

**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 274 Автомобільний транспорт  
спеціальності 8.07010601 Автомобілі та автомобільне господарство

на тему: «Дослідження теплових процесів в гальмових пристроях автомобілів з  
перспективними фрикційними матеріалами»

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

.....  
(підпис)

Керівник: доц. Шевченко С.І.

.....  
(підпис)

Завідувач кафедри: проф. Горбунов М.І.

.....  
(підпис)

Рецензент:

.....  
(підпис)

Сєверодонецьк – 2018

**РЕЦЕНЗІЯ**

На магістерську роботу: “Дослідження теплових процесів в гальмових пристроях автомобілів з перспективними фрикційними матеріалами ”

студента групи АТ-16дм

Степуренко Віктора Віталійовича.

Магістерська робота студента Степуренко Віктора Віталійовича, що рецензується, присвячена актуальному питанню дослідження теплових процесів у дискових гальмових пристроях з запровадженням нових фрикційних матеріалів, а зокрема розробці математичної моделі розрахунку розподілу температурних полів в дискових гальмах з метою підвищення ефективності гальмування, виконання вимог по часу гальмування автомобілів. Магістерська робота виконана відповідно до завдання.

Запропоновані нові гальмівні колодки з вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів, що мають високу стійкість до дії температури в контактній зоні і що зберігають при цьому високий коефіцієнт тертя, дозволяють рекомендувати їх використання в машинах і механізмах з важкими режимами експлуатації, особливо в транспортних машинах при тривалих і частих гальмуваннях. Крім того, використання запропонованих матеріалів дозволяє підвищити безпеку руху у випадках екстреного (аварійного) гальмування.

У роботі, для аналізу експериментально отриманих даних, широко використовується ЕОМ.

Практична цінність роботи на мій погляд, полягає в підвищенні ефективності гальмування використання нових фікційних матеріалів які мають достатньо високі технічні характеристики.

Зауваження до магістерської роботи в цілому:

Автор роботи досліджує теплові процеси в гальмових пристроях автомобілів з перспективними фрикційними матеріалами, але на жаль недостатньо чітко у роботі описані дорожні випробування дискових гальмівних механізмів.

У цілому робота виконана на хорошому науковому рівні із застосуванням сучасних теоретичних методів, присвячена актуальній тематиці, містить наукову новизну та практичну цінність, і на мій погляд відповідає вимогам до магістерських робіт, а її автор Степуренко Віктор Віталійович заслуговує присудження йому кваліфікації магістра по спеціальності «Автомобілі та автомобільне господарство».

Рецензент \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота складається з вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел з 54 найменувань 140 сторінок, 8 таблиць, 50 малюнків.

У роботі проведений статистичний аналіз тенденцій розвитку гальмівних систем автомобільних транспортних засобів (АТС), методів виробництва нових вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (В-ВКМ) і керамічних композиційних матеріалів (ККМ) та перспектив застосування різних видів дискових гальм на автобусах малого і середнього класів.

Підтверджена ефективність використання в якості гальмівних колодок нового В-ВКМ на основі вуглецевої матриці з армуючим каркасом з вуглецевих волокон структури 2-d, ущільнені піроуглеродом до щільності 1,36-1,38 г/см<sup>3</sup>. А також доведено, що перспективними є фрикційні В-ВКМ з армуючим каркасом з високомодульних вуглецевих волокон структури 3d, 4d, nd, модифіковані введенням в матрицю аморфного бору, карбїду бору, карбїду кремнію і ін.

Розроблена математична модель розподїлу температурних полів дискових гальмівних механїзмів (ДТМ) в середовищі Mathcad.

Ключові слова: автомобіль, гальма, механізми гальмівні дискові, механізми гальмівні барабанні, дослідження експериментальні, матеріали фрикційні, коефіцієнт тертя, диск гальмівний, поля температурні, напруга термічна, охорона праці, матеріали композиційні вуглець-вуглецеві, освітленість

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Інститут транспорту і логістики

Кафедра залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки 274 Автомобільний транспорт

Спеціальність 8.07010601 Автомобілі та автомобільне господарство

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри д.т.н.,  
проф.**

Горбунов М.І.

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2017  
року

**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Степуренко Віктора Віталійовича

**1. Тема роботи: Дослідження теплових процесів в гальмових пристроях автомобілів з перспективними фрикційними матеріалами.**

**Керівник роботи            Шевченко С.І., к.т.н.**

затверджені наказом вищого навчального закладу від “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2017 року №\_\_\_\_\_

3. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ року.

4. Вихідні дані до роботи: літературні джерела авторів: Р.А. Акопян, І.І. Будько, Ц.Р. Борисов, А.А. Велетнів, М.Л. Володимиров, Е.Д. Браун, А.Б. Гредеськул, Г.С. Гудз, А.Г. Гинзбург, В.А. Кульов, В.Я. Кушов, Р.О. Меламуд, І.С. Оржевський, М.А. Подрігало, Е.Б. Решитників, А.М. Туренко, О.С. Федосов, А.В. Чичинадзе, Я.П. Яворський, та інші.

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

Вступ.

**Розділ 1. Аналіз досліджень дискових гальм і фрикційних матеріалів.**

Розділ 2. Аналіз досліджень автобусних дискових гальмових пристроїв.

Розділ 3. Математичне моделювання теплових процесів в дискових гальмових пристроях.

Розділ 4. Нові фрикційні матеріали для дискових гальм.

Розділ 5. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.

Висновок.

Список використаних джерел.

6. Перелік графічного матеріалу наводиться у вигляді презентації для публічного захисту.

### 7. Консультанти розділів роботи

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

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### *КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН*

№ з/п	Назва етапів дипломного проектування	Строк виконання етапів	Примітка
1	Вступ.		
2	<b>Розділ 1. Аналіз досліджень дискових гальм і фрикційних матеріалів.</b>		
3	Розділ 2. Аналіз досліджень автобусних дискових гальмових пристроїв.		
4	Розділ 3. Математичне моделювання теплових процесів в дискових гальмових пристроях.		
5	Розділ 4. Нові фрикційні матеріали для дискових гальм.		
6	Розділ 5. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.		
7	Висновки.		
8	Список літератури.		

9	Перевірка науковим керівником.		
10	Розробка презентації по роботі.		
11	Оформлення проекту.		
12	Попередній захист.		
13	Рецензування.		
14	Захист в ДЕК.		

