.

Обсяг світового виробництва ВВКМ в даний час складає 230-450 т / рік, ціни матеріалів 2D структур армування коливаються в межах 110-2900 \$ / кг, 3D і 4D структур -1100-3300 \$ / кг і більше.

Приблизно 81% вуглець-вуглецевих матеріалів використовуються для гальмівних дисків літаків, 18% - для ракетно-космічної техніки і тільки приблизно 1% - для всіх інших сфер застосування. При різкому спаді потреб ракетно-космічної техніки, обсяг виробництва гальмівних дисків для літаків в останні роки, після 1990 року, стійко зростає приблизно на 12% щорічно.

Більшість вуглець-вуглецевих матеріалів проводиться по рідкофазним технологіям, аналогічним технологіям традиційних графітових матеріалів і тільки порівняно невелика частина - по газофазним ізотермічним, термоградієнтним, і зі змішаних: рідкофазним-газофазним технологіям. Основним недоліком жидкофазних і ізотермічних газофазних технологій є велика тривалість технологічних процесів - від 2-х до 12 місяців.

При використанні жидкофазних методів велика тривалість процесу при виробництві досить щільних матеріалів обумовлена необхідністю багаторазового (до 6-8 разів) повторення циклів просочення вихідних заготовок на основі вуглецевих волокон рідкими смолами або пеками з подальшою їх карбонізацією або графітацією для утворення вуглецевої або графітової матриці. Ізотермічні ж методи самі по собі дуже довгі (близько 600 годин), вони теж вимагають по меншій мірі 2 - 3-х циклів, причому після кожного з них необхідно видалити щільний поверхневий шар заготовки для відкриття транспортних пір і забезпечення фільтрації газу в ущільнюючійся обсяг заготовок . Ці операції, крім витрат робочого часу, до того ж пов'язані з марною втратою матеріалу, що істотно здорожує його вартість.

В даний час загально визнано, що для отримання вуглець-вуглецевих матеріалів, гальмівних дисків для літаків і інших виробів різного напрямку найбільш перспективними є термоградієнтні газофазні методи ущільнення пористих заготовок на основі вуглецевих волокон. Вони одностадійні і досить

швидкі, дозволяють за один цикл ущільнення отримати високу щільність матеріалів, забезпечують їх високі характеристики внаслідок високого спорідненості вуглецевих волокон і осідають на них вуглецевої матриці.

З аналізу останніх вітчизняних і зарубіжних публікацій випливає, що термоградієнтні газофазні методи і метод радіально рухомої зони піролізу, який вперше були розроблений в 1961-1963 рр. в ННЦ ХФТІ проф. В. А. Гуриним, В. Ф. Зеленським та ін. [66], є найбільш економічними і перспективними методами газофазного ущільнення пористих середовищ.

3.1. Методи ущільнення пористих середовищ піроуглеродом

Дослідження по отриманню фрикційних матеріалів, гальмівних дисків або накладок до них базуються на теоретичній моделі газофазного ущільнення піроуглеродом пористих середовищ методами радіально рухомої зони піролізу [66, 68, 69, 70, 71, 72, 73]. Розгляд цих методів доцільно почати з технічних характеристик і особливостей, розроблених в ННЦ ХФТІ [74] установок, які зараз є в відділі графітових, вуглецевих і вуглець-вуглецевих матеріалів.

Основна суть термоградієнтних газофазних методів зв'язування піроуглеродом полягає в тому, що під час ущільнення в преформи виникає градієнт температури, зворотний градієнту концентрації вуглеводневого газу. Найбільш загальні закономірності термоградієнтних методів впливають з розробленою проф. В. А. Гуриним теоретичної моделі ущільнення піроуглеродом пористих преформ методом радіально рухомої зони піролізу [68, 71, 75]. Всі інші використані в роботі з виготовлення нових фрикційних матеріалів різновиди реалізації термоградієнтних методів є окремими випадками даного методу.

3.1.1. Термоградієнтні газофазні установки

Для виконання робіт з виготовлення нових фрикційних матеріалів використана установка типу АГАТ - 1.6, що працює в лабораторії ННЦ ХФТІ. Установка має систему водоохолодження, систему забезпечення природним газом, систему автоматичного контролю та управління процесом ущільнення. Також установка має систему відкачування реакційних камер на вакуум до 10^{-2} - 10^{-3} мм рт. ст. При ущільненні піровуглцем можна використовувати зріджені вуглеводні в балонах, наприклад, пропан-бутанової суміші. Процеси ущільнення можна проводити при атмосферному або надмірному тиску вуглеводнів і при низьких, до 5-10 мм рт. ст., тисках. Установка дозволяє реалізовувати не тільки термоградієнтні, а й ізотермічні методи газофазного ущільнення, проводити відпал зразків і виробів при температурах до 3000 °С і вище в вакуумі або в інертних газах. Зовнішній вигляд і принципова схема установки наведені на рис. 3.2 і 3.3.

Установка має наступні технічні характеристики: вид електричної напруги - змінний, максимальна потужність-250 кВт, напруга на нагрівачі - до 40 В, сила струму на нагрівачі (максимальна) - 6000 А. Розміри робочого об'єму камери: діаметр - 600 мм, висота - 1400 мм, отвір дверей 320x1070 мм.

Для компенсації термічного розширення преформ при термоградієнтном ущільненні або їх відпалі резистивним нагріванням в установці нижній токопідвід виконаний рухомим.



Рис. 3.2. Зовнішній вигляд установки типу АГАТ-1.6

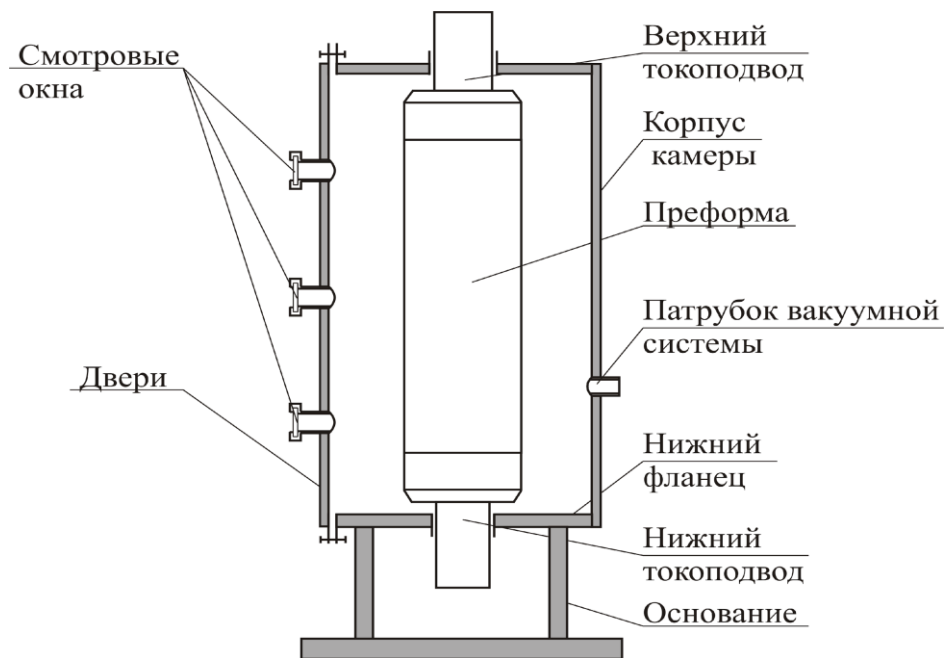


Рис. 3.3. Принципова схема установки типу АГАТ-1.6

3.1.2. Теоретична модель термоградієнтних газофазних методів зв'язування піровуглецем порошкових і волоконних наповнювачів

Схематичний вид преформи для зв'язування піровуглецем порошкових наповнювачів методом радіально рухомої зони піролізу представлений на рис. 3.4.

Необхідний порошок або суміш порошків насипається в форму і встрясається на вібростенді до необхідної щільності. Заповнена порошком форма (преформа - пориста заготовка для ущільнення) встановлюється в реакційну камеру установки на нижній токопідвід. Рухомим нижнім або верхнім струмопідвідний молибденовий стрижень піджимається до утворення надійного електричного контакту з верхнім струмопідвідним стрижнем установки.

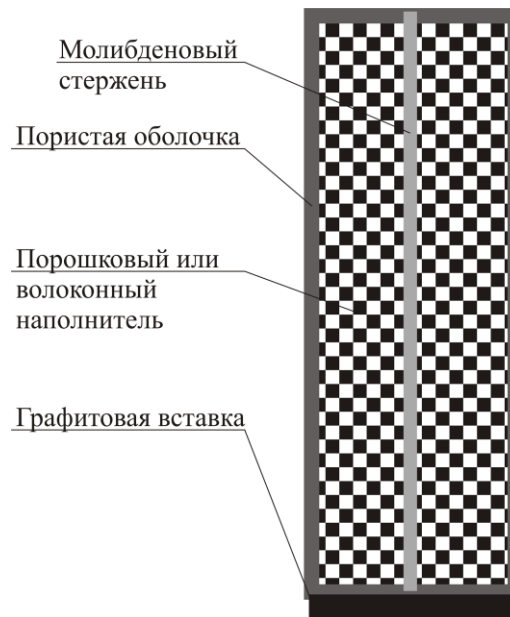


Рис. 3.4. Схематичний вигляд преформи для зв'язування піровуглецем порошкових або волоконних наповнювачів методом радіально переміщується зони піролізу

Через герметичний вхід в камері установки в преформу по її радіусу вставляється заварений з одного кінця кварцовий капіляр з термопарою так, щоб він торкався молібденового стрижня, і спай термопари був якомога ближче до нього. Незасвідчений кінець капіляра знаходиться за кордоном камери, термопара працює в атмосфері повітря, її можна переміщати по радіусу преформи, камери установки або змінювати протягом процесу. Камеру установки закривають, заповнюють вуглеводневим газом, в потоці якого молібденовий стрижень резистивної нагрівають до необхідної температури (в більшості випадків до $T_k = 900 - 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Суть методу полягає в тому, що зазначена $T_{до}$ реалізується на поверхні молібденового стержня і в вузькій зоні (зоні піролізу) навколо стержня. Реакції осадження піровуглецю на поверхні частинок порошку проходять тільки в зоні піролізу. В іншому обсязі по радіусу преформи температура нижче порогової температури осадження піровуглецю. Підтримуючи на термопарі необхідну $T_{до}$, її переміщують по радіусу преформи з необхідною швидкістю до зовнішньої поверхні і пов'язують піровуглецем весь порошок-наповнювач до необхідної щільності.

На відміну від ізотермічних методів, протягом усього процесу ущільнення транспортні пори преформи залишаються відкритими. Пориста оболонка преформи і зовнішні шари наповнювача зв'язуються піровуглецем в останню чергу. Вуглеводневий газ вільно дифундує в зону піролізу, а утворюється водень - в зворотному напрямку. Завжди по радіусу ущільнючого пористого середовища існує градієнт температури, зворотний по напрямку до градієнту концентрації вуглеводневого газу.

Метод виключно енергозберігаючий. Тепло випромінює тільки зовнішня поверхня преформи, а протягом усього процесу вона досить холодна. Лише в кінці процесу температура поверхні досягає $T_k = 900 - 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Теоретична модель цього методу в першу чергу повинна відповісти на питання, з якою швидкістю необхідно переміщати зону піролізу, щоб

отримати необхідну (в більшості випадків - максимально можливу) щільність матеріалу.

Завдання вирішена шляхом розгляду в циліндричних координатах систем рівнянь взаємної дифузії молекул "вуглеводневий газ - водень" в умовах наявності градієнта температури у напрямку дифузії і при граничних умовах. Граничними умовами можна вважати наступні: на зовнішній поверхні преформи концентрація вуглеводневого газу дорівнює 100%, а водню - 0%. Приймалося також до уваги те, що на протязі процесу температура на поверхні преформи постійно зростає, тобто концентрація вуглеводневого газу є функція температури поверхні. Пропускаючи рішення систем рівнянь взаємної дифузії зазначених газів, наведемо отриману кінцеву формулу для швидкості переміщення зони піролізу [62]:

$$V = \frac{\eta \xi \delta D_0 n_0}{\Delta \rho T_0} \cdot \frac{(T_k + K r_1)}{r_1(T_k - K R + K r_1) \cdot \left(\frac{T_k + K r_1}{T_k - K R + r_1} + \ln \frac{RT_k}{(T_k - K R + K r_1) \cdot r_1} - \frac{T_k + K r_1}{T_k} \right)}, \quad (3.1)$$

де V - необхідна швидкість руху зони піролізу в заданій точці по радіусу форми;

η - питомий вміст вуглецю в молекулі вуглеводню, наприклад, 0,75г / см³ для СН₄;

δ - відкрита пористість ущільнюваного середовища;

ξ - коефіцієнт скважності ущільнюваного середовища;

D_0 - коефіцієнт взаємної дифузії вуглеводневого газу і водню при 273К і 760 мм рт. ст., (0,6902 м² с⁻¹ для газів СН₄ - Н₂);

n_0 - концентрація вуглеводневого газу в реакційному об'ємі камери при 273К і 760 мм. рт. ст. (7,14 · 10⁻⁴ г · см⁻³ для СН₄);

$\rho\Delta$ - необхідний приріст щільності ущільнюваного середовища (різниця між кінцевою щільністю після ущільнення k_p і початкової щільністю ρ_0);

T_0 - 273 К;

T_k - критична температура в зоні піролізу (1173-1273 К);

$r1$ - координата зони піролізу;

R - зовнішній радіус ущільнюваної форми;

K - градієнт температури по радіусу ущільнюваної форми на відрізку радіуса $r1 - R$.

Як можна бачити, всі аргументи в цьому рівнянні, крім градієнта температури K , є табличними даними або можуть бути визначені загальнодоступними експериментальними методами. Наприклад, градієнт температури Do залежить від діаметра преформи, властивостей наповнювача (теплопровідність, електропровідність і т. П.), Але його завжди можна виміряти, переміщуючи термопару по радіусу преформи.

При використанні методу виникає також важливе питання прогнозування максимально можливої щільності матеріалів або виробів з них. На практиці віно вирішується експериментальним шляхом. Для цього необхідно провести кілька експериментів з різними швидкостями переміщення зони піролізу, хоча такий шлях досить трудомісткий і дорогий.

У роботах [71, 75] запропоновано рівняння, яке дозволяє розрахувати максимально можливу кінцеву щільність матеріалів $k M^p$ в залежності від питомої змісту і пікнометричної щільності наповнювача:

$$\rho_k^m = \left(1 - \frac{C_H}{\rho_H}\right) \cdot \rho_{puc} \cdot \eta + C_H, \quad (3.2)$$

де ρ_k^m - максимально можлива теоретична кінцева щільність вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу, г / см³;

C_n - питомий вміст наповнювача в преформі, г / см³;

ρ_n - пікнометрична щільність наповнювача, г / см³;

ρ_{puz} - пікнометрична щільність піровуглецевої матриці, г / см³;

η - максимально можливий ступінь заповнення піровуглецем пустот в преформі при газофазному ущільненні.

Всі параметри, які входять в рівняння (3.2), легко розраховуються або визначаються експериментально.

Максимально можливий ступінь заповнення пустот піровуглецем η визначалася відповідно до кластерної теорією порога проникнення [77]. Відповідно до цієї теорії, в пористих середовищах пори перестають з'єднуватися між собою, коли загальна їх зміст стає менше 15-17%. Таким чином, коефіцієнт заповнення пустот (пор) піровуглецем не може бути більшим, ніж $\eta = 0,85-0,83$. У розрахунках приймалося середнє значення $\eta = 0,84$.

3.2. Розробка і виготовлення нових композиційних матеріалів на основі вуглець-вуглецю для фрикційних накладок гальмівних пристроїв

Одними з найпростіших структур армування вуглець-вуглецевих композитних матеріалів можна вважати 2D структури. Найчастіше ці структури виготовляються на основі вуглецевих тканин (рис. 3.5).

Використовувалися два основні методи формування 2D преформ - намотування вуглецевої тканини на оправку - нагрівач (тканинонамоточна структура) і пошарова викладка тканини в форми (тканиновикладена структура армування). При всій своїй простоті такі структури мають достатні міцності як в напрямку перпендикулярно верствам тканини, так і вздовж них. У таб. 3.1 представлені

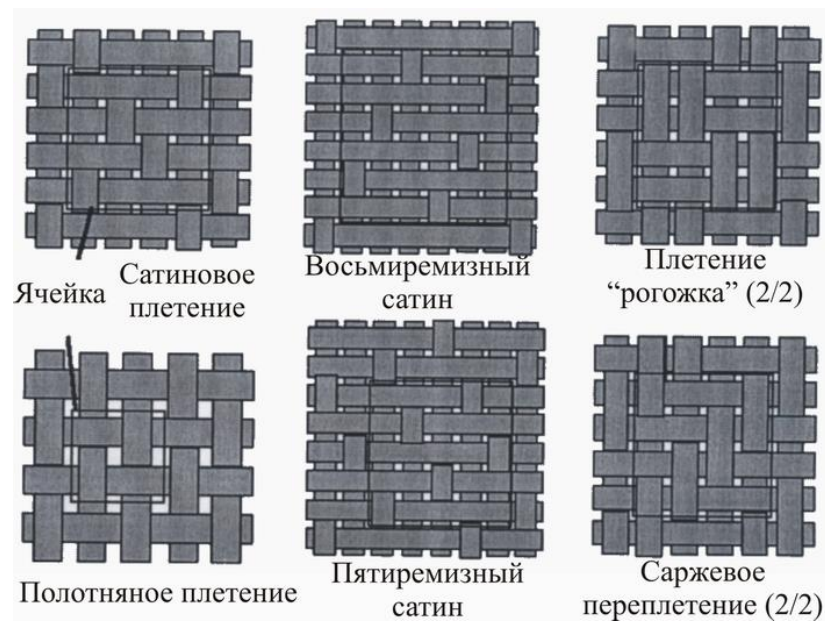


Рис 3.5. Геометрія плетіння тканини

результати дослідження кордону міцності при стисненні для вуглець-вуглецевих матеріалів тканиновикладної структури армування на основі вуглецевої тканини Урал-Т22. На матеріалі досліджена межа міцності при стисненні в напрямку як уздовж шарів, так і впоперек. Дослідження проводили на розривній машині Р-05 в ННЦ ХФТІ.

Таблиця 3.1

Характеристики міцності вуглець-вуглецевих матеріалів

№	Маса, г	Довжина, мм	Діаметр, мм	Руйнівне навантаження, кг	Міцність, МПа	Щільність, г/см ³
Паралельно шарам тканини						
1	1,19145	9,90	9,90	1510	192,32	1,56
2	1,1948	10,00	9,95	1480	186,61	1,54
3	1,20865	9,95	9,90	1300	165,57	1,58
Перпендикулярно шарам тканини						
1	1,1912	9,95	9,90	1640	208,87	1,56
2	1,18095	9,95	9,90	1380	175,76	1,54
3	1,2105	9,90	9,90	1610	205,05	1,59

Як можна бачити з наведеної таблиці, суттєвої різниці в міцності матеріалів уздовж і впоперек шарів не спостерігається. На наш погляд, такі структури можуть бути успішно застосовані в гальмівних системах різного призначення.

На практиці чисті тканиновикладні структури використовують досить рідко. Це обумовлено, в першу чергу, труднощами процесу їх ущільнення. Для запобігання розшарування преформ під час ущільнення необхідно виготовляти спеціальну технологічну оснастку для фіксування преформи. Інший шлях - прошивка шарів вуглецевої тканини вуглецевою ниткою для їх фіксації. Формально такі преформи мають уже структуру 3D. Однак, беручи до уваги, що третя складова досить незначна, в порівнянні з двома основними, отримані матеріали показують властивості, характерні для класичних 2D структур. Розроблені структури отримали робочу назву "тканиновикладні прошивні структури (ТВП)".

Для проведення досліджень щодо можливості використання вуглецевих матеріалів в гальмівних пристроях транспортних машин було виготовлено дослідні зразки накладок у вигляді сегментів з внутрішнім радіусом 100 мм, довжиною дуги 130 мм, шириною 90 мм і товщиною ~ 10мм. Ескіз гальмівної накладки показаний на рис. 3.6.

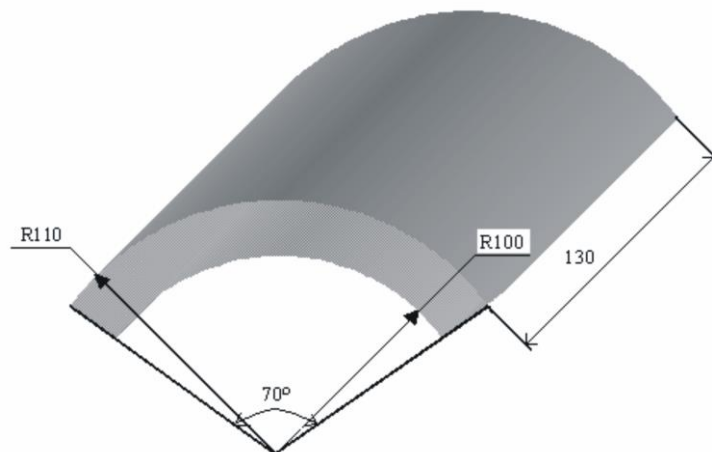


Рис.3.6. Ескіз гальмівної накладки для випробувань на інерційному стенді.

Для оцінки впливу вихідного матеріалу армування на властивості композиту були виготовлені два типи матеріалів: вуглець-вуглецевий композиційний матеріал і композиційний матеріал на основі азбестового

тканини. Вибір азбестового тканини обумовлений тим, що азбестові фрикційні матеріали раніше добре зарекомендували себе, і мають досить широке поширення, а головне - для порівняння з новими матеріалами.

Для виготовлення преформ були виготовлені три оправлення-нагрівача з промислового графіту у вигляді кілець діаметром 180x200 мм і довжиною 340 мм кожне. При виготовленні гальмівних накладок як волоконного наповнювача використовувалася вуглецева тканина УРАЛ-ТМ4 на основі віскози. За результатами вихідного контролю діаметр вуглецевих волокон в цій тканини становить 5-7 мкм, пікнометричним щільність вуглецевих волокон - 1,2 1,4 г / см³. Товщина тканини була в межах 1,5-2 мм, поверхнева щільність - 1230 ± 50 г / м², масова частка вуглецю - не менше ніж 99%. Використовувалася також азбестова тканина марки АО-2 товщиною приблизно 2 мм, поверхневою щільністю 1,2 кг / м².

Із зазначених тканин були відрізані стрічки шириною по 340 мм потрібної довжини - одна з УРАЛ-ТМ4 і дві з АТ-2. Стрічку з УРАЛ-ТМ4 і одну стрічку з азбестового тканини АТ-2 для забезпечення щільної намотування на оправці-нагрівачі попередньо замочили у воді з невеликою добавкою (близько 2% об.) клею ПВА і витримали в розчині протягом 24-х годин. Зазначені стрічки намотали і ретельно накатали на оправлення-нагрівачі. Другу стрічку з АТ-2 намотали на оправлення-нагрівач в сухому стані. Оправлення-нагрівачі з намотаними тканинами висушили в сушильній шафі при 100-120 ° С до постійної маси і вирахували питомий вміст наповнювача в кожній преформі. Щільність намотування мокрих стрічок з УРАЛ-ТМ4 і АТ-2 виявилася однаковою і склала 0,57 г / см³. Щільність намотування сухий стрічки АТ-2 була трохи менше - 0,51 г / см³. Для тканини УРАЛ-ТМ4 наведена щільність відповідає вмісту вуглецевих волокон в кінцевому матеріалі після ущільнення наповнювача піровуглецем. Щодо вмісту наповнювача в АТ-2, то тут слід взяти до уваги, що при нагріванні до

900-1000 ° С азбестова тканина АТ-2 втрачає у вазі до 31% за рахунок втрати летких складових.

Отримані таким чином заготовки в установці піролізу АГАТ- 1,6 встановлювалися послідовно один на одного і ущільнювалися в потоці природного газу методом радіально рухомої зони піролізу. Швидкість руху зони піролізу була 0,25 мм / год, температура в зоні піролізу - 1000 ° С. Загальна тривалість процесу склала 54 години.

Після закінчення процесу складання вийняли з установки, пов'язані піровуглецем кільця (рис 3.7) з УРАЛ-ТМ4 + рос і АТ + рос (умовні коди отриманих матеріалів) зняли з оправок - нагрівачів. Справедливо зазначити, що кільце АТ + рос сухий намотування мало одну тріщину вздовж висоти, а кільце з АТ + рос мокрою намотування - кілька тріщин уздовж і поперек висоти. Ці тріщини утворилися при охолодженні збірки від 1000 ° С до кімнатної температури внаслідок відмінності коефіцієнтів термічного розширення графіту, з якого виготовлені оправлення-нагрівачі, і матеріалу АТ + рос.



Рис. 3.7. Зовнішній вигляд кільця з вуглець-вуглецевого матеріалу після механічної обробки

З отриманих заготовок були виготовлені гальмівні накладки. За результатами тестування уявна густина гальмівних накладок з УРАЛ ТМ-4 + рос була в межах 1360-1380 кг / м³, відкрита пористість 11,34-12,26%, пікнометричним щільність 1550-1560 кг / м³. Ці ж показники для накладок з АТ + рос були: 1440-1460 кг / м³, 18,36-18,60% і 1760-1790 кг / м³, відповідно. Більш висока уявна і пікнометрична щільність матеріалу АТ + рос пов'язана з великою питомою вагою азбестових волокон в порівнянні з вуглецевими.

Зовнішній вигляд гальмівних накладок представлений на рис 3.8. На рис. 3.9 показана мікроструктура отриманих матеріалів в площині тертя.



Рис 3.8. Зовнішній вигляд готової гальмівної накладки

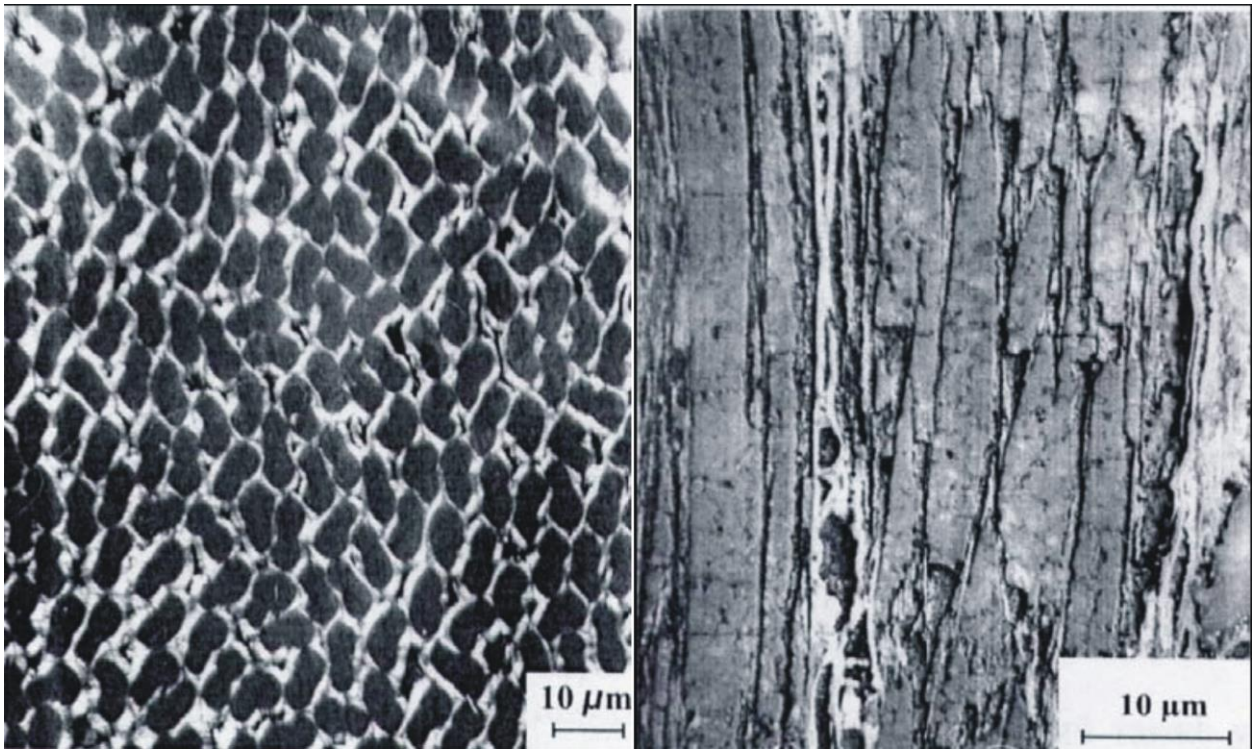


Рис. 3.9. Структура матеріалів УРАМ-ТМ4 + рос (зліва) і АТ + рос (праворуч)

3.3. Розробка методів поліпшення триботехнічних властивостей нових фрикційних матеріалів

Як показали експериментальні дослідження вуглець-вуглецевих фрикційних матеріалів, величина коефіцієнта тертя при температурах в діапазоні 0 - 100 °С недостатня для їх використання в гальмівних пристроях автомобілів.

Основною метою подальших досліджень є підвищення коефіцієнта тертя вуглець-вуглецевих матеріалів при температурах в діапазоні 0 - 100 °С і його стабілізація в широкому діапазоні температур. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми може бути створення вуглець-вуглецевих матеріалів з фрикційними (абразивними) добавками.

В якості абразивних добавок використовувалися порошки аморфного бору (розміри частинок менше 1 мкм), оксиду алюмінію (Al_2O_3) і карбиду бору

(В₄С) двох марок: дрібнозернистий (умовний код В₄С-S) і крупнозернистий (умовний код В₄С-L). Фракційний склад порошоків представлений в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Фракційний склад порошоків Al₂O₃ і В₄С

Найменування	Порошок	0-50 мкм.%Мас.	50-100 мкм.%мас.	100-160 мкм.%Мас.	160-200 мкм.%мас.	200-315 мкм.%мас.
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	115,59	73,75	6,66	0	0
Дрібно-зернистий	В ₄ С-S	36,20	63,60	0,20	0	0
Крупно-зернистий	В ₄ С-L	0,28	0,36	12,52	74,78	12,06

В якості волоконних наповнювачів використовувалася віскозна вуглецева тканина марки УРАЛ-Т22. Згідно ГОСТ 28005-88 масова частка вуглецю в тканини Урал-Т22 не менш 99%, її товщина знаходиться в межах 0,4-0,6 мм, поверхнева щільність - 290 ± 30 г / м².

Для економії матеріалів і здешевлення технології отримання нових фрикційних матеріалів на основі вуглець-вуглецю була вдосконалена технологія їх отримання, що полягає у виготовленні нових матеріалів "в розмір".

Перш за все, були виготовлені шаблони для формування заготовок гальмівних накладок за принципом "в розмір або майже в розмір". Зовнішній вигляд шаблону і його ескіз показані на рис. 3.10.

Шаблон являє собою сталеву прямокутну рамку з внутрішніми розмірами 180x110x17 мм і дві сталеві решітки з прорізами, які вільно входять в рамку.

Запропонована конструкція шаблону дозволяє виготовляти одночасно заготовку на дві натурних гальмівних колодки гальмівного пристрою ТКТГ-200. Крім того, розміри заготовки дають можливість вирізати ще й зразки для проведення необхідних лабораторних досліджень.

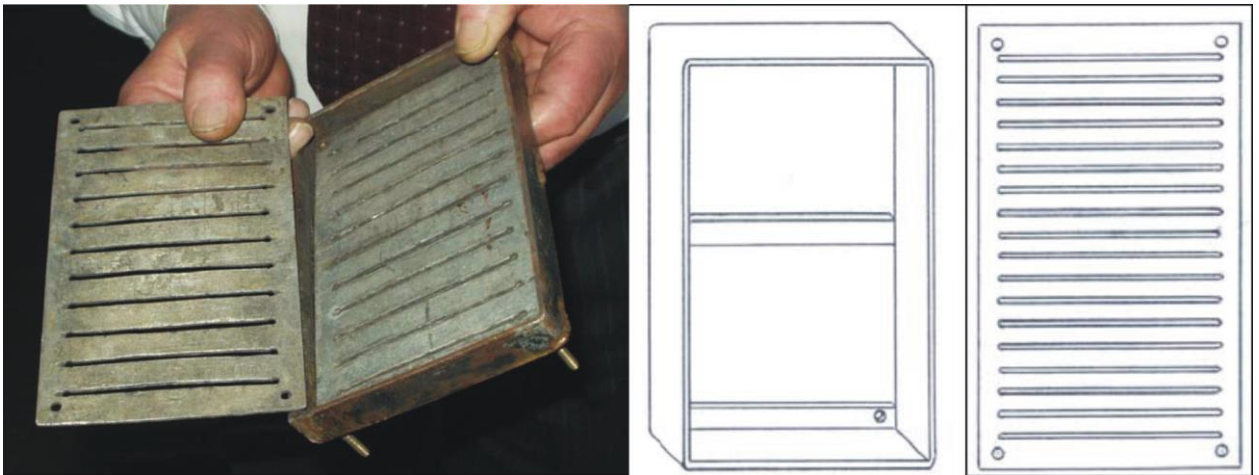


Рис. 3.10. Зовнішній вигляд шаблону і його ескіз

За допомогою шаблону були виготовлені такі заготовки нових фрикційних матеріалів.

Заготівля 1. УРАЛ-Т22 + V_4C крупнозернистий (УТ22-Вс1). З вуглецевої тканини УРАЛ-Т22 нарізали 13 листів довжиною 181 мм і шириною 109 мм. Їх загальна вага був 80,6 м Всі листи витримали в воді з добавкою 5% клею ПВА на протязі не менше однієї доби.

На дно прямокутної рамки шаблону поклали одну решітку. Грати закрили тонким ($\delta = 0,15$ мм) паперовим листом. На паперовий лист поклали один вологий лист вуглецевої тканини. На тканину насипали 20 г крупнозернистого порошку V_4C і ретельно шпателем рівномірно розтерли його по всій поверхні листа вуглецевої тканини. При цьому порошок досить жадібно вбирав воду, тому періодично доливалася чиста вода і постійно підтримувалася сметаноподібна консистенція порошку. Було видно, що порошок U_4C досить добре втирається в порожнечі між вуглецевими нитками тканини.

Після цього поклали наступної лист вуглецевої тканини, насипали порошок U_4C і рівномірно його розтерли. Таким чином, цю операцію повторили 13 разів. На останній лист вуглецевої тканини поклали паперовий лист і металеву пластинку. У лещатах пластинки стиснули із зусиллям 5000 Н

і в такому стані збірку витримали 20 годин. За цей час зайва вода витекла з збірки. Вода була прозорою, частинки V_4C не вимивалися. Збірку вийняли з лещат і розібрали. Таким чином, отримали заготовку шаруватої 2D структури армування з 13-ти листів вуглецевої тканини і 13-ти шарів порошку V_4C . Легко підрахувати, що в заготівлі було 80,6 г вуглецевої тканини і 260 г порошкоподібної V_4C . Товщина отриманої заготовки з паперовими листами становила 16,5 мм, її ширина і довжина точно відповідали шаблоном. Наведені дані достатні для розрахунків щільності і фазового складу (вмісту вуглецевих волокон і V_4C) з похибкою не більше 3-5%. Отриману заготівлю разом з паперовими листами упаковали в герметичний поліетиленовий пакет і зберігали у вологому стані до операції ущільнення піровуглецем.

Заготівля 2. УРАЛ-Т22 + V_4C дрібнозернистий (УТ22-BCS) аналогічна першій заготівлі, хоча карбід бору брали дрібнозернистий (див. Табл . 3.2, V_4C -S). Заготівля має 17 аркушів вуглецевої тканини, замочених в 13% водному розчині цукру, і 17 шарів V_4C по 14 г кожен. Заготовка не прошивалася, структура армування 2D.

Заготівля 3. УРАЛ-Т22 + Al_2O_3 (УТ22-AT). Фракційний склад Al_2O_3 наведено в табл. 3.2. Заготівля має 16 аркушів вуглецевої тканини, замочених і витриманих в 13% водному розчині цукру, і 15 шарів порошку Al_2O_3 по 20 г кожен, всього 300 м Структура армування 2D, товщина заготовки 20 мм.