Студент \_\_\_\_\_ Степуренко В.В.  
( підпис )

Керівник проекту (роботи) \_\_\_\_\_ Шевченко С.І.  
( підпис )

## ЗМІСТ

ВВЕДЕННЯ.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИСТРОЇВ ДИСКОВИХ ГАЛЬМ І ФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	10
1.1 Вентильовані диски гальмівних систем.....	11
1.2 Методи виробництва нових фрикційних матеріалів.....	13
1.3 Властивості і фізико-хімічні характеристики матеріалів дискових гальм.....	19
1.3.1 Металеві і неметалеві фрикційні матеріали.....	20
1.3.2 Порошкові матеріали.....	21

1.3.3 Фрикційні асбополімерні матеріали.....	23
1.3.4 Композиційні матеріали.....	28
1.3.5 Структура і властивості композитів.....	28
1.3.6 Фізико-механічні характеристики композитів.....	31
1.3.7 Вуглець -вуглецеві фрикційні матеріали.....	33
1.4 Умови роботи фрикційних вузлів гальм і навантаження, що діють на них.....	41
1.5 Вимоги до фрикційних матеріалів.....	45
1.6 Висновок до розділу.....	50
<b>РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АВТОБУСНИХ ДИСКОВИХ ГАЛЬМОВИХ ПРИСТРОЇВ.....</b>	<b>51</b>
2.1 Дисківий гальмовий механізм з клинково - роликівим перетворювачем, розташованим перпендикулярно до гальмового диска .....	51
2.2 Дисківий гальмовий механізм з силовим приводом у вигляді пневмомотора.....	52
2.3 Дисківий гальмовий механізм з гідравлічним приводом.....	55
2.4 Висновок до розділу.....	58
<b>РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ДИСКОВИХ ГАЛЬМОВИХ ПРИСТРОЯХ.....</b>	<b>61</b>
3.1 Алгоритм розрахунку дисківих гальм.....	61
3.2 Математична модель температурного поля гальмівної колодки.....	65
3.3 Залишкові зміни в матеріалах при визначенні температури гальмування.....	86
3.4 Дорожні випробування нових дисківих гальмових механізмів.....	91
3.4.1. Дисківий гальмовий механізм з клиново – роликівим перетворювачем,	



розташованим перпендикулярно до гальмового диску.....	92
3.4.2. Дисковий гальмовий механізм з гідравлічним приводом.....	92
3.5 Висновок до розділу.....	95
<b>РОЗДІЛ 4. НОВІ ФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДИСКОВИХ ГАЛЬМ ТРАНСПОРТНИХ МАШИН.....</b>	<b>96</b>
4.1 Фрикційні гальмівні матеріали для гальм транспортних машин.....	96
4.2 Нові вуглець - вуглецеві фрикційні матеріали.....	98
4.3 Експериментальні дослідження нових матеріалів.....	106
4.4 Висновок до розділу.....	114
<b>РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ЯКОСТІ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ НА БЕЗПЕКУ РУХУ ТРАНСПОРТУ.....</b>	<b>115</b>
<b>ВИСНОВОК .....</b>	<b>120</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>123</b>
<b>ДОДАТОК.....</b>	<b>128</b>

## ВВЕДЕННЯ

Технічний прогрес транспортних і ряду інших машин супроводжується значним збільшенням вантажопідйомності, швидкості руху і, як наслідок, збільшенням навантаження на їх гальмівні пристрої. Це викликає необхідність розробки і застосування нових фрикційних матеріалів для виготовлення гальмівних дисків і колодок, що забезпечують стабільний коефіцієнт тертя при високих температурах.

Проблема підвищення надійності гальмівних пристроїв, стає вельми важливою для сучасних механізмів, оскільки їх вузли і деталі часто конструктивно складні, працюють в умовах великих навантажень, швидкостей, температур, а відмови окремих елементів систем або виробів можуть привести до значних втрат.

Від типу матеріалу, застосованого для виготовлення деталі (елементу) виробу, як відомо, залежать її прочностні і інші властивості. Крім того, залежно від типу матеріалу (метал, полімер) при експлуатації виробу в ньому протікають різні процеси, що впливають на працездатність деталей, можливість появи відмов, а також довговічність.

Фізико-хімічні процеси по місцю їх протікання можна розділити на процеси, що проходять в об'ємі матеріалу деталі або в його поверхневому шарі. Значний вплив на працездатність деталей роблять процеси, що протікають в поверхневому шарі матеріалів. Поверхня деталей піддається дії зовнішнього середовища (волога, забруднення, поверхнево-активні речовини і т. д.).

У вузлах тертя машин великий вплив на силу тертя, знос і довговічність деталей, а отже, на довговічність машини в цілому надає стан поверхневих шарів матеріалу деталі, яке в науці про тертя і знос прийнято називати «третім тілом» (шаром вторинних структур або робочим шаром). Особливе значення фізико-хімічні властивості «третього тіла» мають в деталях гальмівних пристроїв, що труться, оскільки при їх роботі виникають високі температури, що приводять до інтенсивних змін властивостей поверхневих шарів матеріалів.

Процеси що протікають в поверхневих шарах деталей, що труться, є наслідком перетворення одного виду енергії в іншій. Типове перетворення

механічної енергії на теплову відбувається в гальмівних пристроях при їх роботі. Відомо, що як в гальмах, так і в інших механізмах теплові явища роблять значний вплив на зміну властивостей матеріалів деталей (елементів), вузлів і агрегатів, а отже, і на показники надійності. Гальмівні пристрої створюють опір руху машини або її окремих агрегатів, що необхідне для зупинки, регулювання швидкості або утримання машини на місці. Особливе значення для забезпечення нормальної експлуатації мають гальма транспортних і вантажопідйомних машин, оскільки вони значною мірою гарантують їх безпечну роботу.

Проблема гальмування машин, що діють і проектуються, є вельми складною. До гальм і їх фрикційних вузлів пред'являються вимоги, які не завжди можуть бути повністю виконані. В деяких випадках ці вимоги суперечливі. Наприклад, фрикційні матеріали, від властивостей яких залежать головним чином експлуатаційні характеристики гальма, при достатньо високому коефіцієнті тертя і високій температурі повинні володіти можливо мінімальним зносом, тобто гальмо повинне розташовувати при малих габаритах значним гальмівним моментом при збереженні достатнього ресурсу.

Від різноманіття конструктивних форм машин, широкого діапазону потужності, що поглинається гальмами, напруженість, і особливо теплові режими гальм різні. Це викликає необхідність застосування не тільки гальм різних конструкцій, але і різних фрикційних матеріалів, іноді навіть для одного і того ж типу машин. Зустрічаються гальмівні пристрої, матеріали яких повинні мати високі експлуатаційні характеристики у вельми широких діапазонах температур.