Заготівля 4. УРАЛ-Т22 + мідний дріт (УТ22-Cu). Заготівля має 16 аркушів вуглецевої тканини, попередньо замочених в 13% водному розчині цукру. В якості другого компонента наповнювача використаний мідний дріт діаметром 0,15 мм. З нього нарізали відрізки довжиною 182 мм і 110 мм (відповідно довжині і ширині шаблону). У шаблоні на перший лист вуглецевої тканини поклали і по можливості рівномірно розподілили по всій площі тканини уздовж її довжини 17 г дроти завдовжки 182 мм. Зверху на провід поклали другий лист вуглецевої тканини. На цей лист поклали і рівномірно розподілили поперек шаблону також 17 г дроти завдовжки 110 мм, тобто

зволікання першого і другого шару орієнтовані у взаємно перпендикулярних напрямках. І таким чином потім все 16 шарів вуглецевої тканини і 15 шарів проводу (на останній лист вуглецевої тканини провід не наносили). Волога заготовка після витримки в лещатах мала товщину 14 мм і вагу 454,3 м

Заготівля 5. УРАЛ-Т22 + бор аморфний (УТ22-В). Заготівля аналогічна першій, має 12 аркушів вуглецевої тканини і 11 шарів бору аморфного з розміром частинок менш 1 мкм. Маса кожного шару тканини становить 6,2 г, шару бору аморфного - 10 м. Заготівля має 3D структуру армування, її прошили вуглецевої ниткою Урал -НШ в два шари з кроком 15x15мм.

Для ущільнення заготовок піровуглецем використовували оправлення-нагрівач у вигляді графітового кільця діаметром 180x200 мм і довжиною 340 мм. Заготовки виймали з поліетиленових пакетів, знімали паперові листи і мали на поверхні циліндричного нагрівача. Вологі заготовки легко гнулися і їх досить щільно притиснули до поверхні оправлення-нагрівача. Притиснуті заготовки додатково обмотали двома листами азбестового тканини марки АО-2.

Процес ущільнення вели з використанням методу радіально рухомої зони піролізу. Температуру в зоні піролізу тримали 1000 ° С, зону піролізу переміщали зі швидкістю $V = 0,25$ мм / год.

Ущільнені піровуглецем заготовки на токарному верстаті алмазними дисками відшліфували за внутрішніми і зовнішніми радіусами. Від кожної заготовки відрізали зразки для досліджень. При економному розкрої з кожної заготовки були отримані дві гальмівні накладки і кілька невеликих зразків-свідків для проведення необхідних лабораторних досліджень.

На натурних накладках і дослідних зразках була визначена щільність і відкрита пористість матеріалів. Результати наведені в табл.3.3.

Слід зазначити, що матеріали дуже тверді і їх механічна обробка, особливо шліфування робочої поверхні, пов'язана з деякими технічними

проблемами. Для якісної шліфування довелося вибрати порошки з найбільш твердого в Україні штучного алмазу з розміром частинок 415-630 мкм, а в якості зв'язки використовувати нікель.

Таблиця 3.3

Щільність і пористість композитів з абразивними добавками

№ заготовки	Склад преформи	Маса заготовки, г	Щільність, г / см ³		Відкрита пористість, %
			Уявна	пiкнi.	
1	Тканина Урал-Т22 + В ₄ С-L	1,68 1,93 12,79 2			
203,95	Тканина Урал-Т22 + В ₄ С-S	249,95	1,65	1, 83	9,80
3	Тканина Урал-Т22 + Al ₂ O _{135,70 1,73} 1,91 9,31 4				
3	Тканина Урал-Т22 + Cu	258,46	2,14	2,77	22,60
5	Тканина Урал-Т22 + В	143,68	1,48	1,66	10,64

Ріжучі кромки алмазних дисків були завалені з радіусом 2-3 мм. Такі диски діаметром 160-200 мм і товщиною ріжучої кромки 15-20 мм дозволили успішно вирішити проблему шліфування при 5000 - 7000 об / хв.

На рис. 3.11 представлена структура четвертого композиту в площині тертя.



Рис.3.11. Структура поверхні тертя композиту, модифікованого мідним дротом (Cu)

З наведеної структури видно, що на поверхні тертя фрагменти мідного дроту, розміщуються не тільки паралельно, а й перпендикулярно поверхні тертя. Така орієнтація мідного дроту може здатися дивною, беручи до уваги, що зволікання були довгі (182 мм і 110 мм) і викладалися паралельно поверхні тертя. Все стає зрозумілим, якщо врахувати, що при пресуванні в шаблоні провід прогнувся по синусоїді навколо вуглецевих ниток. Таким чином, частково утворилося, безсумнівно - корисне, третій напрямок армування композиту мідним дротом. Композит має перехідну структуру армування між 3D і 2D.

В процесі випробувань по різниці температур на поверхні тертя і з тильної сторони гальмівних накладок була зроблена оцінка теплопровідності композитів. Розрахунки показали, що коефіцієнт теплопровідності композитів знаходиться в межах 10-70 Вт / (м·К) [73-75]. Теплопровідність композитів значно вище, ніж стандартних фрикційних матеріалів. Наприклад, для таких

стандартних матеріалів, як V-BKS і ТІП $\lambda = 1,3$ і $\lambda = 0,8 \dots 3,3$ Вт / (м·К). Висока теплопровідність є ваговою перевагою нових композитів в порівнянні зі стандартними фрикційними матеріалами. Підвищення теплопровідності матеріалу гальмівних накладок є одним з вирішальних чинників для зниження температурних напружень на контактній поверхні, поліпшення теплообміну і істотного зниження можливих пошкоджень поверхні тертя контртіла і матеріалу накладок. Ці якості особливо важливі для гальмівних накладок дискових гальм швидкісних поїздів, в яких температура на контактній поверхні тертя досягає 800-1000 ° С.

ВИСНОВКИ ПО ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛУ

1. Розроблено технологічні схеми виготовлення вуглець-вуглецевих композитних матеріалів на основі віскозних вуглецевих тканин з використанням термоградієнтних газофазних методів, які мають високі характеристики, як уздовж волокон, так і поперек їх.

2. Запропоновано і апробовано механізми регулювання величини коефіцієнта тертя вуглецевих композитних матеріалів. Для підвищення коефіцієнта тертя використовували абразивні добавки (B_4C , Al_2O_3), мідний дріт і аморфний бор. Застосування таких добавок дозволяє підвищити коефіцієнт тертя матеріалів при низьких температурах, майже не змінюючи його при високих. Використання добавок аморфного бору дозволяє стабілізувати величину коефіцієнта тертя вуглецевих композитних матеріалів в широкому діапазоні зміни температури контактної поверхні.

3. Запропоновано модель для прогнозування кінцевої щільності вуглецевих композитних матеріалів, отриманих з використанням газофазних методів, в залежності від пікнометричної щільності і питомої змісту наповнювача в преформу.

4. Проведені дослідження показали можливість використання розроблених вуглець-вуглецевих композитних матеріалів в якості фрикційних елементів гальмівних систем автомобілів.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ ФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1. Загальні положення

Дипломна робота присвячена підвищенню ефективності гальмування автомобільного транспорту застосуванням нових фрикційних композитних матеріалів на основі вуглець-вуглецю з піроуглеродних матрицею і дослідженню їх триботехнічних характеристик.

З вищесказаного випливає необхідність вивчення впливу основних факторів на зниження сталих температур в зоні контакту фрикційних елементів.

Наявність залежності між температурою в контактній зоні пари тертя, часом, способом охолодження, режимом роботи зумовило вирішення задачі по встановленню загальних залежностей зв'язку з цим.

У результаті викладених вище передумов був запропонований новий вуглець-композитний фрикційний матеріал з підвищеною теплопровідністю, теплоємністю і тепловіддачею. Поліпшення теплофізичних характеристик фрикційних матеріалів гальмівних пристроїв поставило питання про порівняльному дослідженні якісної і кількісної сторони теплообміну гальмівних пристроїв з відомими і новими фрикційними матеріалами.

І, нарешті, застосування нового вуглець-композитного фрикційного матеріалу поставило задачу якісного дослідження фрикційних властивостей і кількісного дослідження зносу поверхонь, що труться гальмівного пристрою з новим фрикційним матеріалом.

4.2. Об'єкти випробування

Питання вивчення працездатності натурних фрикційних вузлів гальмівних пристроїв і муфт знайшли відображення в ряді робіт М. П. Александрова [16, 29], І. В. Крагельського [13, 20, 77], Л. М. Пижевiча [54], А. В. Чичинадзе [4, 15, 78, 79, 80], А. І. Вольченко [81, 82], Г. С. Гудзя [83, 84], Ф. К. Германчука [10], В. Н. Старченко [85, 86, 87, 89, 90], В. Н. Федосєєва [36, 51, 91] та інших авторів [92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104]. У цих роботах дана оцінка відповідності результатів експлуатаційних і стендових випробувань в ідентичних умовах. Був зроблений основний висновок: експериментальне дослідження гальмівних пристроїв і фрикційних матеріалів на лабораторних стендах, що імітують роботу натурального механізму, добре відповідають дійсним експлуатаційним режимам. З цієї причини при натурних випробуваннях вузлів тертя гальм були використані колодкові гальма, встановлені на гальмівному інерційному стенді для випробування гальмівних пристроїв.

У сучасних конструкціях автомобилів широке застосування барабанні двоколодкові гальмівні пристрої. Цим і пояснюється вибір гальм такого типу в якості об'єктів випробування.

4.3. Експериментальна установка і проведення випробувань

Під час проведення експериментальних досліджень записувалися зміни наступних величин:

1. Гальмівний момент створюваний гальмівним пристроєм.
2. Частота обертання гальмівного шківa.
3. Момент подачі і відключення живлення гидротолкателям.
4. Кут повороту гальмівних стійок.
5. Температура поверхонь, що труться гальмівного пристрою.

Експериментальні дослідження процесу гальмування проводилися на лабораторному стенді, розташованому на кафедрі автомобілі Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля [88]. Стенд призначений для випробування різних конструкцій гальмівних пристроїв і контролю їх вихідних параметрів. Загальний вигляд і схема експериментальної стендової установки наведені на (рис 4.1 і 4.2).

Гальмо 1 (рис. 4.2) встановлено на хиткій рамі, за допомогою клиноременній передачі 2 вал коробки передач 3 з'єднаний з масою яка обертається 4, яка складається з дисків і дозволяє змінювати момент інерції від 8 до 60 кг·м² приєднанням до валу або від'єднанням від нього дисків махової маси, махова маса наведена до відповідності до вантажного автомобіля. Обертальна маса приводиться у рух двигуном 5 який за допомогою клиноріменній передачі приводить у рух вал коробки передач 3. Все обладнання стенду змонтовано на станині 6.

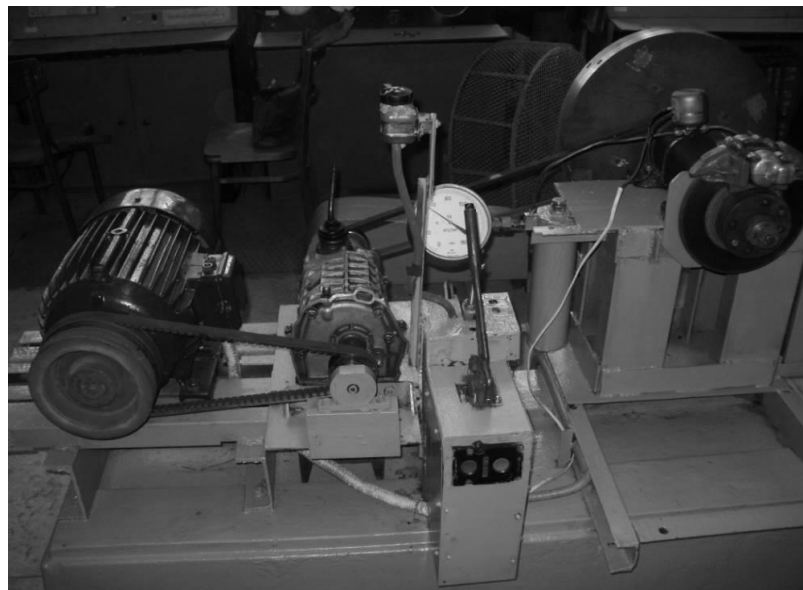


Рис 4.1. Загальний вигляд експериментальної стендової установки

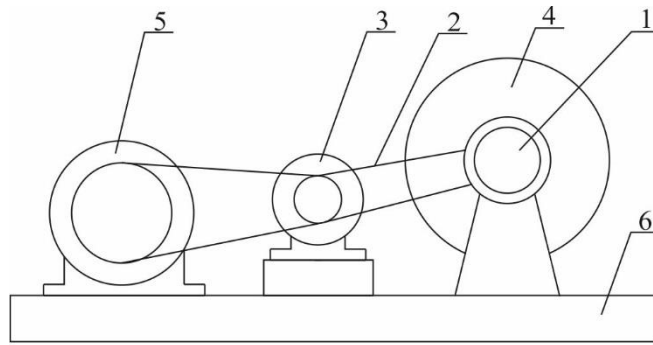


Рис 4.2. Схема експериментальної стендової установки

Стенд дозволяє акумулювати кінетичну енергію за допомогою обертових дисків, фіксувати частоту обертання, число включень, тривалість роботи приводу і реєструвати такі вихідні параметри гальма і приводу: гальмівний момент, зусилля в тязі, час розмикання гальма і розгону приводу, час спрацьовування і гальмування, температуру поверхонь, що труться, кут повороту гальмівних стійок.

4.4. Вимірювальне обладнання та апаратура

Вимірювання та реєстрація вихідних параметрів проводилися за допомогою вимірювально-реєструючої апаратури [88] і приладів рис. 4.2, 4.3, 4.4 і 4.5.

Гальмівний момент, створюваний гальмом, вимірювався за допомогою динамометричних кілець 6 (рис. 4.3, А-А), симетрично розташованих по обидві сторони гальма, на які були наклеєні по полумостовою схемою тензорезистори. Динамометричні кільця з'єднані з основою станини і коромислом 7 хитається рами 2.

Температура поверхонь тертя вимірювалася сім'ю хромель-капелевими термопарами 10 типу ТР-01, встановленими в тілі гальмівної колодки уздовж її вертикальної осі.

Сила зчеплення фрикційного матеріалу з контртіло вимірювалася тензодатчиком 11 (рис. 4.5), встановленим на осі обертання колодки гальмівного пристрою з самоусілення. Цей пристрій було застосовано завдяки можливості обертання його колодок навколо осі обертання гальмівного барабану. При вимірюванні зусилля зчеплення тензокольцом здійснювалося жорстке стопоріння колодок.

Частота обертання реєструвалася за допомогою тахогенератора постійного струму типу ТГП-5.

Час гальмування вимірюється з моменту контакту колодок з контртілом до моменту досягання необхідної частоти обертання барабану, що контролюється величиною напруги на виході тахогенератора. Число включень вимірюється лічильником, встановленим в ПЕОМ.

На рис. 4.7 показана типова осцилограма записів вимірювань, де по осі ординат вказаний відповідний вихідним параметрам електричний еквівалент, а по осі абсцис - реальна оцінка часу в секундах, при цьому прийняті наступні позначення: 1 - швидкість обертання гальмівного шківa n , об / хв; 2 - гальмівний момент M_T , Н·м; 3 - зусилля в замкає тязі F , Н; 4 - зусилля зчеплення фрикційних поверхонь $F_{сц}$, Н; 5 - 11 - температура на поверхні тертя гальмівної накладки з її довжині τ , $^{\circ}\text{C}$.

Електрозапітка всіх динамометричних кілець і тензодатчиків, здійснювалося за допомогою спеціально розробленого і виготовленого блоку живлення, що дозволяє видавати і регулювати вихідну напругу за допомогою високоточних резисторів, схема даного блоку живлення приведена на (рис. 4.3).

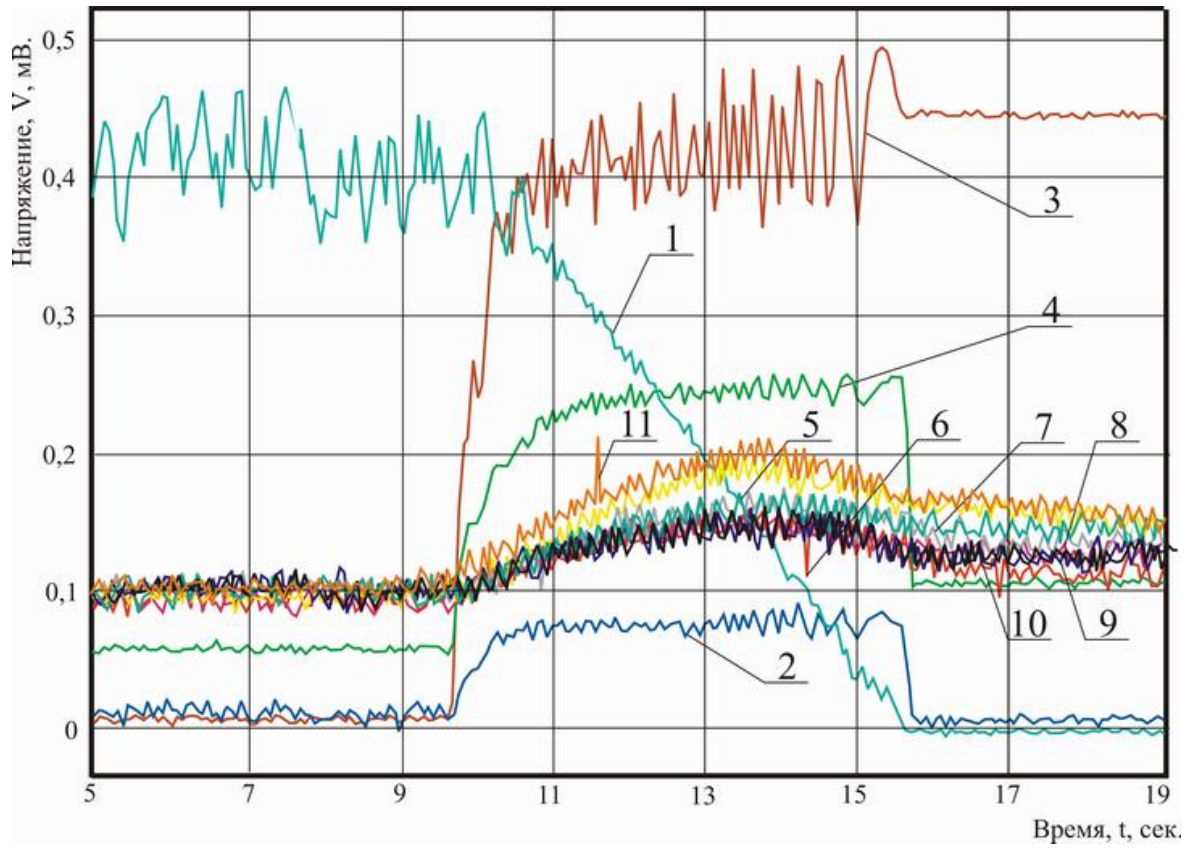


рис. 4.3. Характерний ділянку осцилограми процесу гальмування

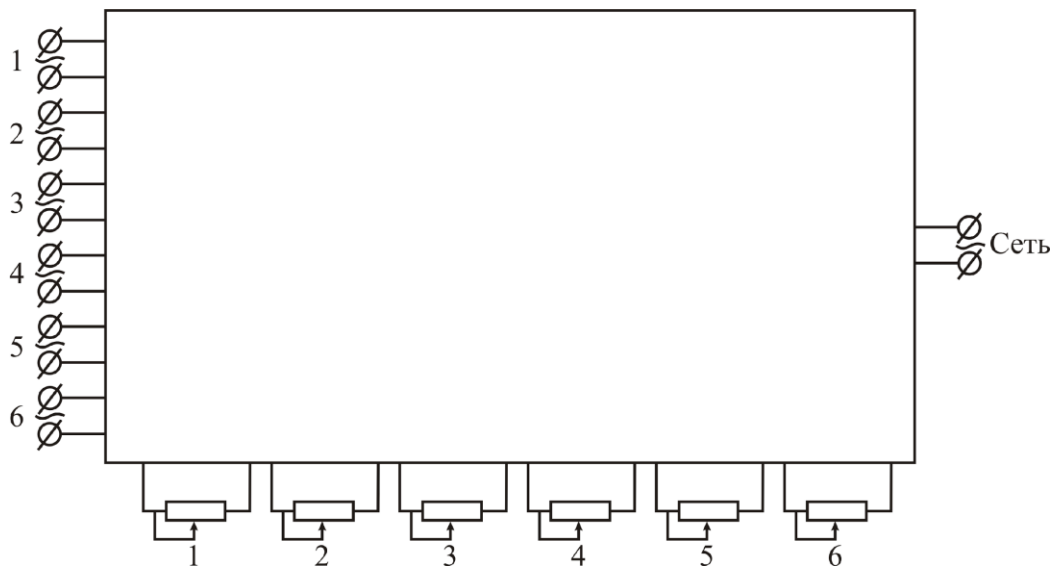


Рис. 4.4. Схема блоку живлення датчиків

Тарування динамометричних датчиків проводилася кожен раз перед початком експерименту і після його закінчення. Таріровочні графіки датчиків вимірювання зусилля показані на рис. 4.5.

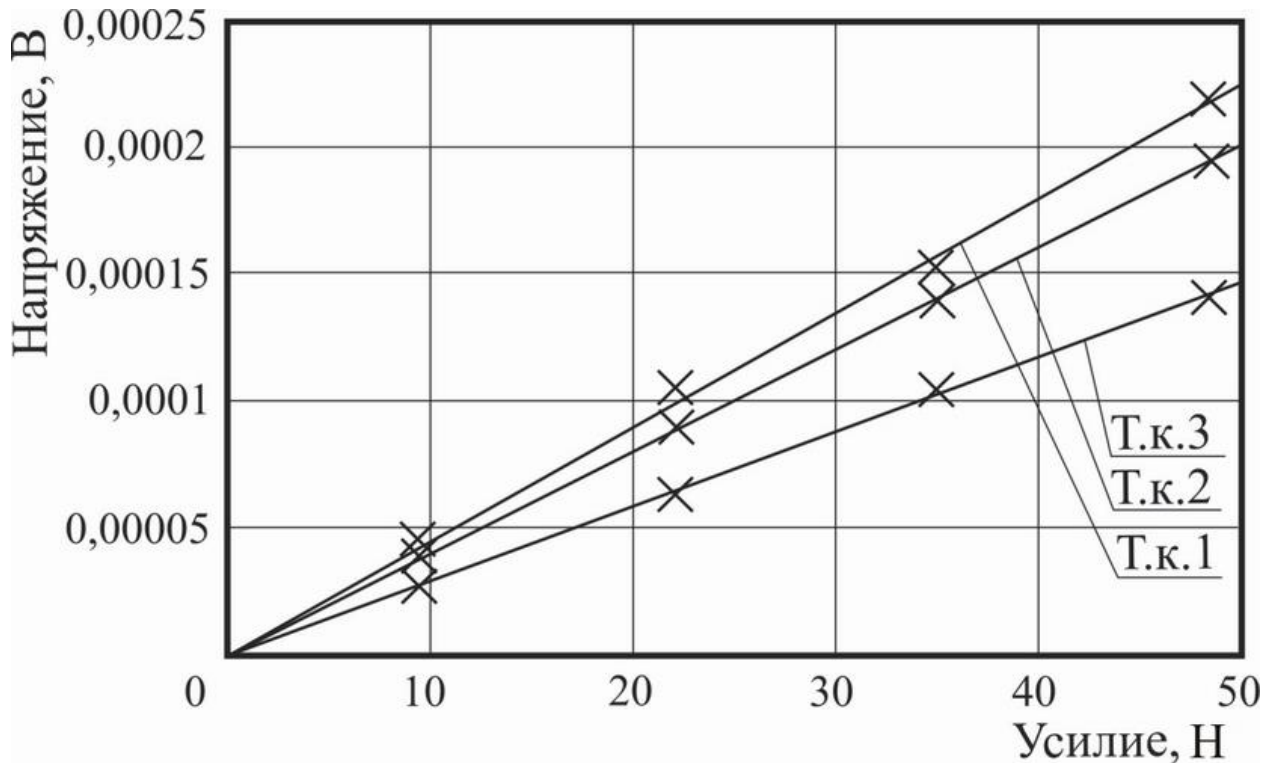


Рис. 4.5. Таріровочні графіки датчиків зусилля, де Т.к.1 - динамометричний датчик вимірювання нормального навантаження на гальмівну колодку; Т.к.2 - динамометричний датчик вимірювання гальмівного моменту; Т.к.3 - динамометричний датчик вимірювання сили зчеплення

Знос фрикційного матеріалу поверхонь тертя гальмівного пристрою визначався ваговим методом шляхом точного зважування гальмівної колодки разом з накладкою. Після цього різниця в масі колодки до і після випробування переводилася в фактичні міліметри зносу фрикційного матеріалу.

Всі електричні сигнали подавалися на вхід плати АЦП, яка призначена для перетворення аналогового сигналу в цифровий і встановлена в системному блоці ПВЕМ (рис. 4.10).



Рис. 4.6. Вимірювальний модуль на базі ПЕОМ

4.4.1. Вимірювальний модуль з цифровим збором та обробкою даних

Експериментальні дослідження для визначення динамічних і статичних навантажень раніше проводилися за допомогою шлейфового осцилографа (або швидкодіючих самописних приладів), підсилювача і ряду датчиків. Ця схема наділена низкою недоліків: записи в шлейфових осцилографах проводили на фотопапері і вимагали подальшої обробки; в застосовуваних підсилювачах обмежена кількість каналів; деякі види підсилювачів мають всього один вихід (по струму або по напрузі); не всі види датчиків підходять під відповідний тип підсилювача; потрібна попередня настройка апаратури на відповідний процес з аналізом отриманих даних, яка займає час; складність настройки апаратури; незручність подальшої обробки отриманих даних за допомогою персональної

електронно-обчислювальної машини (ПЕОМ).

Дуже перспективним вирішенням цього завдання, на наш погляд, є застосування аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) на базі ПЕОМ, які дозволяють в короткі терміни проводити обробку отриманих даних і зберігати їх в зручному форматі [88]. До достоїнствами застосування АЦП відносяться: простота настройки каналів вимірювань (за рахунок програмного забезпечення), можливість застосування одночасно різних типів датчиків, автоматичний запис отриманих даних на магнітний диск ПЕОМ, автоматична побудова графіків процесів, можливість їх масштабування і прокручування, висновок на друк будь-яких типів графіків і масивів вимірювань, скорочення часу обробки результатів, можливість подальшої обробки отриманих вимірів за допомогою ПЕОМ.

з метою скорочення часу проведення експериментальних досліджень і можливості автоматичної обробки отриманих даних на базі ПЕОМ типу РС / АТ з встановленою сертифікованою за ISO 2000 платою АЦП SDI-ADC14- 32F, використаний вимірювальний модуль (ІМ), що дозволяє реєструвати температуру, динамічні і статичні навантаження при різних експериментальних випробуваннях. Модуль дозволяє реєструвати різними типами датчиків статичні і динамічні навантаження, температуру протікаючих процесів, а також здійснювати автоматичне керування різного роду процесами за допомогою цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) і т. Д.

Вимірювальний модуль призначений для роботи в автоматизованих системах виміру, контролю і наукових досліджень на базі ПЕОМ типу ІВМ РС / АТ.

4.4.2. Програмне середовище для управління вимірами на діагностичному стенді

Для вимірювання температури, статичних та динамічних навантажень з використанням ІМ застосовувалася програма ADC.EXE, скомпільована на мові програмування DELPHI і призначена для роботи в операційних системах Windows 95/98 і Windows NT. Для повноцінної роботи програми необхідний процесор ПЕОМ не нижче Pentium 100 (рекомендується Pentium 166MMX) і обсяг оперативної пам'яті не менше 16 Мб (рекомендується 32 Мб).

Програма ADC.EXE призначена для обробки даних, отриманих з ІМ при вимірюванні механічних або електромагнітних параметрів системи з подальшим перетворенням в графічні формати представлення. Програма дозволяє обробляти всі дані, що надходять з каналів АЦП з подальшим масштабуванням і центруванням

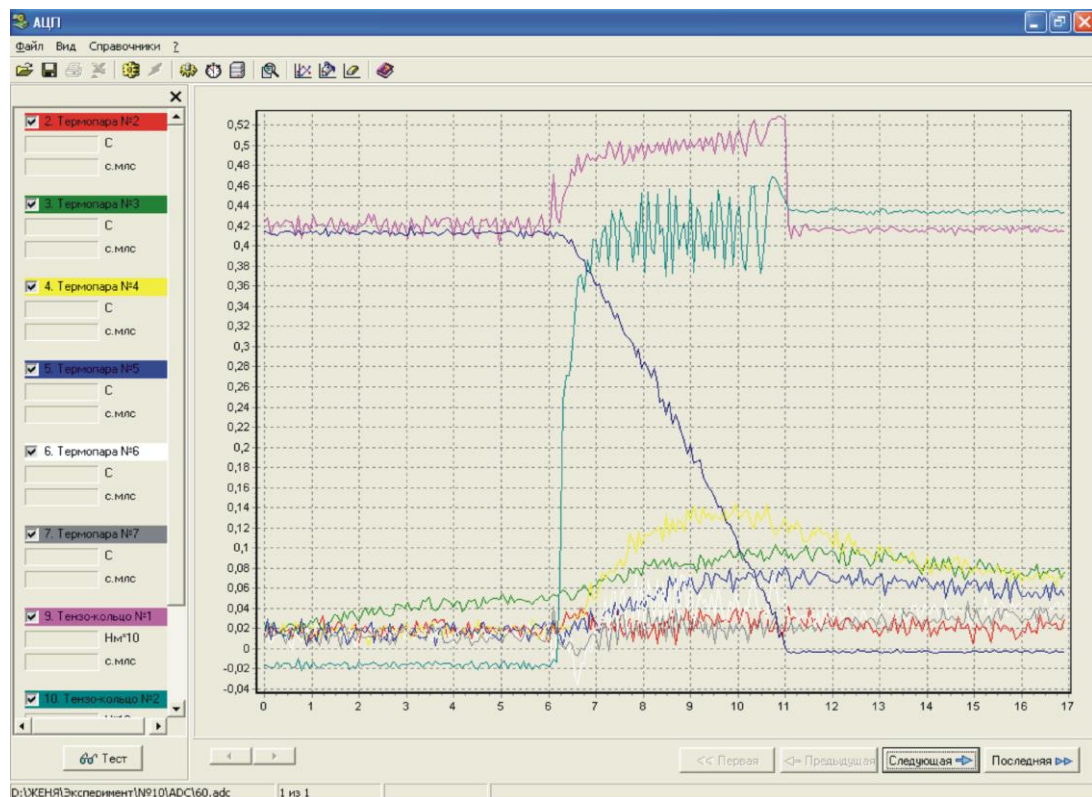


Рис. 4.7. Интерфейс программы ADC.EXE

графічного зображення по осях OX (t , c) і OY (U , V). Вихідними параметрами програми є файли даних (файли з розширенням * .adc) і графічні файли зображення у векторному і растровому форматі (файли з розширенням * .wmf і * .bmp). При бажанні можливий висновок графічного зображення вимірювань на принтер або в буфер обміну для подальшої вставки в текстовий документ або графічне зображення. Зовнішній вигляд інтерфейсу програми представлений на рис. 4.7.

Форму програми логічно можна розбити на меню, панель управління, панель відображення графіків і системної (технічної) інформації про проведення вимірювань.

Панель меню представлена кнопками підміню "Файл", "Вид", "Довідники". Підміню "Файл" включає в себе основні операції для роботи з отриманими даними і файлами. Підміню "Вид" визначає зовнішній вигляд вікна програми. Підміню "Довідники" відноситься до одного з основних пунктів меню. За допомогою підменю "Довідники" здійснюється визначення програмою вимірювального обладнання, з якого будуть зчитуватися дані: схем, в які можуть входити ті чи інші вимірювальні датчики; підсиленя для різних вимірювальних датчиків; відповідностей зчитує вольтажа з датчиків, фізичним величинам зусиль, швидкостей, кутів і ін .; каналів, за якими закріплені ті чи інші вимірювальні датчики; полярності сигналу.

Панель управління представлена кнопками "Відкрити файл" (рисунок 4.7), "Зберегти в файл", "Друк", "Експорт даних в Microsoft Excel", "Старт", "Стоп", "Налаштування", "Таймер" , "Включення, відключення режиму підвищеної точності", "Масштаб", "Включення, відключення плаваючою шкали", "Визначення кольору заливки поля виводяться графіків", "Видалення графіка", "Допомога".

Кнопка "Старт" дозволяє запустити процес зчитування даних з модуля АЦП при проведенні вимірювань, кнопка "Стоп" - зупинити процес. Панель

управління окремими графіками, відображена ліворуч, дозволяє включити / вимкнути показ зображення кожного каналу, визначити колір графіка для даного каналу, відображає час, що цікавить нас точки від початку процесу вимірювання і фізичну величину заміряли параметра.

Панель відображення графіка являє собою декартову площину з осями OX і OY , де з координування OX відображається час вимірювання (в секундах), а по координаті OY величина напруги (в вольтах). Точність зображення графіка при збільшенні може досягати тисячної частки величини як по осі часу OX , так і по осі напруги OY . Графік окремо взятого каналу представляє безліч точок, з'єднаних між собою послідовно, що дозволяє з певною точністю встановити дійсну картину зміни параметрів вимірюваної системи.

4.5. Оцінка похибок вимірювальних систем

Враховуючи, що температура, гальмівний момент, сила зчеплення, знос пари тертя і коефіцієнт тертя є випадковими величинами, які проявляються при масових випробуваннях то для визначення обсягу випробувань необхідно оцінити похибку вимірювань.

Для кожного випадку є a_1, a_2, \dots, a_n значень вимірів, кожне з яких дорівнює невідомої дійсної величиною a . Приблизне значення величини a може бути визначено як [91]:

$$a \approx \bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad (4.5)$$

Якщо можливо знайти $\varepsilon > 0$ таке, яке залежить тільки від числа вимірювань n значень a_1, a_2, \dots, a_n і величини a , задовольняє $f(\bar{a} - \varepsilon < a < \bar{a} + \varepsilon)$ умові, то величина α - є надійність, а Σ - точність $a \approx \bar{a}$ рівності, яке

визначається за $\varepsilon = t_{\alpha} \cdot S_{\bar{a}}$ формулою, де t_{α} вибирається за таблицями [91] в залежності від обраної надійності і значень $k = n-1$.

Величина Σ результатів вимірів температури, гальмівного моменту, сили зчеплення, зносу пар тертя і коефіцієнта тертя визначалася за значеннями поверхневої температури, номінального гальмівного моменту, сили зчеплення, коефіцієнта тертя, заміряних в процесі одного гальмування приблизно в однакових умовах. Точність вимірювання лінійного зносу оцінювалася за значеннями ряду вимірів маси гальмівної колодки зважують на електронних вагах, а також за значеннями зміни маси після закінчення ряду рівних циклів випробувань. Величина α прийнята рівною 0,90.

Таким чином, з імовірністю 0,90 можна стверджувати, що відносна похибка вимірювання цільових функцій процесу не перевищує 3%.

Число повторних вимірів як натурних, так і модельних визначається за формулою

$$n = 0,05 \left(\frac{\sigma_m}{k} \right)^2 \quad [91], \quad (4.6)$$

де σ_m - граничне значення помилки вимірювань,
 k - імовірнісна помилка.

вероятностная помилка вимірювання складає 0,5. Приймаємо, що гранична помилка не може перевищувати 1,25.

$$n = 0.05 \left(\frac{0.5}{1.25} \right)^2 \ll 1 \quad \text{Тоді:} \quad (4.7)$$

Отже, при постановці силових, температурних, зносо-фрикційних випробувань фрикційних пар гальмівних пристроїв, для забезпечення

розрахункової точності результатів необхідно провести 1-2 повторних експерименту (виміру).

Для перевірки працездатності вимірювального модуля і достовірності отриманих результатів були проведені експериментальні дослідження по визначенню динамічних навантажень, що виникають в процесі гальмування гальмівного пристрою.

Експериментальні дослідження проводилися з метою порівняльного аналізу вимірюваних величин, зокрема гальмівного моменту, за допомогою різних типів вимірювальної апаратури. Гальмівний момент, створюваний гальмівним пристроєм, вимірювався за допомогою динамометричних кілець які симетрично розташовані по обидва боки гальма. Вони з'єднані з основою станини і коромислом хитаючої рами. На динамометричні кільця наклеювалися тензорезистори, з'єднані по полумостовою схемою.

Аналізуючи отримані осцилограми і графіки зміни гальмівного моменту, зроблені на різних типах апаратури (перший і другий випадок вимірювань), можна зробити висновок, що характер процесу, що протікає, чисельні значення визначають його величин мають задовільну ступінь відповідності. У зв'язку з цим розкриваються можливості використання модуля при проведенні різного роду експериментальних досліджень. Його застосування дозволяє скоротити час проведення дослідів (в середньому на 30%), підвищити якість одержуваних результатів, зменшити обсяг і трудомісткість подальшої обробки експериментальних даних, в тому числі за допомогою ПЕОМ.

4.6. Дослідження впливу різних чинників, що збільшують теплообмін, на тепловий режим роботи колодкового гальма

4.6.1. Температурний режим роботи гальмівного пристрою

За вихідний визначальний критерій в оцінці при вирішенні завдання зниження сталої температури накладок і барабану прийнята стала температура накладок і барабана лабораторного гальма при певному числі гальмувань на годину і незмінних в початковому і наступних експериментах параметрах.