Гальмівні механізми бувають різних типів: механічні (фрикційні), гідравлічні, електричні. Найбільш поширеними і ефективними гальмівними механізмами є фрикційні, принцип дії яких заснований на терті деталей, що обертаються, об тих, що не обертаються. За типом розрізняють барабанні і

дискові гальмівні механізми. Деталлями барабанних гальм, що не обертаються, можуть бути колодки або стрічки, дискових гальм - тільки колодки.

Аналіз конструкцій гальмівних пристроїв різних типів, їх несправностей і відмов при експлуатації, а також основних вимог, що пред'являються до гальм, указує на особливе значення фрикційних матеріалів в проблемі надійності гальмівних пристроїв. Дійсно, багато головних вимог, що пред'являються до гальм, відносяться до якості і властивостей фрикційних матеріалів. Як відомо, при роботі гальма відбувається перетворення кінетичної енергії рухомої маси на теплову при терті деталей гальма, виготовлених з фрикційних матеріалів. Ця енергія в деяких гальмах досягає вельми значних величин. Градієнт температури по глибині гальмівного диска, наприклад, може скласти 800 - 1000 °С/мм.

У зв'язку з цим виникають завдання, одне з яких, наприклад, зводиться до правильного розрахунку і проектування гальма з метою запобігання перегріву фрикційних елементів гальма при його роботі; інше - пов'язане з властивостями вживаного фрикційного матеріалу. Властивості матеріалу в допустимому для нього діапазоні температур не повинні різко змінюватися і, таким чином, не повинні впливати на характеристики роботи гальма.

Знос деталей машин при терті, як відомо, викликає значні витрати засобів на виготовлення запасних частин, ремонт і заміну окремих вузлів і агрегатів в процесі їх експлуатації. Крім того, простої машин при технічному обслуговуванні, викликані необхідністю заміни зношених або пошкоджених деталей, збільшують вартість їх експлуатації.

Розглядаючи тертя і знос твердих тіл як поєднання механічних, фізичних і хімічних процесів, що відбуваються при терті і зносі, пояснення їх і розробку методів управління ними. Існують різні теорії тертя. Найбільш широкий розвиток і визнання отримала молекулярно-механічна теорія тертя.

**Актуальність теми.** Безпека руху автомобілів з високими швидкостями в значній мірі визначається ефективністю дії гальмівних пристроїв. Чим ефективніше

дія гальмівних пристроїв, тим вище безпечна швидкість руху автомобіля на дорозі. Проблема високих температур і перегріву фрикційного матеріалу, унаслідок чого відбувається інтенсивний знос і пониження коефіцієнта тертя, при тривалому гальмуванні надзвичайно багатообразна і складна. За останні десятиліття вітчизняна наука, що займається дослідженням проблеми перегріву фрикційного матеріалу, зношування і підвищення довговічності гальмівної системи, отримала значний розвиток.

Гальмування необхідне не тільки для швидкої зупинки автомобіля при раптовій появі перешкод, але і як засіб управління швидкістю його руху.

Актуальність даної теми визначається тим, що в сучасних умовах безперервне зростання швидкості автомобілів досить високе, необхідно забезпечити безпеку руху і виконання вимог по довжині гальмівного шляху, часу гальмування і уповільненню, що допускається.

**Ціль і завдання досліджень.** розробка математичної моделі розрахунку температурних полів в дискових гальмівних пристроях з новими фрикційними матеріалами.

У відповідності до визначеної мети, в магістерській роботі треба вирішити такі задачі:

1. Виконати огляд попередніх досліджень дискових гальмівних механізмів і фрикційних матеріалів.
2. Провести аналіз експериментальних досліджень автобусних дискових гальмових пристроїв.
3. Розробити алгоритм розрахунку температурних полів дискового гальмівного механізму.
4. Розробити математичну модель температурних полів для різних пар тертя.
5. Виконати аналіз дорожніх випробувань автобусних дискових гальмівних пристроїв.
6. Встановити експериментальним шляхом закономірності теплових процесів при гальмуванні новими вуглець-вуглецевими колодками.

**Об'єктом дослідження** є теплові процеси в дискових гальмових механізмах з використанням нових фрикційних матеріалів.

**Предмет дослідження** є математичне моделювання розподілу температурних полів за допомогою засобів MathCad.

**Матеріалом дослідження** послужили спеціальні технічні видання, патентний фонд і періодичні видання.

**Структура та обсяг роботи.** Магістерська робота складається зі вступу, п'ятих глав, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи містить – 77 сторінок, презентація магістерської роботи містить – 12 слайдів

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИСТРОЇВ

### ДИСКОВИХ ГАЛЬМ І ФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Загальною тенденцією розвитку і вдосконалення сучасних транспортних засобів є підвищення потужності і збільшення швидкості руху. А значить, актуальніше стає проблема гальмування. До елементів гальмівних систем пред'являється достатньо великий перелік вимог, які в сукупності повинні забезпечувати безпеку при гальмуванні, виконувати постійно зростаючі нормативні вимоги до величини гальмівного шляху, часу гальмування і уповільнення, що допускається. Крім того,

повинні забезпечуватися довготривалість терміну експлуатації, економічність і технологічність процесу виготовлення і ремонту, незалежність трибологічних характеристик від температурних і погодних умов, стабільність при тривалих термінах експлуатації гальмівних систем, малозумність процесу гальмування і так далі.

Завдяки ряду переваг, властивих дисковим гальмівним механізмам, спостерігається розширення їх використання в автомобілебудуванні. Цим обгрунтовується актуальність питань, пов'язаних з підвищенням їх міцності і надійності, які значною мірою обгрутовуються розміром механічної і термічної напруги, яка виникає в плямі контакту гальмівного диска і колодки.

Значний внесок до досліджень робочих процесів дискових гальм і розробки їх конструкцій внесли такі учені як Р.А. Акопян, І.І. Будько, Ц.Р. Борисов, А.А. Велетнів, М.Л. Володимиров, Е.Д. Браун, А.Б. Гредеськул, Г.С. Гудз, А.Г. Гинзбург, В.А. Кульов, В.Я. Кушов, Р.О. Меламуд, І.С. Оржевський, М.А. Подрігало, Е.Б. Решитників, А.М. Туренко, О.С. Федосов, А.В. Чичинадзе, Я.П. Яворський і ін.