Найбільш характерними, враховуючи теоретичні положення при допущення, що гальмівна колодка є тришарової стінкою, вважаємо точки, розташовані в області сполучення фрикційного матеріалу з третьою поверхнею гальмівного барабану, які розташовані уздовж вертикальної осі симетрії гальмівної колодки (рис. 4.8).

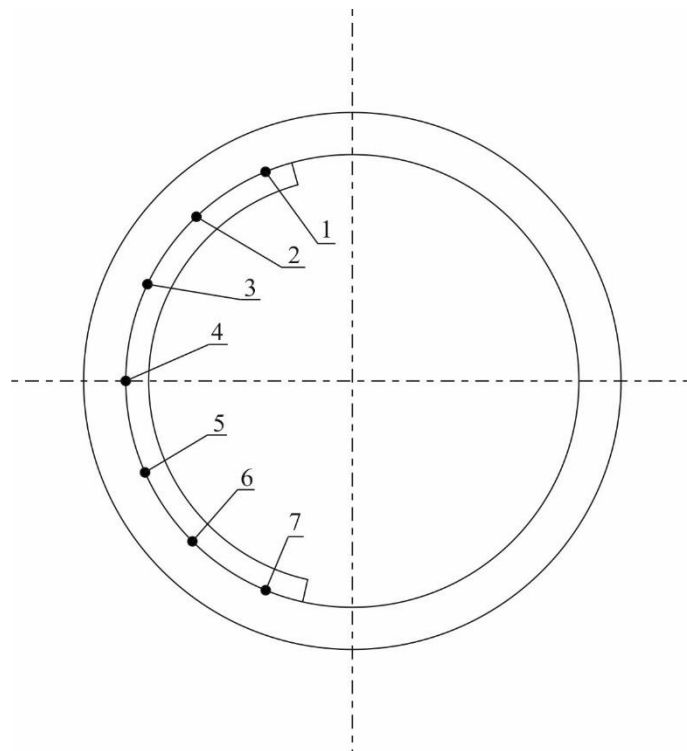


Рис. 4.8. Схема установки термопар в характерних точках гальмівної накладки

Вимірювання температури в характерних точках здійснювалося безперервно за допомогою плати АЦП.

Так як дослідження впливу різних матеріалів, що збільшують відведення теплоти із зони тертя, побудовано на порівняльному аналізі теплових режимів роботи гальмівного пристрою з різними фрикційними матеріалами, то в подальшому все графічні матеріали, що показують порівняльний аналіз, отримані при важкому режимі роботи.

При проведенні експериментальних досліджень вимір температур вироблялося хромель-копелеві термопарами типу ТР-01.

Термопари тарованого в масляній ванні з допомогою термометра і електронного вимірювального приладу DT9208A (рис. 4.9).



рис. 4.9. Таріровка термопар за допомогою електронного вимірювального приладу DT9208A

Таріровочні графіки термопар наведені на рис. 4.14 - 4.17.

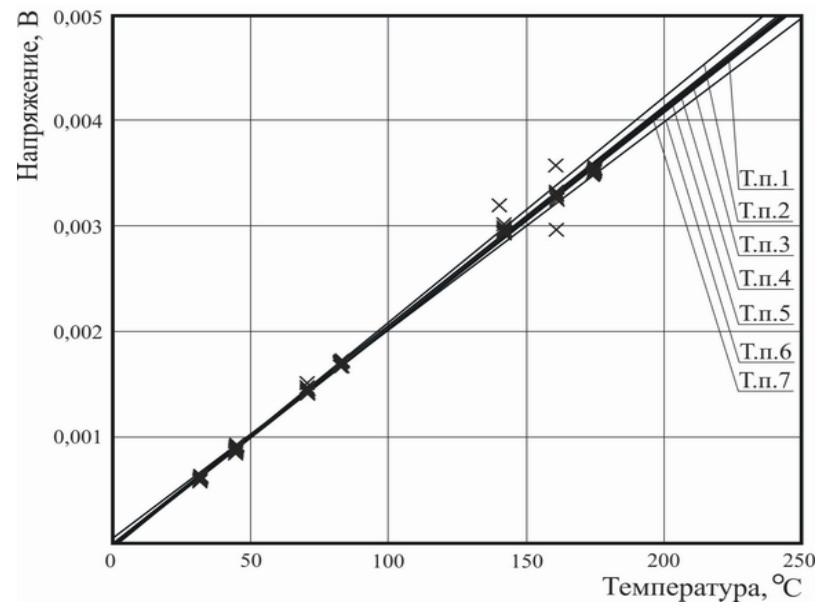


Рис. 4.10. Торіровочні графіки термопар, встановлених в асбофрікціонном матеріалі

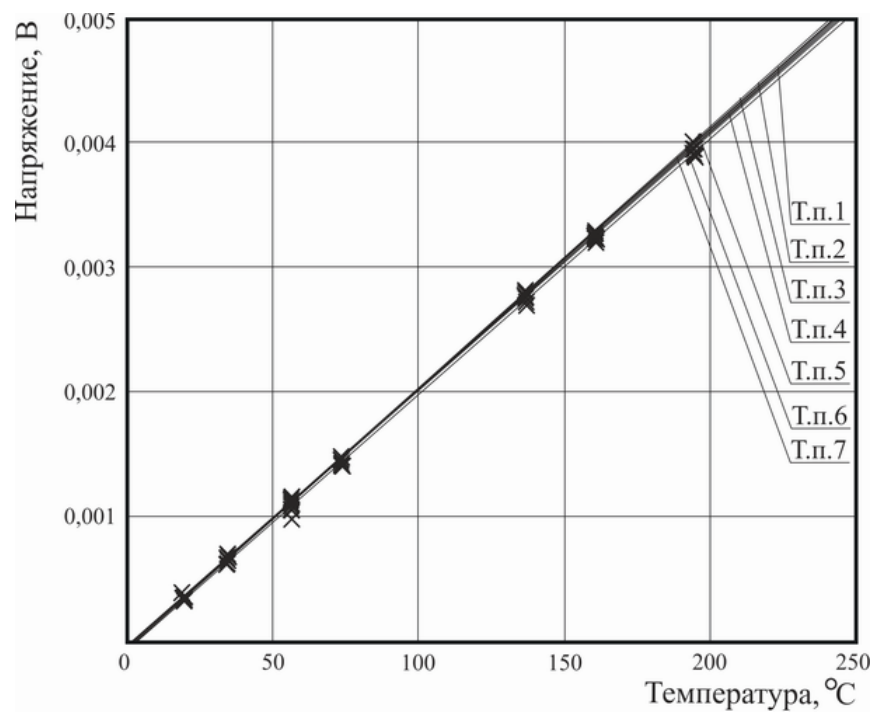


Рис. 4.11. Торіровочні графіки термопар, встановлених в асбовуглецевому матеріалі

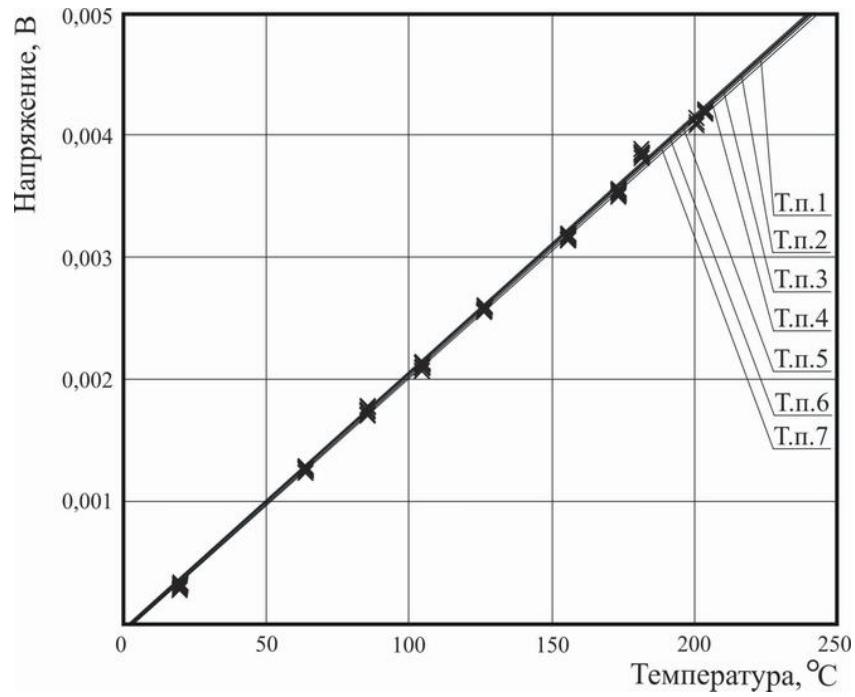


Рис. 4.12. Торіровочні графіки термопар, встановлених в вуглець-компонитному матеріалі Урал ТМ4 + рос

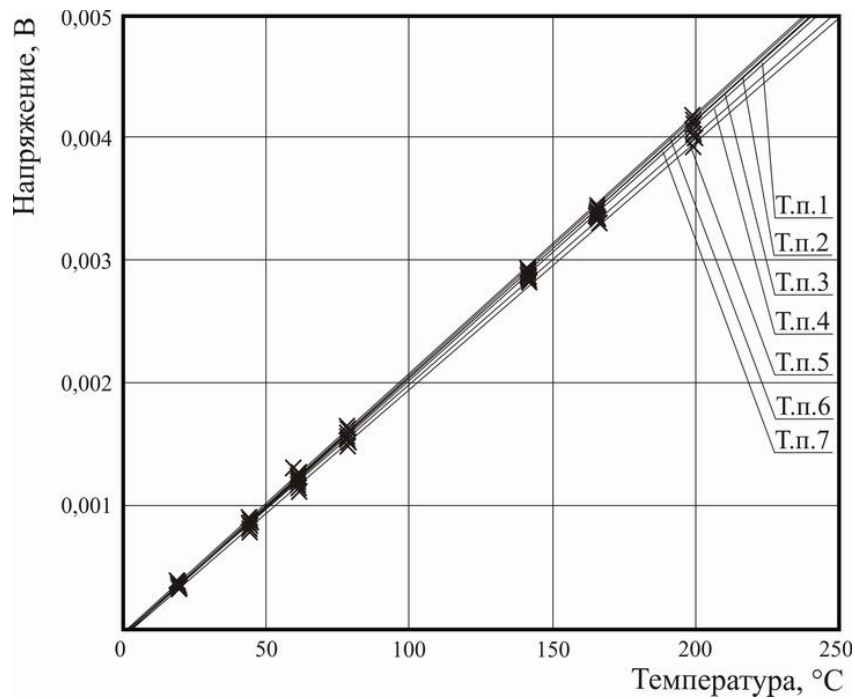


Рис. 4.13. Торіровочні графіки термопар, встановлених в вуглець-компонитному матеріалі УТ22-В

Термопари встановлювалися в спеціальні отвори і закривалися спеціальною сумішшю з подрібненого фрикційного матеріалу (в якому вони встановлювалися) і смоли.

4.6.2. Вплив матеріалу фрикційних пар тертя на тепловий режим роботи гальмівного пристрою і зносостійкість пар тертя

Результати вихідного експерименту по дослідженню теплового режиму роботи гальма з різними фрикційними матеріалами наведені на рис. 4.14 - 4.17. Так як найбільший практичний інтерес при вивченні теплового режиму роботи колодкового гальма представляє величина температури при сталому тепловому режимі роботи гальма, то в подальшому будемо називати криву нагрівання поверхонь тертя гальма від часу роботи механізму "визначальною кривою".

Випробування проводилися при важкому режимі роботи гальма із зусиллям притиснення однієї колодки рівним 1580 Н, що відповідає гальмівним моментом 200 Нм. Для зручності на наведених графіках показано зміна температури від часу для однієї термопари, що відображає максимальну температуру на поверхні тертя.

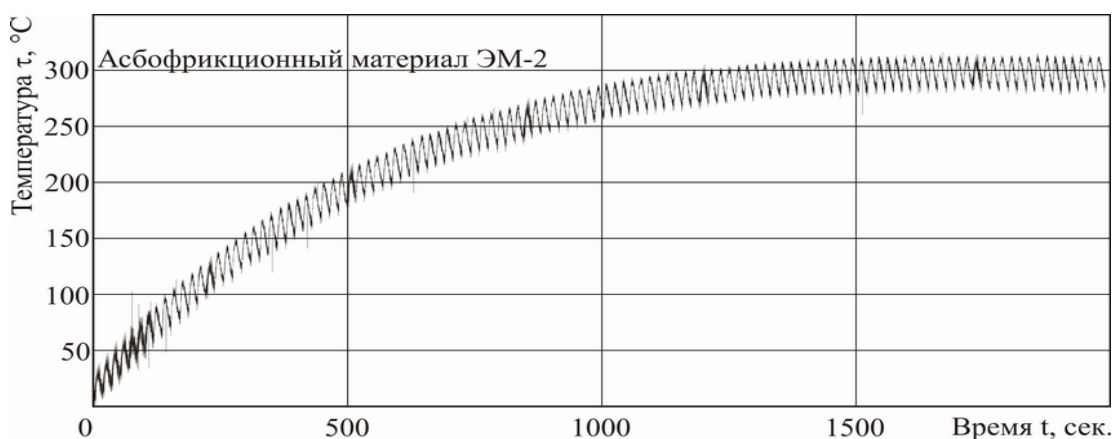


Рис. 4.14. Крива нагрівання зони контакту контртіла гальмівного пристрою з асбофрикційним матеріалом

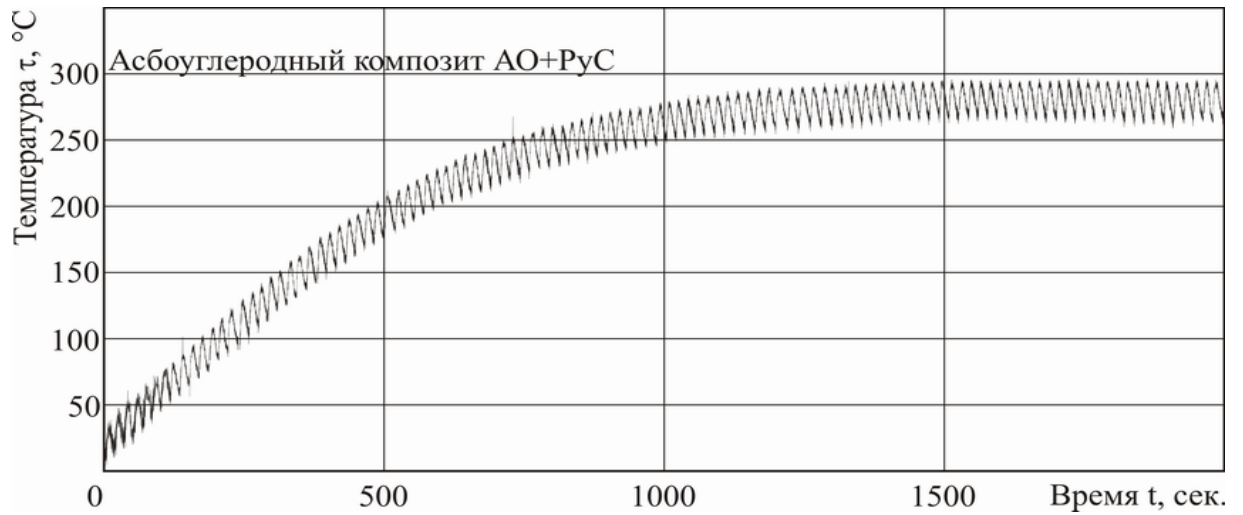


Рис. 4.15. Крива нагрівання зони контакту контртіла гальмівного пристрою з асбоуглеродним композитним матеріалом

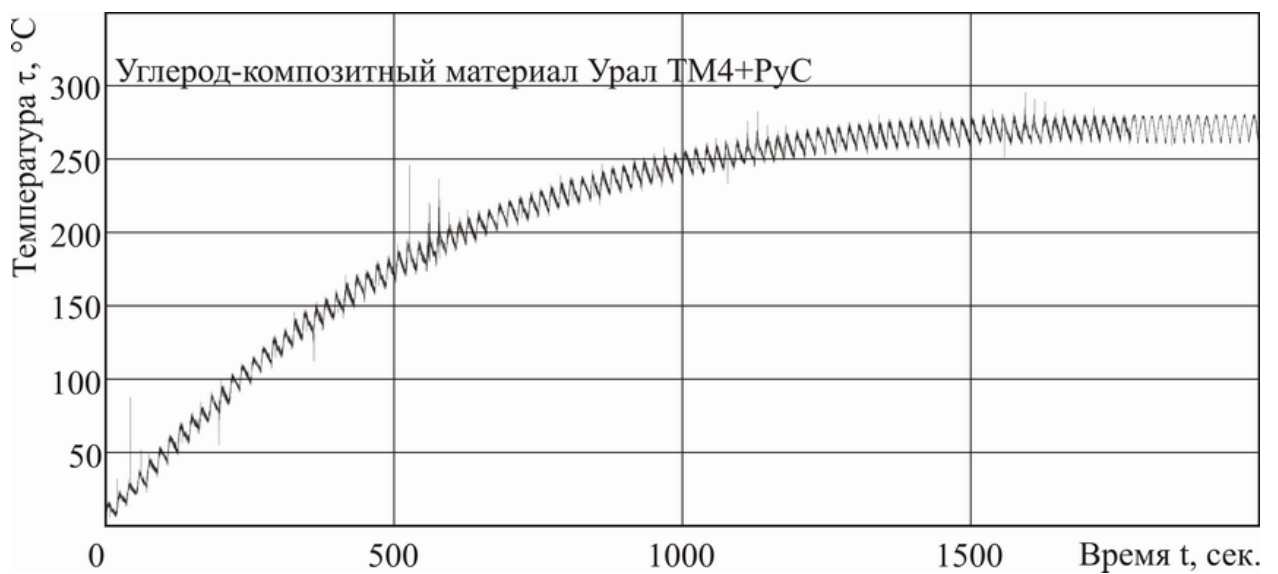


Рис. 4.16. Крива нагрівання зони контакту контртіла гальмівного пристрою з вуглець-композитним матеріалом

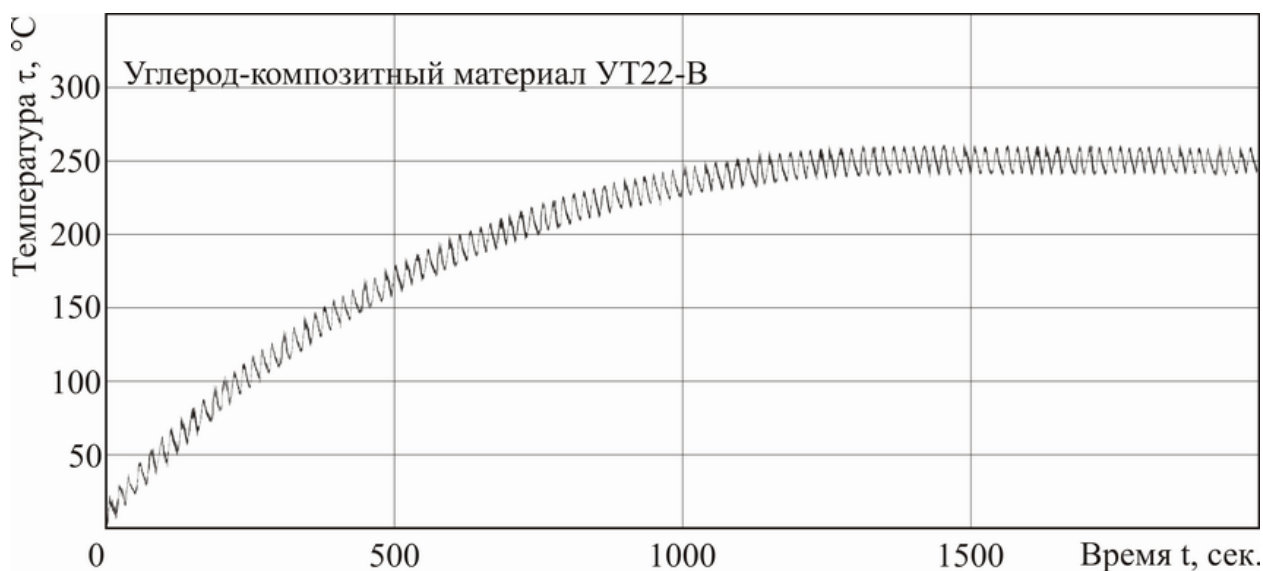


Рис. 4.17. Крива нагрівання зони контакту контртіла гальмівного пристрою з поліпшеним вуглець-композитним матеріалом

З наведених вище графіків зміни температури, поверхонь що труться від часу видно, що температура теплового балансу гальмівного пристрою з вуглець-композитними накладками досягнута на 25-30-й хвилині випробування нижче приблизно на 10-16% в порівнянні з найбільш поширеним асбофрікційним матеріалом ЕМ-2. Якщо температура теплового балансу гальмівного пристрою з асбофрікційними накладками ЕМ-2 дорівнює 290 °С, то для гальма з вуглець-композитними накладками вона дорівнює 260 °С (Урал ТМ4 + рос) і 250 °С (УТ22-В). Асбовуглецевий композит при його випробуваннях на температуру теплового балансу показав результати, які мало відрізняються від результатів асбофрікційного матеріалу ЕМ-2.

Отримані в ході експериментів результати свідчать про зниження теплової навантаженості гальмівного пристрою імовірно за рахунок збільшення теплопровідності і тепловіддачі нових вуглець-вуглецевих композитних фрикційних матеріалів. Цей факт дозволяє рекомендувати вуглець-композитні матеріали для застосування в серійному виробництві барабанно-колодкових і диско-колодкових гальмівних пристроїв.

Зносостійкість серійних і нових матеріалів, як вказувалося вище, визначалася ваговим методом, випробування проводилися для кожного матеріалу протягом одного робочого тижня при восьмигодинний робочий день по одному і тому ж графіку навантаження. В результаті порівняльних експериментальних досліджень було встановлено, що зносостійкість нових вуглець-вуглецевих матеріалів в порівнянні з найбільш поширеними фрикційними матеріалами в 8-12 разів вище, що показано на рис. 4.18.

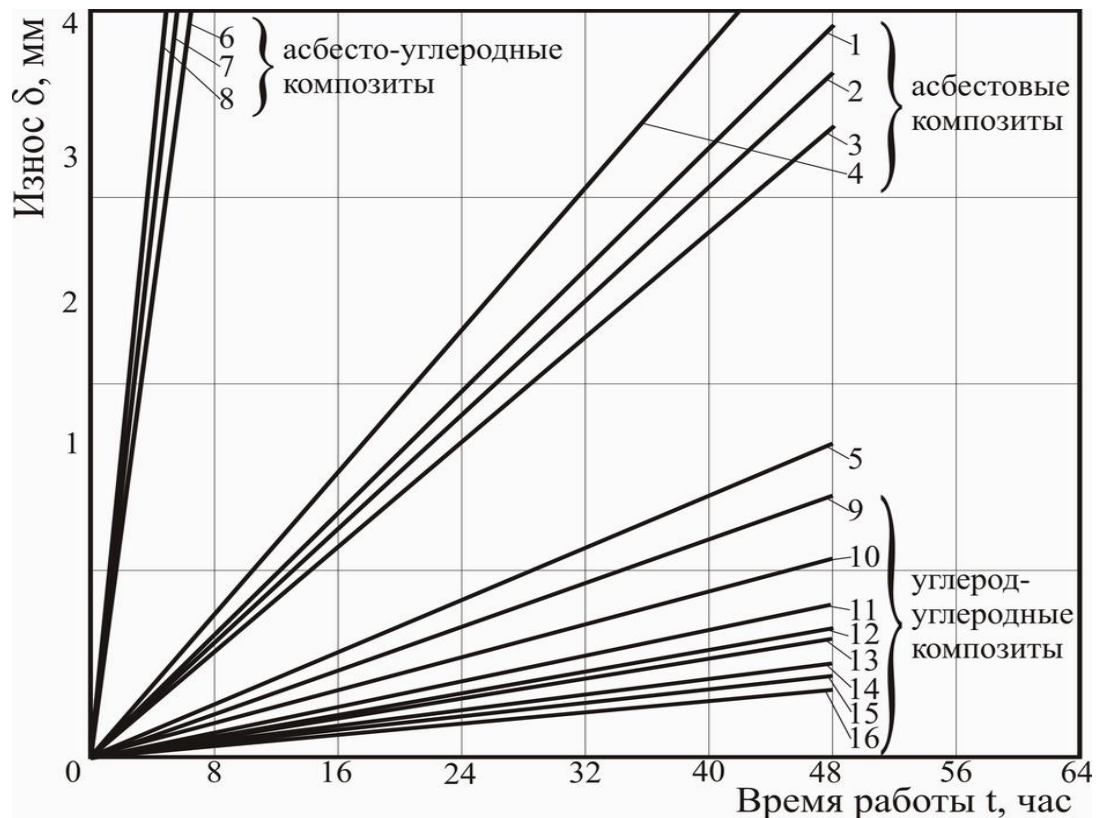


Рис. 4.18. Експериментальні залежності зміни зносу від часу для випробування матеріалів; 1 - ЕМ-2, 2 - ретінакс Б, 3 - азбестова стрічка Б, 4 - ТР-9, 5 - чавун, 6 - АТ + рос-1, 7 - АТ + рос-2, 8 - АТ + рос-3, 9 - УТ22-АТ, 10 - УТ22-Су, 11 - Урал ТМ4 + рос-1, 12 - Урал ТМ4 + рос-2, 13 - Урал ТМ4 + рос-3, 14 - УТ22-ВСL, 15 - УТ22- ВСS, 16 - УТ22-В

4.7. Дослідження впливу температури поверхонь тертя на зміну коефіцієнта тертя і гальмівного моменту

Випробування фрикційних матеріалів проводилися в температурному діапазоні від 15 до 450 °С, який є характерним для роботи гальмівних пристроїв легкої та середньої групи температурної навантаженості, із зусиллям притиснення однієї колодки рівним 1580 Н. На жаль, провести випробування при більш високих температурах не дозволили технічні можливості експериментальної установки в зв'язку з місцевим температурним перегрівом тензодатчиків 9 і можливим спотворенням їх показань і потім внаслідок натурального займання асбофрикційного матеріалу EM-2 при температурі 315 °С.

Коефіцієнт тертя є основним параметром стохастичного нестационарного процесу гальмування, тому його залежність від температури представлена у вигляді полів можливих значень, показаних на рис. 4.19 - 4.22, що включають між верхніми і нижніми граничними кривими 99.9% фактичних даних за результатами випробувань. При цьому залежно середніх значень можуть бути прийняті як апроксимація по математичним очікуванням приватних розподілів випадкової величини коефіцієнта тертя при фіксованих значеннях температури або у вузькому діапазоні значень (5-10 ° С), оскільки результати окремої серії дослідів свідчать про те, що розподіл значень коефіцієнта тертя при фіксованій температурі слід нормальному закону розподілу випадкової величини при задовільному значенні критерію згоди Пірсона $P(\chi^2) = 0.68$. Результати випробувань показані в вигляді фактичних даних і апроксимируючих залежностей після статистичної обробки.

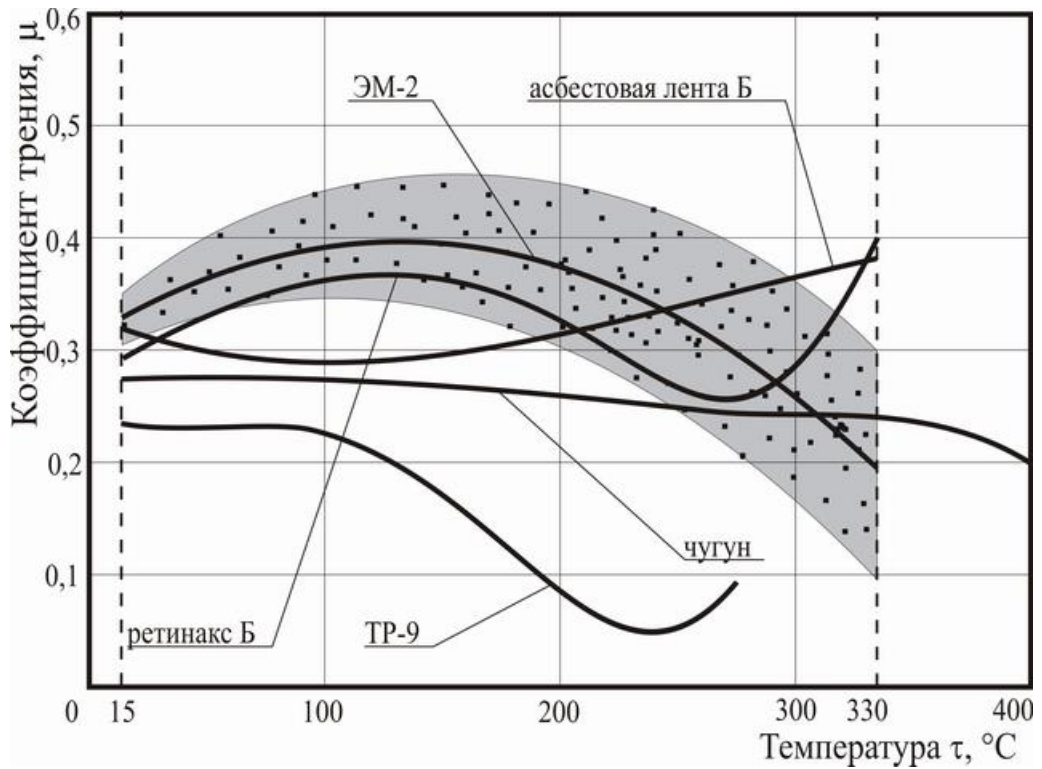


Рис. 4.19. Характер зміни коефіцієнта тертя в залежності від температури поверхні тертя для найбільш поширених матеріалів

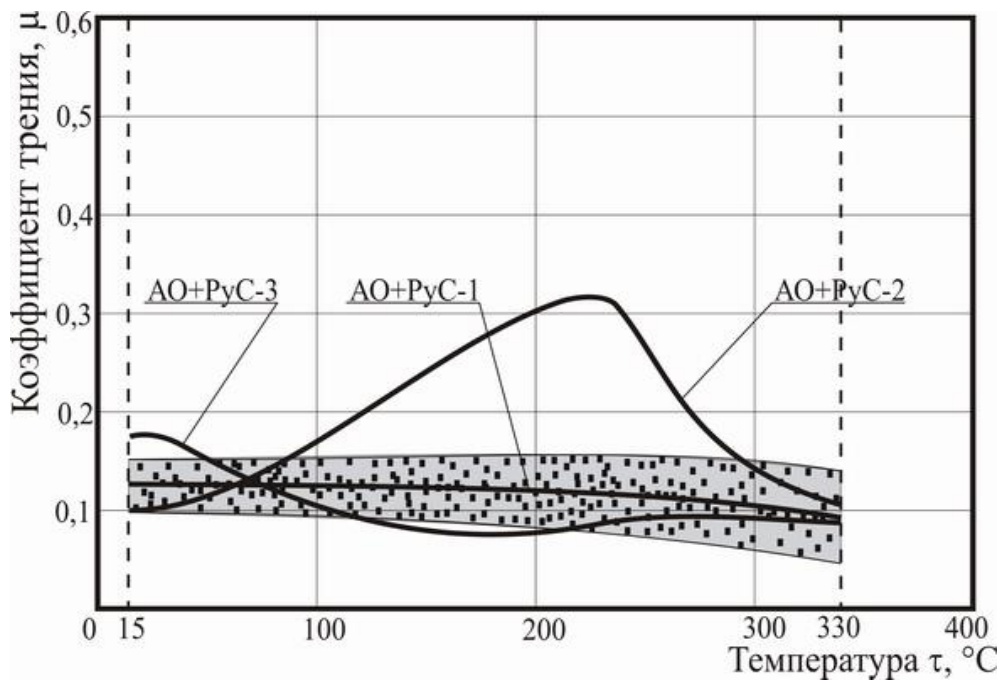


Рис. 4.20. Характер зміни коефіцієнта тертя в залежності від температури поверхонь тертя для азбестоцементних вуглецевих матеріалів

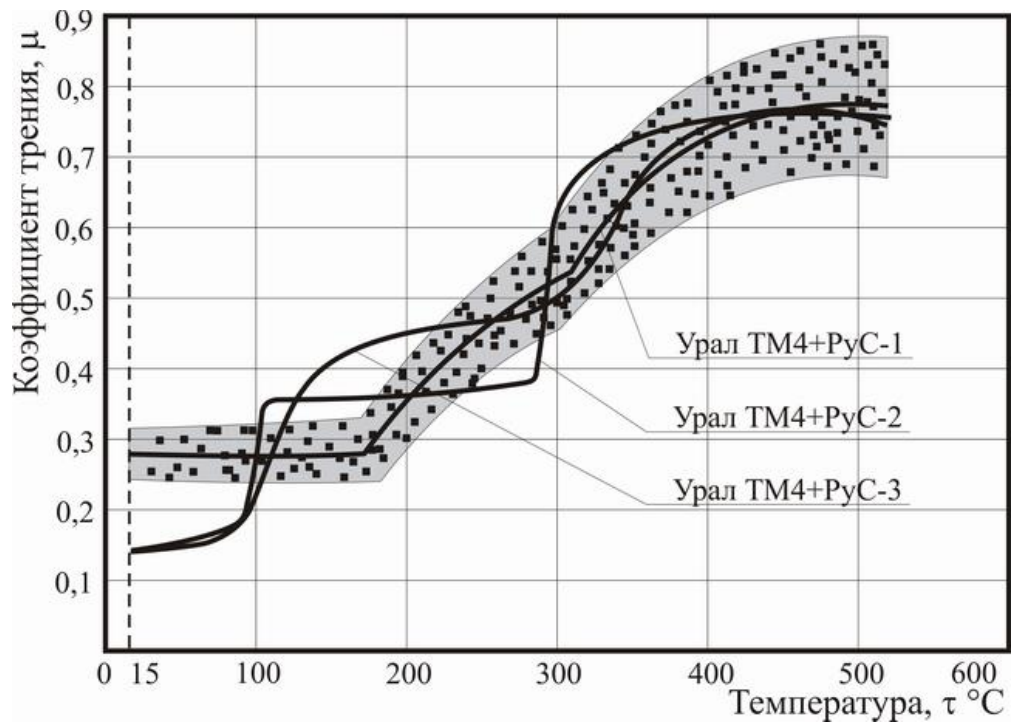


Рис. 4.21. Характер зміни коефіцієнта тертя в залежності від температури поверхонь тертя для вуглець-композитних матеріалів

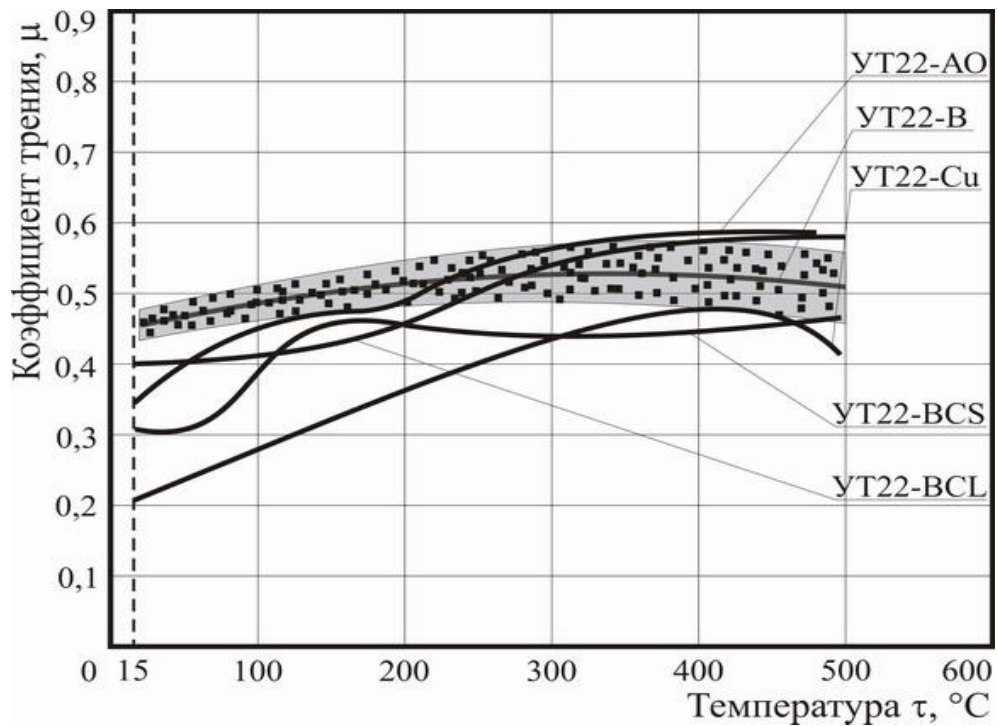


Рис. 4.22. Характер зміни коефіцієнта тертя в залежності від температури поверхонь тертя для покращених вуглець-композитних матеріалів

При цьому основні експериментальні криві зміни гальмівного моменту від температури для відповідного матеріалу мають подібний характер з відповідними функціями зміни коефіцієнта тертя від температури і наведені на рис. 4.23 - 4.26.