Питання удосконалення аналітичних моделей механічних і теплових процесів в дискових гальмівних механізмах (ДТМ) і розробки ДТМ з внутрішньою скобою розглянуті в роботі [12]. Аналіз робочих процесів у фрикційній парі ДТМ, дослідження її довговічності і розробка уніфікованих ДТМ для колісних тракторів приведені в роботі [21]. Дослідження температурних режимів і розробка конструкції закритого ДТМ викладені в роботі [27]. Нові конструкції ДТМ запропоновані також в роботах [5, 6, 8]. Динамічні процеси в ДТМ досліджувалися в роботах [2, 3].

Моделюванню теплових процесів з використанням методу теплового балансу присвячені роботи [16, 23] - для барабанних гальмівних механізмів (БТМ) і [4, 9, 25, 26, 14] - для ДТМ, а результати експериментальних досліджень розподілу температур в ДТМ наводяться в роботах [7, 17].

Моделювання температур з використанням фізичних і математичних моделей проведене в роботах [1, 3, 8] для БГМ, і [25, 44, 48] - для ДТМ.

Питанням дослідження термічної міцності ДТМ і впливу на неї різних чинників присвячені роботи [7, 10, 11, 13]. У роботі [34] розглянутий частковий випадок, якщо температура не змінюється по радіусу диска і фланець диска холодний, а в роботі [18] досліджувалася середня дотична напруга, викликана гальмівним моментом. Вплив різних варіантів кріплення диска досліджений в роботах [35, 36], а в роботі [22] вивчений також питання термоциклічної міцності диска.

Аналіз цих робіт показує, що в них не приділено належної уваги аналізу залежності температури від виду матеріалу вживаного в гальмівних пристроях при реальних законах розподілу температурних полів і застосуванню сучасних методів математичного моделювання розподілу теплових процесів в ДТМ.

### 1.1. Вентильовані диски гальмівних систем

Гальми - це пристрій для зниження швидкості руху або для здійснення повної зупинки машини або механізму. Кінетична енергія перетворюється за допомогою тертя в тепло, тому ми говоримо про «фрикційні гальми». Дотичні поверхні - гальмівний диск або гальмівний барабан з сірого чавуну або литої сталі, і гальмівні накладки.

Збільшення швидкісних можливостей автомобілів привело до впровадження дискових гальм. Дискові гальма розсіюють тепло набагато краще, ніж барабанні. І сам диск, і кріпильна скоба для кріплення гальмівних механізмів, і гальмівні колодки відкриті для доступу повітря. Вільне обдування гальм виключає зниження гальмуючої дії.

Вага гальмівного диска не менш важлива для його якісної роботи, ніж діаметр і конструкція. Зв'язано це з такими характеристиками, як теплоємність і



тепловіддача. Є ще один аспект впливу ваги гальм на керованість транспортного засобу. Існує так званий гіроскопічний ефект. Він полягає в тому, що чим більше маса тіла, що обертається, тим складніше за неї вивести з рівноваги. Особливо це стосується маневрування на високих швидкостях.

Боротьба за зниження підпружинних мас і поліпшення відведення тепла привела до створення так званих вентилярованих дисків. Вони є своєрідним сендвіч з двох дисків, між якими зроблені спеціальні отвори, що формують лопаті, у вигляді турбіни (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Вентильований гальмівний диск

Завдяки цим лопастям і каналам тепло відводиться ефективніше, а вага диска знижується. При навантаженнях гальмівні диски можуть нагріватися до дуже високих температур, і якщо це тепло передасться маточині - вірогідний вихід з ладу цього вузла. Рішення цього питання знайшлося у виготовленні розбірних гальмівних дисків. Вони є безпосередньо робочим диском, що скріплює болтовим з'єднанням з середньою частиною, яка кріпиться на маточину. Часто можна зустріти гальмівні диски з перфорацією і канавками (шліцами). Виконані по всій робочій площині диска крізні отвори знижують вагу диска, сприяють ефективнішому зниженню його температури при роботі, видаляють газ, що утворюється при терті колодок об диск. Отже їх відведення у край важливе, особливо в гальмах, що працюють в граничних режимах. Перфорація попереджає викривлення гальмівного диска. Канавки спільно з отворами сприяють видаленню води, бруду, пилу, що знижує ризик подряпати гальмівний диск. І канавки, і перфорація збільшують додаткову гальмівну силу і зменшують знос диска. Автоспорт, з його підвищеними навантаженнями на гальма зажадав ефективного очищення гальмівних колодок. Річ у тому, що при роботі на великих навантаженнях гальмівні колодки дуже

швидко покриваються тонким шаром нагару - вигорілого і відпрацьованого фрикційного матеріалу. Канавки і шліци зрізають цей відпрацьований шар, оновлюючи колодку. Це дозволяє підтримувати працездатність колодок впродовж всієї гонки.

Австралійська компанія DBA запатентувала передову технологію системи вентиляції гальмівного диска (рис. 1.2). Назвали такі диски «Kangaroo Paw (Лапа Кенгуру)». Назва обумовлена тим, що в розрізі перемички між двома половинками диска нагадують слід кенгуру. Завдяки тому, що 144 стовпчики мають особливу форму і розташовані в певному порядку між двома сторонами гальмівного диска, створюється ефект ротора. Обертання диска приводить до утворення турбулентності повітря усередині диска, збільшуючи його швидкість. Це приводить до того, що гаряче повітря виштовхується з усередині дискового простору, сприяючи інтенсивнішому охолодженню. Така архітектура гальмівного диска робить

його міцнішим і стабільнішим при загальному зниженні маси.



Рис. 1.2. Вентильований гальмівний диск «Kangaroo Paw»

Ще одна американська компанія Delphi модернізували весь дисковий гальмівний механізм. Вони зробили дводискові гальма для передніх коліс автомобіля, що отримав назву «Twin Disk». Тут для гальмування використовуються не дві, а три гальмівні колодки. До звичайної пари додається середня колодка, розташована між двох «плаваючих» дисків, не зв'язаних один з одним

перегородками. Завдяки такій компоновці гідравлічний поршень переносить своє зусилля не на дві площини гальмівного диска, як завжди, а відразу на чотири. Тим самим ефективність гальм, динаміка гальмування збільшується в 1,7 разу в порівнянні

із звичайними дисковими гальмами. Зусилля на педаль знижується практично удвічі. Крім того, вентиляція таких дисків значно краща.

## 1.2. Методи виробництва нових фрикційних матеріалів

Серед сучасних волокнистих ККМ виділяються композити з SiC матрицею, армовані вуглецевими волокнами. Завдяки виключно високій твердості і стійкості до абразивного зносу карбіду кремнію, такі композити є одними з найперспективніших сучасних матеріалів для виробів тріботехнічного і, перш за все, фрикційного призначення.