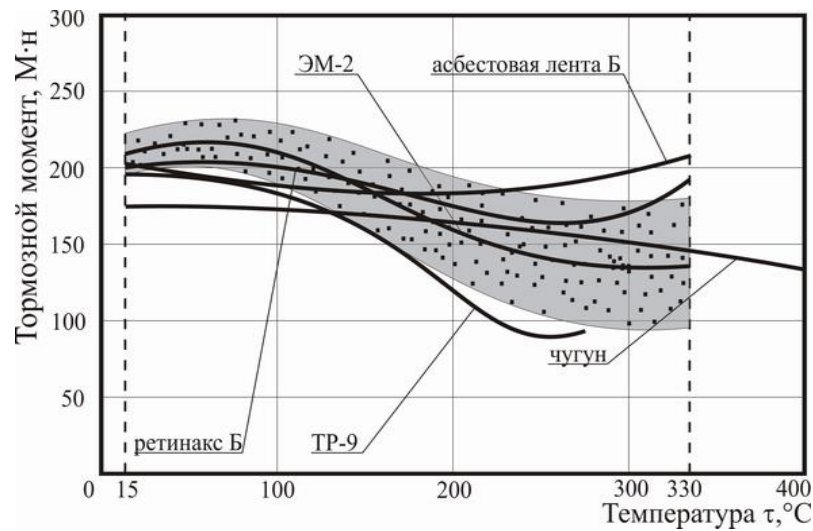


Рис. 4.23. Характер зміни гальмівного моменту в залежності від температури поверхонь тертя для найбільш поширених матеріалів

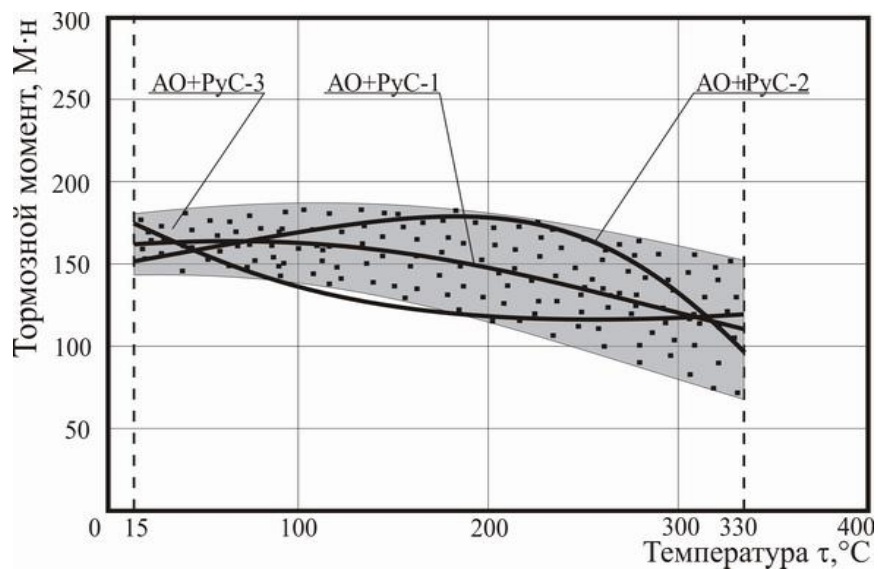


Рис. 4.24. Характер зміни гальмівного моменту в залежності від температури поверхонь тертя для азбестоцементних вуглецевих матеріалів

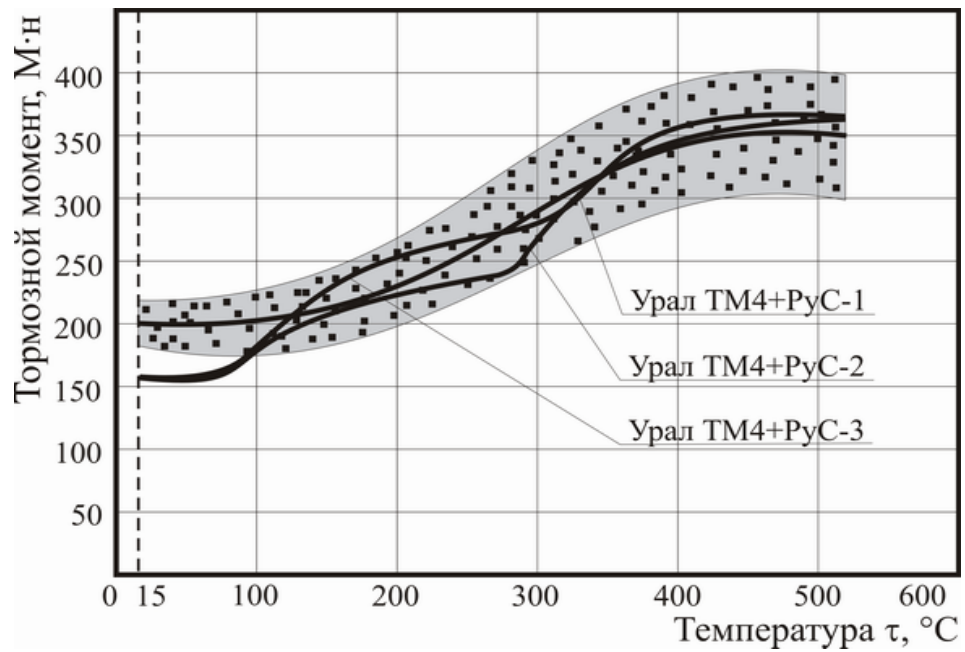


Рис. 4.25. Характер зміни гальмівного моменту в залежності від температури поверхонь тертя для вуглець-композитних матеріалів

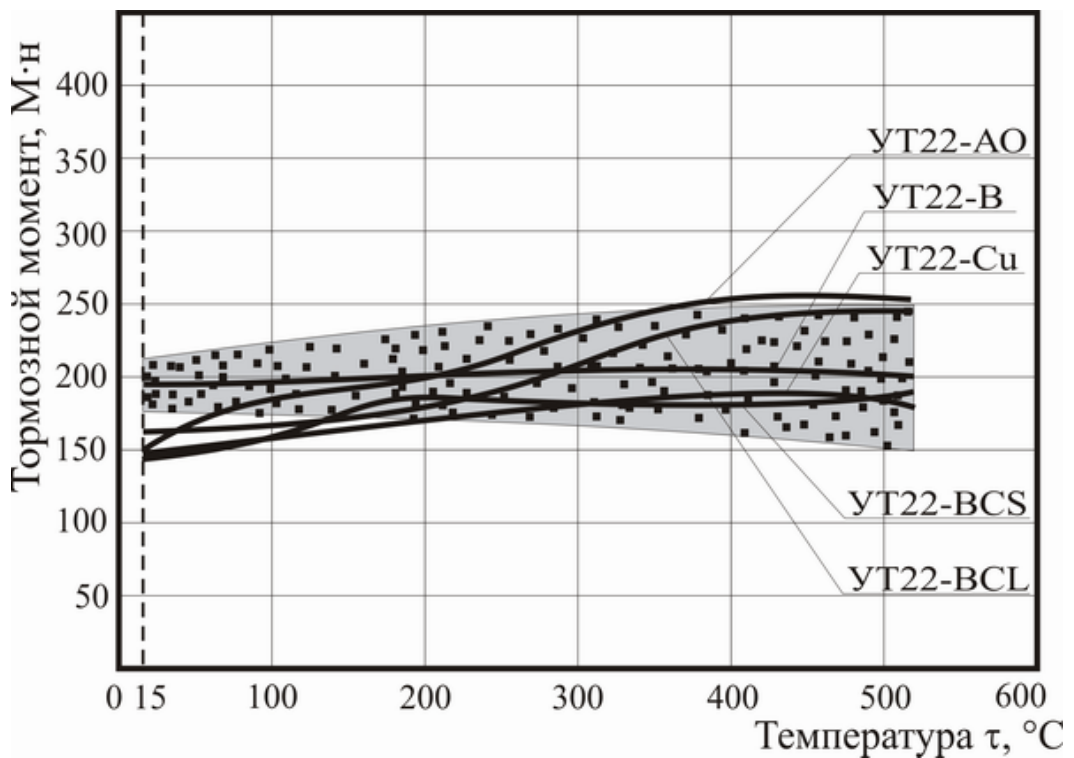


Рис. 4.26. Характер зміни гальмівного моменту в залежності від температури поверхонь тертя для покращених вуглець-композитних матеріалів

Аналіз результатів випробувань показав, що випробувані в однакових умовах три накладки АТ + РуС, які мають однакові параметри по щільності і пористості і вирізані з однієї і тієї ж заготовки, ведуть себе по різному.

При 15 ° С все три зразка мають близькі коефіцієнти тертя на рівні $\mu = 0,1-0,17$. При підвищенні температури до 300-350 ° С коефіцієнт тертя зразків АТ + РуС-1 і АТ + РуС-3 падає до 0,1. Коефіцієнт тертя зразка АТ + РуС-2 при підвищенні температури зростає і досягає максимуму $\mu = 0,35$ при 220 ° С, а потім різко падає до $\mu = 0,1$ при 330 ° С. При 310-330 ° С все три зразка розтріскалися. Отримані результати ми оцінюємо як невдалі, але не безнадійні. Справа в тому, що раніше подібні азбестові тканини виготовлялися з довговолоконистих азбестових волокон ("гірський льон" Білоярського родовища Російської Федерації). Як показала подальша перевірка, сучасні тканини АТ-2 і АТ-3 виготовляються з дрібнодисперсних азбестових частинок, тому їх нитки непридатні для армування азбовуглецевих матеріалів.

Фрикційні властивості серійних і нових поліпшених вуглець-композитних гальмівних накладок суттєво відрізняються. У більшості серійних матеріалів при нагріванні спостерігається незначне зростання коефіцієнта тертя, а потім різке зниження. При цьому практично відсутня період стабілізації. У поліпшених вуглець-композитних матеріалів (УТ22-В, УТ22-АТ, УТ22-Всl) спостерігається постійне зростання коефіцієнта тертя з 0,35-0,45 до 0,52-0,6 при нагріванні зони контакту. При цьому у матеріалі УТ22-В спостерігається досить великий період стабілізації коефіцієнта тертя в діапазоні температур 180-420 ° С і потім можливо повільне зниження. Очевидно, що нові матеріали значно перевершує серійні, такі як ЕМ-2, як за величиною реалізованого коефіцієнта тертя, так і по термостійкості і зносостійкості. Висока стійкість нових матеріалів до впливу температури в контактній зоні і збереження при цьому високого коефіцієнта тертя (близько 0,5 в діапазоні температур 100 - 400 ° С) дозволяє рекомендувати їх до використання в автомобільному транспорті з важкими режимами експлуатації.

Крім того, використання нового матеріалу дозволяє підвищити безпеку експлуатації автомобілів у випадках екстреного (аварійного) гальмування.

Слід зазначити і загальні властивості для згадуваних фрикційних матеріалів: при підвищенні температури в контактній зоні, що труться коефіцієнт тертя збільшується і проходить через максимум, а потім по-різному для кожного з них, але зменшується. При цьому, чим вище температура початку зниження коефіцієнта тертя, тим більше термостійкість матеріалу.

ВИСНОВКИ ПО ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛУ

1. Розроблені фрикційні вуглець-композитні матеріали Урал-ТМ4 + РуС і УТ22-В на основі вуглецевої матриці, зміцнені вуглецевими волокнами, істотно перевершують серійні матеріали як за величиною реалізованого коефіцієнта тертя, термостійкості, так і по зносостійкості. При температурі від 100 до 400 °С в контактній зоні, що труться коефіцієнт тертя стабілізується на рівні 0,5, а потім відзначається тенденція до повільного зниження.

2. Стала температура поверхонь тертя гальмівного пристрою з вуглець-композитним фрикційним матеріалом виявляється в середньому на 30-50 °С нижче, ніж у гальма серійного виконання, що свідчить про більш сприятливому тепловому режимі роботи фрикційних елементів.

3. Розроблені матеріали Урал-ТМ4 + РуС і УТ22-В мають більш високу зносостійкість, що підтверджується тривалими випробуваннями на знос і оцінкою за ваговим методом, в порівнянні з серійними асбофрикційними матеріалами. Розроблені вуглець-композитні матеріали мають зносостійкість, щонайменше, в 8-12 разів вище. Застосування цих матеріалів дозволить значно скоротити трудомісткість ремонтів, обумовлених заміною фрикційних елементів гальмівних пристроїв.

4. На підставі результатів експериментальних досліджень розроблені матеріали Урал-ТМ4 + РуС і УТ22-В можуть бути рекомендовані для використання на дослідній партії автомобільних гальм, особливо для важких умов експлуатації з тривалим і частим гальмуванням.

8. Підвищення ефективності гальмування шляхом застосування розроблених фрикційних матеріалів дозволяє не тільки підвищити безпеку руху, але і забезпечити мінімізацію гальмівного шляху і часу гальмування, а також істотно підвищить потужність гальмівних пристроїв.

ВИСНОВКИ

1. У дипломній роботі вирішена науково-технічна задача підвищення ефективності гальмування автомобілів застосуванням нових композитних матеріалів на основі вуглець-вуглецю з піровуглецевою матрицею.

2. Розроблено математичну модель об'ємного температурного стану фрикційного матеріалу гальмівних пристроїв, що враховує нерівномірність розподілу питомого тиску в зоні контакту поверхонь тертя і вектор приросту температури по довжині поверхні тертя, яка дозволила виявити раціональні теплофізичні параметри розроблюваних фрикційних матеріалів на основі вуглець-вуглецю.

3. За допомогою розробленої математичної моделі температурного стану фрикційного матеріалу гальмівного пристрою який працює в повторно-короткочасному режимі роботи встановлена температура теплового балансу фрикційного вузла, і нерівномірність розподілу температурних полів за обсягом фрикційного матеріалу: максимальна температура виникає на поверхні тертя поблизу країв накладки, де відбувається вхід або вихід контртіла. Відмінність температур виникають на поверхні тертя, в найбільш гарячих і найбільш холодних точках досягає до 70%.

4. На підставі проведених досліджень розроблено методи зміцнення і склад фрикційних матеріалів на основі вуглець-вуглецевих волокон з поліпшеними теплофізичними і триботехнічними показниками, що дозволили знизити теплову навантаженість в контактній зоні на 15%. Наведено методи поліпшення розроблених ВВКМ з коефіцієнтом тертя достатнім за величиною і стабільним в широкому діапазоні зміни температури контактної поверхні тертя.

5. Розроблено проста і прогресивна технологія виготовлення фрикційних матеріалів на основі вуглецевих волокон з абразивними наповнювачами і піровуглецевою матрицею.

6. Виконано експериментальне дослідження розроблених фрикційних матеріалів, в ході якого було встановлено основні закономірності зміни коефіцієнта тертя і гальмівного моменту від температури, питомої тиску і швидкості ковзання поверхонь, що труться, що дозволяє рекомендувати їх використання в машинах і механізмах з важкими умовами експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Блінов Л. П. Розробка методів прогнозування параметричної надійності кранових гальм і довговічності їх фрикційних накладок. Дис. ... Кандидата техн. наук: Брянськ, 1979.-199 с.
2. Плясунов С. І. Оцінка параметричної надійності кранових колодкових гальм і вдосконалення їх конструкції з метою підвищення безпеки та ефективності роботи вантажопідіймальних кранів. Дис. кандидата. техн. наук: Свердловськ, 1987. -227 с.
3. ISO 4301 / 1-86 Крани і підіймальні пристрої. Класифікація. Частина 1. Загальні положення.
4. Чичинадзе А. В., Зінов'єв Е. В. Дослідження впливу газового середовища на фрикційні характеристики асбофрикційних матеріалів при стаціонарному і нестаціонарному режимі тертя. // Розрахунок і моделювання роботи гальмівних і фрикційних пристроїв. - М.: Наука, 1974 г. - с. 92-100.
5. Дедкова А. К. Вплив вологовмісту атмосфери на фрикційно-ізносні характеристики пар тертя. Изв. Вузів, "Машинобудування". 1975, №1.
6. Розрахунки кранових механізмів і їх деталей. ВНІПТМАШ, "Машинобудування", М., 1971 г.
7. Браун А. Гальма високошвидкісного рухомого складу. ЗАЛІЗНИЦІ СВІТУ, 1988, №7, с. 36-43.
8. Заумвебер Е. Конструкція і приділ навантажень дискових гальм. ЗАЛІЗНИЦІ СВІТУ, 1989, №9, с. 18-21.
9. Каркашадзе З. І. Дослідження теплового режиму дісковоколодочних гальм: Дис. ... Кандидата техн. наук: Тбілісі, 1978. - 170 с.
10. Германчук Ф. К. Довговічність і ефективність гальмівних пристроїв.- М.: Машинобудування, 1973.-176 с.

11. Іноземцев В. Г. Гальма залізничного рухомого складу. -М .: Транспорт, 1979. - 424 с., Іл. табл. - Бібліограф .: с. 422.
12. Костерін Ю. І. Деякі методичні питання натурних випробувань автомобільних гальмівних накладок // Розрахунок і випробування фрикційних пар: Зб. науч. робота. - М .: Машинобудування, 1974.
13. Крагельський І. В., Добичін М. М. Комбалу В. С. Основи розрахунків на тертя і знос. - М .: Машинобудування, 1977. - 523 с.
14. Ромашко А. М. Дослідження дискових колодкових гальм підйомно-транспортних машин. Дис. ... Кандидата техн. наук: М., 1979. - 254 с.
15. Чичинадзе А. В. Розрахунок і дослідження зовнішнього тертя при гальмуванні. - М .: Наука, 1967. - 232 с.
16. Александров М. П. Дослідження теплового режиму кранових гальм. Дис. доктора. техн. наук: М., 1953.
17. Олександр М.П. Гальмівні пристрої в машинобудуванні. - М .: Машинобудування, 1965. - 675 с.
18. Олександр М.П. Гальма підйомно-транспортних машин. - М .: Машинобудування, 1976. - 383 с.
19. Гінзбург А. Г., Чичинадзе А. В. Дослідження залежності коефіцієнта тертя від температури при нестационарному режимі тертя // Розрахунок і моделювання режиму роботи гальмівних і фрикційних пристроїв: Зб. науч. робіт. - М., Нука, 1974. - С. 24-28.
20. Крагельський І. В. Тертя і знос. - М .: Машинобудування, 1968. -480 с.
21. Дем'янюк В. А. Науково-Прикладні основи системного АНАЛІЗУ та оптимального проектування гальмових керування автобусів. Дис. Доктора техн. наук, - М., 1985.
22. Чіковані М. Г. Зниження теплового навантаження гальм ПТМ на основі аналізу деформованого стану фрикційної пари. Дис. кандидата техн. наук, - М., 1985. -190 с.