Відзначимо, що до останнього часу В-ВКМ і ККМ, в основному, використовувалися в спеціальних сферах застосування таких, як ракетно-космічна, авіаційна, атомна енергетика і т.д. Найважливіша проблема розширення сфер застосування цих унікальних матеріалів у виробах масового попиту, до яких можна віднести і системи гальмування різних транспортних засобів, полягає в розробці економічно ефективної технології отримання такого типу композитів. Найбільш загальна схема технологічного процесу виробництва виробів з волокнисто-армованих композитів з вуглецевою і керамічною матрицею, у тому числі і фрикційного призначення, включає операції:

- 1) отримання волокнистого каркаса (пресформи) з хаотичним або орієнтованим розташуванням волокон;
- 2) насичення (ущільнення) волокнистого каркаса матричним матеріалом;
- 3) механічна обробка отриманої заготовки.

В даний час другу найбільш важливу операцію технологічного процесу - ущільнення каркаса - реалізують за допомогою різних твердо-, жидко- і газофазних методів, а також їх комбінацій.

### ***Твердофазні методи отримання ККМ:***

1) у групі методів отримання В-ВКМ і ККМ твердофазні технології є найменш поширеними і використовуються тільки для отримання керамічних композитів. Як правило, вони є модифікацією порошкового методу отримання технічної кераміки. Порошок матричного компоненту змішують з армуючим наповнювачем у формі коротких волокон або вусів і додають невелику кількість полімерного зв'язуючого. Потім суміш пресують і термообробляють;

2) в рамках цієї технології можуть бути отримані і керамічні композити, армовані вуглецевими нанотрубками (ВНТ). ККМ тут отримують методом гарячого пресування і зпікання суміші керамічного порошку і ВНТ. Причому суміш може бути отримана двома способами - за сухою і розчину технологією. Другий спосіб використовується з метою забезпечення кращого диспергування ВНТ.

### ***Газофазні методи ущільнення волокнистого каркаса.***

Газофазні методи отримання В-ВКМ і ККМ засновані на ущільненні пористих волокнистих каркасів в процесі фільтрації через них газоподібних хімічних прекурсорів, їх гомогенного і гетерогенного термохімічного розкладання і осадження матричного матеріалу на поверхні нагрітих армуючих волокон. Цей метод отримав назву CVI (Chemical Vapor Infiltration).

При отриманні вуглецевої матриці як хімічні реагенти (прекурсорів) застосовуються газоподібні вуглеводні (метан, пропан, етилен, бензол, ацетилен і тому подібне). У виробництві ККМ методами CVI розглядалася можливість використання як матриця різних керамічних матеріалів. Проте відносно широке промислове застосування і комерційну значущість поки мають тільки ККМ з SiC-матрицею. Існує велика кількість початкових компонентів, які можуть бути використані для піролітичного осадження карбиду кремнію.

У практиці виробництва КМ, в основному, отримали розвиток п'ять модифікацій методу CVI: ізотермічний, термоградієнтний, ізотермічний і термоградієнтний методи

з примусовою фільтрацією, метод з пульсацією тиску. Дані модифікації методу CVI відрізняються, перш за все, механізмом перенесення газоподібних компонентів в пористому каркасі. Найбільше практичне застосування в даний час знайшли ізотермічний і термоградієнтний варіанти методу CVI.

1) ізотермічний метод (ICVI) реалізується в камері, що рівномірно обігривається. Таким чином, формування високоякісних КМ може займати достатньо тривалий термін (до декількох місяців);

2) термоградієнтний метод (TG CVI) характеризується наявністю градієнта температури по товщині каркаса. Цей метод дозволяє отримувати КМ з високою щільністю за один цикл і характеризується щодо великої швидкістю осадження і можливістю об'ємного ущільнення матеріалу.

### ***Жидкофазні методи ущільнення волокнистого каркаса.***

Тут можна виділити два варіанти реалізації процесу:

1) перший заснований на процесах високотемпературного піролізу відповідних елементоорганічних прекурсорів на основі термопластичних і термореактивних полімерів, якими просочують волокнистий каркас (процеси PIP - Polymer Infiltration and Pyrolysis або LPI - Liquid Polymer Infiltration). Для отримання вуглецевої матриці цим методом як початкові матеріали зазвичай використовують термореактивні фенолові і фурфурилові смоли і пеки з кам'яновугільної смоли або нафти. Для отримання карбідокремневої матриці застосовують полікарбосилани або інші кремнійзмістові полімери. В результаті подальшої термічної обробки полікарбосилани розкладаються з виділенням твердого залишку, збагаченого карбідом кремнію. Приведемо укрупнену схему технологічного процесу ущільнення каркаса жидкофазним методом (рис. 1.3).

1.1. Просочення волокнистого каркаса що рідким органічним пов'язує. Для підвищення якості просочення (мінімізації залишкової пористості) її проводять з вакуумуванням або під тиском.

1.2. Отвердіння полімерної смоли, яке проводять, як правило, під тиском і при температурно-тимчасових параметрах процесу, оптимальних для даного типу пов'язує.

1.3. Піроліз, що отвердів, проводиться в процесі високотемпературної обробки в неокисляючому середовищі і може протікати як при нормальному, так і при підвищеному (до 100 МПа) тиску. Ключовим моментом в процесі цієї, що карбонізує є вибір температурно-тимчасового режиму, який забезпечив би максимальне утворення коксового залишку з того, що полімерного пов'язує.

1.4. Повторення циклу “просочення - отвердіння - піроліз”. Для отримання високоякісних КМ (з максимальною щільністю, тобто з мінімальною пористістю) цей цикл доводиться повторювати неодноразово (до 3-8 разів).

Є приклади використання технології PIP для отримання фрикційних В-ВКМ модифікованих вуглецевих нанотрубок. Такий композит отримували шляхом просочення пористого хаотично-армованого рубаними волокнами В-ВКМ суспензією ВНТ в розчині фенолової смоли і метанолу з тією, що подальшою карбонізує отриманого напівфабрикату. Трібологічні випробування показали, що введення вуглецевих нанотрубок дозволяє збільшити зносостійкість В-ВКМ.

Відомі приклади отримання фрикційного композиту за комбінованою технологією, заснованою на поєднанні CVI і PIP процесів. На першому етапі вуглеволокнистий каркас ущільнювали вуглецевою матрицею за газофазною технологією. В результаті отримували пористі В-ВКМ, який на другому етапі просочували розчином полікарбосилана, з подальшим його піролізом і утворенням SiC матриці.