23. Іванов Л. Є. Дослідження кранових колодкових гальм зі збільшеним конвективним теплообміном з метою підвищення довговічності їх фрикційних елементів. Дис. кандидата техн. наук, - Харків, 1969.
24. Ісаченко В. П. та ін. Теплопередача: [Підручник для вузів] / В. П. Ісаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомель - 4-е изд., Перераб. і доп. - М.: Енергоіздат, 1981. - 416 с.: іл., Табл.
25. Міхеєв М. А., Міхеєва І. М. Основи теплопередачі. Вид. 2-е, стереотип. М.: Енергія, 1977.
26. Недужих І. А., Алабовський А. Н. Технічна термодинаміка і теплопередача: Учеб. посібник для вузів. 2-е изд., Перераб. і доп. / Упоряд. І. А. недужих, А. Н. Алабовський - Київ: Вища. школа. Головне вид-во, 1981. - 248 с.
27. Алабовський А. Н., недужих І. А. Технічна термодинаміка і теплопередача: Учеб. допомога. 3-е изд., Перераб і доп. - К.: Вища. школа, 1990. - 255 с., іл.
28. Ликов А. В. Теорія теплопровідності. - М.: Вища. школа, 1967. - 599 с.
29. Гальмівні пристрої: [Довідник] / М. П. Александров, А. Г. Лисяков, В. Н. Федосєєв, М. В. Новожилов; За заг. ред. М. П. Александрова. - М.: Машинобудування, 1985. - 312 с., Іл.
30. Старченко В.Н., Полупан Є.В. Аналіз впливу температури тертя на надійність і довговічність роботи гальмівного пристрою // Підйомно-транспортна техніка. - 2004. - №2. - С. 93- 97.
31. Вуколов Л.А., Жаров В.О. Порівняльні характеристики гальмівних колодок різних постачальників // Вісник ВНИИЖТ. - 2005. №2.
32. Автоматичні гальма: Підручник для вузів ж-д. трансп. / Упоряд. В. Г. Іноземцев, В. М. Казаринов, В. Ф. Ясенця. - М.: Транспорт, 1981. - 464 с.
33. Борисов С.М. Фрикційні муфти і гальма будівельних і дорожніх машин. - М.: Машинобудування, 1973. - 168 с.

34. Гайдамака В.Ф. Нові пускові і гальмові пристрої вантажопідіймальних машин. - Харків: Вища школа, Вид-во при Харк. Ун-ті, 1975. - 103 с.
35. Гайдамака В.Ф. Робота вантажопідійомних машин при безступінчастому гальмуванні. - Харків: Вища школа, 1988. - 141 с.
36. Федосєєв В.М., Чіковані М.Г. Триботехніка гальм підйомно-транспортних машин. / Теорія розрахунків і дослідження ПТМ .: Праці МВТУ. - М., 1985, №438, С. 42-57.
37. Борисов С.М. Дослідження фрикційних властивостей будівельних і дорожніх машин з метою підвищення їх ресурсу: Дис. ... Доктора техн. наук. - М., 1973. - 256 с.
38. Туренко А.Н., Богомолів В.О., Клименко В.І. та ін. Підвищення ефективності гальмування автотранспортних засобів з пневматичним гальмівним приводом. - Харків: ХГАДТУ, 2000. - 471 с.
39. Біленький Ю.Б., Дронин М.І., Метлюк Н.Ф. Нове в розрахунку і конструкції гальм автомобілів. - М.: Машинобудування, 1965. - 120 с.
40. Казаринов А.В., Волков П.Д. Гальмівні розрахунки і випробування з урахуванням температурної напруженості фрикційних пар // Вісник ВНИИЖТ. - 1988. - №1. - С. 34 - 44.
41. Богомолів В.А. Створення та дослідження системи управління гальмуванням автотранспортних засобів: Дис. ... доктора техн. наук. - Харків, 2001. - 555 с.
42. Булавкіна А.С. Особливості спільного використання дискових і барабанних гальмівних механізмів на легкових автомобілях: Дис. ... Кандидата техн. наук. - Харків, 1984. - 214 с.
43. Крагельський І.В., Чупилко Г.Є., Чичинадзе А.В. Процеси тертя в гальмах колесо. Підбір фрикційних пар. - М.: видавництво АН СРСР, 1955. - 235 с.

44. Крагельський І.В., Гітіс Н.В. Фрикційні автоколювання / Відп. Ред. Н.Б. Демкин; АН СРСР, Наук. рада з тертю і змащенням. - М.: Наука, 1987. - 181 с.
45. Зінов'єв Є.В. Чичинадзе А.В. Фізико-хімічна механіка тертя та оцінка асбофрикційних матеріалів. - М.: Наука, 1978. - 204 с.
46. Владимиров Н.Л. Підвищення ефективності дискового гальма автомобіля зниженням його термонагруженности: Дис. ... Кандидата. техн. наук. - М., 1987. - 174 с.
47. Вольченко О.І., Замора Ю.С. Барабанно-колодкові гальмівні пристрої. - Львів: Вища школа. Вид-во при Львів. ун-те.- 1980. - 191 с.
48. Довідник по кранах: У 2 т. Т. 2. Характеристики і конструктивні схеми кранів. Кранові механізми, їх деталі та вузли. Технічна експлуатація кранів / М. П. Александров, М. М. Гохберг, О. А. Ковин і ін.; За заг. Ред. М. М. Гохберг. - Л.: Машинобудування. Ленінград. отд-ня, 1988 г. - 559 с.: іл.
49. Гайдамака В. Ф. Вантажопідйомні машини: Підручник К.: Вища шк. Головне вид-во, 1989.-328 с.: іл.
50. Чотирбоки Ф.М. Гальмування кранових механізмів. - М.: Машгиз. 1950. - 158 с.
51. Федосєєв В.М., Чіковані М.Г. Триботехніка гальм підйомно-транспортних машин. / Теорія розрахунків і дослідження ПТМ.: Праці МВТУ. - М., 1985, №438, С. 42-57.
52. Зальцерман І. М., Комінській Д. П., Онопко А. Д. Фрикційні муфти і гальма гусеничних машин. - М.: Машинобудування, 1965, - 272 с.
53. Іноземцев В. Г. Теплові розрахунки при проектуванні та експлуатації гальм. - М.: Транспорт, 1966, -40 с.
54. Пижевіч Л. М. Розрахунок фрикційних гальм. - М.: Машинобудування, 1984. -228 с.

55. Тарасов К. І. Створення і дослідження керованого вантажопідйомного гальма. Дис. кандидата техн. наук. - Дніпропетровськ., 1976. - 189 с.
56. Вольченко А. І., Вольченко Д. А., Рибін Г. П., Кроль С.С., Данілін Ю. Є. Гальмівні механізми (теорія, розрахунок і конструювання). -Луганськ, 1995.-285с.
57. Кіфер Л. Г., Абрамович І. І. Вантажопідйомні машини. Частина 1 .: Машгаз. М., 1957.-488 с.
58. Бойко Г.А. Підвищення техніко-експлуатаційних показників мостових кранів на базі оптимізації процесу гальмування і розробки приладів контролю: Дис. ... Кандидата. техн. наук. - Луганськ, 1995. - 180 с.
59. Вольченко О.І., Сочавський З.А., Нізол І.Ф., Міхаловський С.І. Гальмівні пристрої. - Луганськ: Луганський робочий, 1993. - 289 с.
60. Вантажопідймальні машини: Навчальний посібник / Упоряд. Б. П. Румянцев. - Луганськ: Вид-во. СНУ, 2001. - 285 с.
61. В. Н. Старченко, Є. В. Полупан. Дослідження теплового стану фрикційних накладок гальмівних пристроїв транспортних машин // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - 2006. - №7 (101). - С.56-61.
62. Питання атомної науки і техніки. Серія: Фізика радіаційних ушкоджень і радіаційне матеріалознавство. Випуск 4 (76) Харків 1999.
63. А. С. Фіалков. Вуглецеві матеріали. Москва: Енергія, 1979, 117 стор.
64. А. А. Конкін. Термо-жаростойкие і негорючі волокна. Москва: 1979, 112 стор.
65. E. Fitzer, The future of carbon-carbon composites, Carbon, v.25, №2, 1987, pp 13-190.
66. E. Bruneton, B. Narciy and A. Oberlin, Carbon-carbon composites prepared by a rapid densification prose: 1. Syntesis and phisico-chemical data, Carbon, v.35, №10-11, 1997, pp 1593-1599.

67. В. А. Гурін, В. Є. Іванов, В. Ф. Зеленський, М. Г. Колендовській. Об'ємне ущільнення графіту піроуглеродом // Праці 1-й конференції по пірографіту, Москва, 1963, с. 267-272.

68. VA Gurin. Researches and development of the production technologies of, crucibles, tubes, thin walled cylinders, cones and other technological rigging for the electrothermal. STCU, project 293-technical report on stage 4, 1997, pp 1-49.

69. В.А. Гурін, І.В. Гурін, С.Г. Фурсов. Дослідження газофазного ущільнення піроуглеродом пористих середовищ методом радіально рухається зони піролізу // ВАНТ, серія ФРП і РМ. - 1999. - №76. - С.32-45.

70. В.А. Гурін, В.Ф. Зеленський. Газофазного методи отримання вуглецевих і вуглець-вуглецевих матеріалів // ВАНТ, серія ФРП і РМ. - 1999. - №76. - С.13-31.

71. В.А. Гурін, І.В. Гурін. Вуглець - вуглецеві композиційні матеріали фрикційного призначення // Вісник Дніпропетровського університету. Ракетно-космічна техніка. - 2000. - №4. - С.25-31.

72. Старченко В.Н., Гурін В.А .. Полупан Є.В., Гурін І.В. Триботехнические характеристики нових фрикційних матеріалів // Вісник Східноукраїнського університету ім. В. Даля. - 2005. - №8 [90], ч.1. - С.121-126

73. І. В, Гурін, В. А, Гурін, С. Г. Фурсов. Комп'ютерний розрахунок параметрів ущільнення пористих середовищ методом рухається зони піролізу // ВАНТ, ФРП і РМ. - 1998. - №1 (67) 2 (68). - С.79-81.

74. В.А .. Гурін, В.Є. Іванов, В. Ф. Зеленський, М.Г. Колендовській. Об'ємне ущільнення графіту піроуглеродом. Праці першої конференції по пірографіту. Москва, 1963, с.267-272.

75. Гурін В.А., Гурін І.В., Неклюдов І.М., Фурсов С.Г. Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали фрикційного призначення. Порошкова металургія, 2001., с.1-8.

76. Ефрос А.П. Фізика і геометрія безладу. - Москва, 1982. - 175с.

77. Крагельський І. В. та ін. Про оцінку зносостійкості матеріалів по фактору зносу // Розрахунково-експериментальні методи оцінки тертя та зносу. - М.: Наука, 1980. - с. 17-22.

78. Чичинадзе А. В., Білоусов В. Я., Богатчук І. М. Зносостійкість фрикційних полімерних матеріалів. - Львів: Вид-во при ЛДУ, 1989. - 142 с.

79. Чичинадзе А. В., Браун Е. Д., Буше Н. А. Основи трибології. Тертя, знос, змащування. - М.: Машинобудування, 2001. - 66 с.

80. Чичинадзе А. В. Полімери в вузлах тертя машин і приладів: [Довідник] / А. В. Чичинадзе, А. Л. Левін, М. М. Бородулін, Е. В. Зінов'єв, 2-е изд., Перераб. і доп. - М.: Машинобудування, 1988. - 328 с.

81. Вольченко А. І., Сочавський З. А., Вольченко Д. А. І ін. Розрахунок і конструювання гальмівних пристроїв. - Ташкент, Мехнат, 1990. - 287 с.

82. Вольченко Д. А. Підвищення експлуатаційних характеристик важко навантажених фрикційних вузлів: Дис. ... Кандидата техн. наук. - Івано-Франківськ, 1983. - 177 с.

83. Гудз Г. С. Дослідження температурного режиму торомозних механізмів: Дис. ... Кандидата техн. наук. - Львів, 1971. - 137 с.

84. Гудз Г. С. Температурні режими фрикційних вузлів автотранспортних засобів. - Харків: РІО ХГАДТУ, 1998. - 139 с.

85. Старченко В. Н., Полупан Е. В., Шевченко С. І. Підвищення ефективності гальмування використанням нових вуглець-композиційних матеріалів // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - 2004. - №7 (77), частина 1. - С. 137-142.

86. Старченко В. Н., Шевченко С. І., Хухла К. С. Гальма з плаваючими колодками для грузоподійних і транспортних машин // Вісник Східноукраїнського державного університету. - 1996. - Сер. Транспорт. - С. 14-18.

87. Старченко В. Н., Шевченко С. І., Полупан Е. В. Дослідження впливу характеру наростання гальмівного моменту на динамічні навантаження

механізмів машин. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - 2004. - №7 (77), частина 2. - С. 48-52.

88. Шевченко С.І., Старченко В.Н., Білоус В.В. Про можливість застосування аналого-цифрових перетворювачів при експериментальних дослідженнях // Вісник Східноукраїнського державного університету. - 2000. - №6 (28). - С. 36-40.

89. Старченко В.Н., Шевченко С.І., Полупан Є.В. Аналіз кінематичної схеми гальмівного пристрою для транспортних машин з додатковим ступенем рухливості гальмівних колодок // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - 2002. - №6 (52). - С. 132-135.

90. Старченко В.Н., Полупан Е.В., Шевченко С.І, Бондаренко А.Ф. Вплив додаткового ступеня рухливості гальмівних колодок на процес гальмування ГПМ // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - 2002. - № 10 (56). - С. 243-246.

91. Федосєєв В. Н. Моделювання процесу зношування фрикційних пар гальмівних пристроїв ПТМ: Дис. кандидата. техн. наук. - М., 1974. - 175 с.

92. Борисов С.М. Дослідження фрикційних властивостей будівельних і дорожніх машин з метою підвищення їх ресурсу: Дис. ... Доктора техн. наук. - М., 1973. - 256 с.

93. Туренко А.Н., Богомолів В.О., Клименко В.І. та ін. Підвищення ефективності гальмування автотранспортних засобів з пневматичним тормозной приводом. - Харків: ХГАДТУ, 2000. - 471 с.

94. Туренко А.Н., Богомолів В.О., Клименко В.І. та ін. Удосконалення способів регулювання вихідних параметрів гальмівної системи автотранспортних засобів. - Харків: ХНАДТУ, 2002. - 398 с.

95. Ламбарян Н.А. Дослідження теплових і ізносних процесів в гальмах підйомно-транспортних машин: Дис. ... Кандидата техн. наук. - М., 1979. - 175 с.

96. Городетский С.Н. Вибір геометричних параметрів дискового гальма з метою поліпшення його температурних характеристик: Дис. ... Канд. техн. наук. - М., 1983. - 133 с.
97. Ларін Т.В. Асташкевіч Б.М. Вплив площі тертя трмозной колодки на її знос і фрикційні властивості // Вісник ВНИИЖТ. - 1978. - №4. - С. 33-35.
98. Ларін Т.В. Фосфор як модифікатор, що сприяє підвищенню фрикційних властивостей і зносостійкості чавунів гальмівних колодок // Вісник ВНИИЖТ. - 1987. - №3. - С. 26-30.
99. Вуколов Л.А., Жаров В.О. Коефіцієнти тертя і зносостійкість чавунних гальмівних колодок з різним вмістом фосфору // Вісник ВНИИЖТ. - 1982. - №6. - С. 34-37.
100. Берг Ю., Калінковській А. Випробування гальмівних накладок з композиційних матеріалів // ЗАЛІЗНИЦІ СВІТУ. - 1985. - №6. - С. 39-42.
101. Цудзімура Т. І ін. Гальмівні колодки зі спеціального чавуну // ЗАЛІЗНИЦІ СВІТУ. - 1992. - №6. - С. 30-34.
102. Кеглін Б.Г. Параметрична надійність фрикційних пристроїв. - М.: Машинобудування, 1981. - 136 с.
103. Казаринов А.В., Волков П.Д. Гальмівні розрахунки і випробування з урахуванням температурної напруженості фрикційних пар // Вісник ВНИИЖТ. - 1988. - №1. - С. 34 - 44.
104. Чичинадзе А. В. Полімери в вузлах тертя машин і приладів: [Довідник] / А. В. Чичинадзе, А. Л. Левін, М. М. Бородулін, Е. В. Зінов'єв. - М.: Машинобудування, 1988. - 328 с.
105. Євдокимов Ю. А., Колесніков В. І., Тетерін А. І. Планування та аналіз експериментів при вирішенні задач тертя і зносу. - М.: Наука, 1980. 228 с.
106. Налімов В. В., Голікова Т. І. Логічні підстави планування експерименту. - М.: Металургія, 1981. 180 с.

107. Барабашук В. І. Планування експерименту в техніці / В. І. Барабашук, Б. П. Креденцера, В. І. Мірошніченко. - К .: Техніка, 1984. - 200 с .: іл. Бібліог .: с. 196-198.
108. Будік Л.Я. Багатопараметричний аналіз динаміки вантажопідіймальних кранів мостового типу. - Луганськ: Вид-во ВУГУ, 1997. - 210 с.
109. Бежок Г.В. Оптимізація процесу гальмування мостового крана за допомогою керованого електромагніту гальма: Дис. ... Канд. техн. наук. - Ворошиловград, 1984. - 173 с.
110. Будік Л.Я., Хоан Дик Хоа, Медведєв Г.М. Оптимізація гальмівної характеристики приводу пересування електромостових рейферних кранів вантажопідйомністю 5 т прольотом 22,5 м. - Луганськ, 1992. - 17 с.
111. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановський Ю.В. Планування експерименту при пошуку оптимальних умов. Вид. 2-е. - М .: Наука, 1976. - 279 с.
112. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимізація процесів технології металів методами планування експериментів. - М .: Машинобудування; Софія: Техніка, 1980. - 304 с.
113. Будік Л. Я. багатопараметричних аналіз динаміки вантажопідйомних кранів мостового типу / СНУ розум. В. Даля. - Луганськ: вид-во СНУ розум. В. Даля, вид. 2-е, 2003. - 210 с.
114. Козак С. А. Динаміка мостових кранів. Вид-во "Машинобудування", 1968. - 332 с.