Рис. 1.3. Схема процесу ущільнення каркаса жидкофазним методом

2) другий варіант жидкофазного методу застосовується для отримання КМ з карбідокремневої матрицею. У основі методу лежить механізм реакційного спікання матеріалу заготовки в процесі силіцировання - просочення розплавом кремнію (процес LSI - Liquid Silicon Infiltration). Дані технологічні процеси володіють рядом достоїнств в порівнянні з іншими методами: ККМ мають достатньо високу міцність і теплопровідність; матриця має щільну, практично безпористу структуру; для реалізації процесу потрібне відносно просте технологічне устаткування; процес відносно недорогий і продуктивний унаслідок його невеликої тривалості.

Стосовно волокнисто-армованих ККМ ця жидкофазна технологія має декілька модифікацій, що відрізняються, перш за все, способом введення у волокнистий каркас вуглецевого наповнювача. Найчастіше зустрічаються дві модифікації: просочення армуючого матеріалу суспензією, що містить

вуглеграфітовий порошок і просочення полімерного пов'язуючого з подальшою карбонізацією того, що пов'язує і образує в міжволоконному просторі коксу - вуглецевої матриці.

Друга модифікація технології LSI розглядається в даний час як найбільш перспективна для отримання фрикційних ККМ з SiC матрицею. Перші спроби отримання ККМ системи Cf/C-SiC методом силіцировання вуглець-вуглецевих заготовок були здійснені більше тридцяти років тому, проте тільки трохи більше десяти років тому ці матеріали почали розглядатися як фрикційні матеріали для гальмівних колодок і дисків. Отримувані за цією технологією фрикційні ККМ розрізняються по складу (волокна, наповнювачі), мікроструктурі (зміст кераміки, її розподіл), властивостям (щільність, міцність, теплопровідність), а також за умовами отримання (нанесення покриттів на волокна, температура процесу і так далі).

Проте вони завжди ґрунтувалися на вуглецевих волокнах і карбідокремневої матриці як головних компонентах ККМ.

Фрикційні ККМ, що отримуються за цією технологією, можуть мати різні структури, отримані або пошаровим укладанням тканини або однонаправлених шарів, або хаотичним армуванням з волокон різної довжини. Треба відзначити, що застосування технології пресування заготовок, заснованої на використанні коротких волокон, дозволяє значно здешевити і спростити виробництво фрикційних деталей. Крім того, квазіізотропні композити з армуванням короткими волокнами мають вищу теплопровідність в напрямі перпендикулярному поверхні тертя в порівнянні з шаруватими структурами на основі тканин і однонаправлених стрічок.

Це призводить до зниження поверхневої температури гальмівних дисків і, відповідно, до вищого і стабільнішого коефіцієнта тертя і нижчої швидкості зносу.



Спроби поліпшити експлуатаційні властивості елементів гальмування з ККМ привели до розробки градієнтних фрикційних матеріалів, в яких висока зносостійкість поверхневих шарів поєднується з високою ударною в'язкістю внутрішніх шарів. Основними зовнішніми чинниками, що впливають на працездатність фрикційної пари тертя, є: максимальна температура і її градієнт по товщині фрикційного елемента, а також величини статичного і динамічного навантаження, які приводять до виникнення теплової і механічної напруги в матеріалі фрикційного елемента. З іншого боку, коли ми оцінюємо роботу гальмівних систем, ми виходимо, в основному, з трьох параметрів: коефіцієнт тертя, його стабільність в часі і швидкість зносу фрикційного матеріалу. Значення коефіцієнта тертя в основному залежать від температури поверхні тертя, швидкості руху транспортного засобу і питомого тиску контакту пари тертя. Стабільність коефіцієнта тертя - це показник того, наскільки однорідне тертя протягом періоду гальмування. Знос поверхонь, що труться, визначається або по втраті маси елемента пари тертя, або по їх лінійному або об'ємному зносу.

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (В-ВКМ) застосовуються у високонавантажених вузлах тертя, для яких характерне високе тепловиділення. Найбільш відомі марки В-ВКМ: Карбеникс-4000 (США), SEPCARB (Франція), DAC-I (Корея), СТД, «АРГОЛОН», ТЕРМАР (Росія), УТ-4 (Україна) і ін.

### 1.3. Властивості і фізико-хімічні характеристики матеріалів дискових гальм

У сучасних гальмівних системах застосовують різні фрикційні матеріали, такі як композиційні матеріали з полімерною матрицею, металокераміку, спечені фрикційні матеріали на основі порошків різних металів. Проте всі зростаючі вимоги по енергонагруженості гальмівних пристроїв постійно стимулюють дослідження по створенню нових типів фрикційних матеріалів з вищими

експлуатаційними характеристиками. Слід зазначити, що якщо енергія гальмування автомобіля масою 2000 кг із швидкістю 128 км/год з прискоренням ( $-0,8$ ) м/с<sup>2</sup> складає близько 20 kW, то для сучасних швидкісних поїздів вона перевищує 800 kW, а для літаків досягає 37 MW. Це приводить до того, що температура в зоні тертя фрикційної пари може перевищувати 1273...1473 K, і різні конструктивні рішення, направлені на розсіювання теплової енергії, наприклад, вентиляція гальмівних дисків, принципово не вирішують цю проблему.

Існують різні види фрикційних матеріалів: металеві, неметалеві, порошкові, металокерамічні і композиційні фрикційні матеріали.

### 1.3.1. Металеві і неметалеві фрикційні матеріали

До металевих фрикційних матеріалів відносять чавуни і сталі різних марок. Їх використовують головним чином в незамінюваних або рідко замінюваних елементах гальмівних і фрикційних пристроїв як так звані контртіла (силові диски, барабани, шайби і т. п.), термін служби яких порівнюємо з терміном служби всього гальмівного механізму. За легких умов експлуатації металеві фрикційні матеріали застосовують також як у відповідь деталі (тіл); найбільш поширені такі поєднання матеріалів, як сталь - сталь, чавун - сталь, бронза - сталь. Основні недоліки цих фрикційних матеріалів - нестабільність коефіцієнта тертя при різкій зміні температури, схильність до захоплення поверхонь, що труться; вони поступово замінюються неметалічними фрикційними матеріалами.

Металокерамічні на залізній або мідній основі. Матеріали на залізній основі (наприклад, ФМК-8, ФМК-П, МКВ-50 і ін.), застосовують переважно для високонавантажених гальмівних пристроїв, що працюють без мастила. У їх склад

можуть входити різні компоненти: мідь, графіть, азбест, Окисел кремнію, карбід кремнію, барит, карбід бору, сіра (або її з'єднання), хром, нікель, вольфрам і ін. Металокерамічні матеріали на мідній основі працюють, як правило, з мастилом. У їх склад зазвичай включають: олово, свинець, графіть, залізо, іноді окисел кремнію і цинк. Матеріали на мідній основі застосовують в гальмах і фрикціонах автомобілів, тракторів, Поршневих двигунів вертольотів і інших машин.

Неметалеві фрикційні матеріали виготовляють головним чином з використанням базальтових, вуглецевих, кевларових, рідше азбестових і інших високомодульних волокон; що пов'язує - каучуки, смоли і їх поєднання; наповнювачі - кремнезем, сурик, барит, мідний, латунний, бронзовий дріт або стружка,  $\text{MoS}_2$  і ін. Із-за застосування що полімерного пов'язує такі фрикційні матеріали часто називаються полімерними. Один з кращих матеріалів цієї групи - ретінакс, що отримується гарячим пресуванням у вигляді брикетів з азбесту, меленого бариту, латуні і смоли фенолформальдегідної; працює при температурі на поверхні тертя вище  $600^\circ\text{C}$ .

### 1.3.2. Порошкові матеріали

Спечені порошкові матеріали, що виготовляються методами порошкової металургії, по коефіцієнту тертя і зносостійкості якнайповніше задовольняють сучасним вимогам до важко навантажених гальмівних пристроїв.

З них виготовляють пари тертя гальм могутніх машин при початковій швидкості тертя вище 50 м/с і тиску більше 25 МПа при роботі без змащувального матеріалу і при швидкості вище 100 м/с і тиску більше 70 МПа при роботі із змащувальним матеріалом.

Розрізняють матеріали на залізній і мідній основах. Залізо і мідь підвищують міцність і властивості фрикційного зносу матеріалів. Матеріали на залізній основі зазвичай застосовують для важких і надважких умов експлуатації без змащувального матеріалу, а на мідній - для легких умов роботи без змащувального матеріалу і з ним.

Спечені порошкові фрикційні матеріали отримують, як правило, на мідній або залізній основі. Як наповнювачі і добавки використовують матеріали, що забезпечують стабільність коефіцієнт тертя (карбіди і оксиди металів), відсутність захоплювання (графіть, азбест,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{CuS}$ ,  $\text{ZnS}$ ), підвищення опору ковзанню ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{BC}$ ,  $\text{SiC}$ , мулліт і ін.), поліпшення теплового режиму (кольорові метали і сплави  $\text{Sn}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Al}$ ). Підвищення міцності з'єднання наповнювачів і добавок з металом-основою досягається безпосередньо в процесі зпикання. Найбільшого поширення набули матеріали на основі заліза і міді. З матеріалів на залізній основі найбільшого поширення набули ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50Л і СМК. Матеріал ФМК-8 призначений для роботи у важко навантажених дискових гальмах великої енергоємності. Матеріал ФМК-11 в порівнянні з ФМК-8 має більший за значенням і стабільніший коефіцієнт тертя, але володіє меншою зносостійкістю. Матеріал МКВ-50А для накладок дискових гальм забезпечує високу стабільність механічних властивостей при температурі до  $600^\circ\text{C}$ , а за значенням і стабільності коефіцієнта тертя і по зносостійкості перевершує.

Матеріали типу ФМК. Матеріал на основі заліза типу СМК відрізняється підвищеним вмістом марганцю, присутністю карбіду і нітриду бору, карбіду кремнію і дисульфиду молібдену. Модифікації цього матеріалу призначені для застосування у важко навантажених, дискових і стрічкових гальмах дискових колодок.

Перші три матеріали розроблено для важко навантажених гальм і муфт літаків і військової техніки. Матеріал СМК-80 застосовується в гальмах і муфтах зчеплення великовантажних автомобілів - кар'єрних самоскидів вантажопідйомністю більше 65 т.

Матеріали на основі міді. Матеріали на основі оловянистої бронзи мають високу зносостійкість, достатньо високий коефіцієнт тертя і в порівнянні з матеріалами на залізній основі менше зношують зв'язане контртіло.

Коефіцієнт тертя матеріалів на мідній основі в парі із сталлю і чавуном залежно від режиму тертя складає 0,23...0,5; максимально допустима стала об'ємна температура 200...300°C. У деяких гальмівних пристроях застосовують порошкові матеріали на основі алюмінієвої бронзи. При щільності 6,0...6,5 г/см<sup>3</sup> вони мають твердість HB 60...80, межа міцності при вигині до 300 МПа, при зрізі до 200 МПа.

Коефіцієнт тертя матеріалів на основі алюмінієвої бронзи у контакті із сталлю складає 0,3...0,33. Вони широко використовуються у важких транспортних засобах.

Найбільшого поширення набув матеріал МК-5 (перший рядок таблиці). У автомобіле- і тракторобудуванні з цих матеріалів виготовляють гальмівні диски, колодки і накладки для муфт зчеплення.

Матеріали для роботи в умовах рідинного мастила. Переваги гальмівних пристроїв з парою тертя, що працює в умовах рідинного мастила, полягають у високій зносостійкості, плавності наростання гальмівного моменту, легкості і надійності охолодження. Швидкість на початку гальмування досягає 100 м/с і більш. До їх недоліків відносяться низький (0,08...0,1) коефіцієнт тертя, великі габаритні розміри і високий (до 700 МПа) тиск. Коефіцієнт тертя фрикційних пар гальмівних пристроїв при роботі із змащувальним матеріалом багато в чому залежить від конструкції змащувальних канавок на поверхні тертя. Форма канавок визначає ефективність охолодження поверхні тертя і знос накладки.

### 1.3.3. Фрикційні асбополімерні матеріали

Порошкова технологія дозволяє отримувати фрикційні матеріали із заданими властивостями. Для автомобілів малої і середньої вантажопідйомності і для сільськогосподарських і промислових тракторів малої і середньої потужності зазвичай використовуються фрикційні матеріали на полімерній основі. Вони застосовуються також в сільськогосподарському і дорожно-строительном машинобудуванні, в буровій техніці і так далі

Як правило, до складу матеріалів входять три компоненти:

- теплостійкий армуючий матеріал з міцними волокнами, наприклад азбест (15...16%);

- теплостійкі з високим і стабільним коефіцієнтом тертя порошкоподібні наповнювачі неорганічного походження (20...60%);

- що полімерне пов'язує: натуральні і синтетичні каучуки, синтетичні смоли (15...30%) з агентами вулканізації або затверджувачем, прискорювачами і активаторами вулканізації або затвердження.

Фрикційні асбополімерні матеріали (ФАПМ) набули широкого поширення в гальмівних пристроях под'ємнотранспортних, будівельно-дорожніх, землерийних і шахтних підйомних машин, рухомого складу метрополітену, трамваїв, бурових установок, автотранспортних засобів і так далі ФАПМ є багатокомпонентною композицією, основним компонентом якої (до 70%) є азбест. Для додання матеріалу певних технологічних і експлуатаційних властивостей ФАПМ містить мінеральних і органічних наповнювачів. Від поєднання і кількісного змісту наповнювачів залежать коефіцієнт тертя, зносостійкість, фізико-механічні показники, а також технологічні властивості матеріалу в процесі його виготовлення.

Армуючим елементом є унікальний природний мінерал, що здобувається відкритим методом, - азбест. Елементарні волокна азбесту мають вид трубок із зовнішнім діаметром близько 32 нм і внутрішнім - 2,6 нм, тобто в поперечному напрямі волокно має розміри, характерні для колоїдно-дисперсних матеріалів. Елементарні волокна упаковані в пасмі діаметром від декількох десятків до сотень мікрометрів. У пасмах волокна утримуються силами міжмолекулярного тяжіння. Середня довжина волокна складає 1...3 мм. По своїй хімічній природі азбест є водним силікатом магнію. Волокна азбесту володіють високою міцністю на розтягування (до 3 ГПа), що набагато перевищує міцність стали. Порожнини волокон частково або повністю заповнені водою, яка утворює на внутрішній поверхні практично мономолекулярний шар, тому вона проявляє властивості інші, чим звичайна волога, віддаляючись лише при температурі вище 425°C. Вид кристалічної решітки цього матеріалу достовірно не встановлений. Азбест володіє високим коефіцієнтом тертя (до 0,8), який слабо міняється залежно від температури. То ж можна сказати про міцність волокон, яка при нагріванні до 400°C знижується всього на 20%. Лише при 800 °C спостерігається руйнування волокнистої структури. Таким чином, азбест неначе спеціально створений як основа для фрикційного матеріалу.

Проте у азбесту є і істотний недолік. Він вважається екологічно за небезпечний матеріал. Якнайтонші моноволокна, потрапляючи в повітря у вигляді пилу, утворюють стійку суспензію, яка вельми поволі осідає. Потрапляючи в легені людей і тварин, волокна вражають органи дихання, викликаючи особливе захворювання - асбестоз. Уражені ділянки легенів можуть стати центрами утворення ракових кліток. У багатьох країнах вже заборонено використання азбесту в будівництві, електротехніці і інших галузях. Такі ж тенденції спостерігаються і у виробництві гальмівних матеріалів, але знайти ефективну заміну азбесту поки не вдалося. Є спроби замінити азбест волокнами з скла, базальту, шлаку, бору, вуглецю, але ці матеріали не дають такий же ефект, як азбест. Зокрема,

немає такого матеріалу, який так само, як азбест, очищав би поверхню металевого контртіла і при цьому поглинав і зв'язував продукти зношування, не кажучи про інші якості. Тому азбест поки зберігає заслужене на лідерство серед компонентів фрикційних матеріалів.

Наповнювачами азбестових матеріалів служать залізний сурик, барітовий концентрат, оксиди хрому і інших металів. Додаються також порошкоподібний кокс, графіт, технічний вуглець. Для підвищення теплопровідності вводяться пороша і стружка з міді, латуні, цинку, алюмінію, залоза і так далі

Компонентом, що пов'язує, у ФАПМ є каучуки, смоли і їх комбінації. Використовуються бутадієнові, бутадієн-тіррільні, бутадієн-метіл-вінілпірідінові, стиролові і інші синтетичні каучуки. Як смоли застосовуються фенолформальдегідні, анілін фенол-формальдегідні, кремнійорганічні, епоксидні компаунди і ін. Одночасно вводяться вулканізатори і отверджувачі.

Матеріали на тому, що каучуковому пов'язує володіють високим коефіцієнтом тертя і зносостійкістю при щодо невисоких температурах тертя (до 250°C) ФАПМ па що смоляному пов'язує мають вищу (до 600°C) теплостійкість, але відносно низькі і нестабільні значення коефіцієнта тертя (рис. 1.4).

Вироби на смолянній основі мають велику теплостійкість, але володіють нестабільним коефіцієнтом тертя, крихкістю. Тому якнайкращий результат досягається при сумісному використанні смол і каучуків. Невдале поєднання тих, що пов'язують із-за нестабільності коефіцієнта тертя приводить до виникнення автофрикційних коливань (скрип і виск гальм).



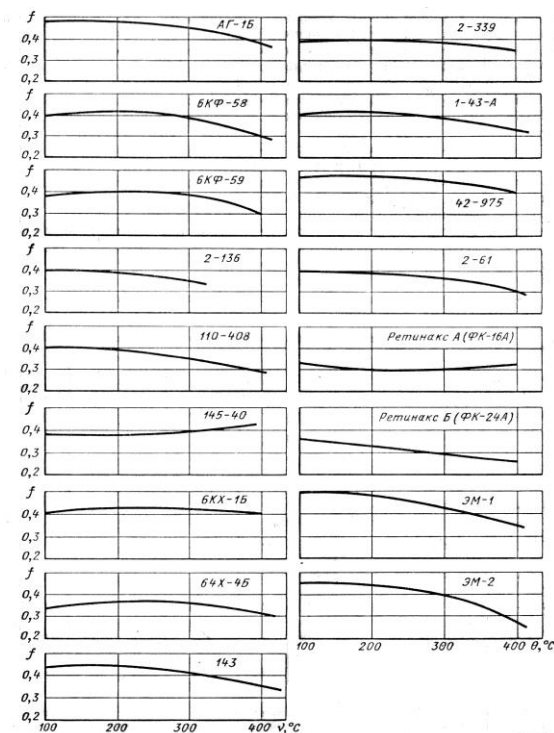


Рис. 1.4. Залежності коефіцієнта тертя

від температури для фрикційних

За способом виготовлення накладки з ФАПМ розділяють: формовані, вальцьовані, ткані і пресовані. Формовані накладки мають високу зносостійкість і стабільний коефіцієнт тертя і застосовуються в гальмах залізничного рухомого складу і поїздах метрополітенів, автотракторних засобів, будівельно-дорожніх і землерийних машин і так далі (табл. 1.1).

Вальцьовані накладки відрізняються підвищеною еластичністю, можливістю використання в гальмівних пристроях з різним радіусом кривизни поверхні тертя контртіла, невеликою вартістю. Недоліками їх є низька міцність і теплостійкість. Ткані накладки при високій міцності мають порівняно низьку теплостійкість (табл. 1.2).

Таблиця 1.1

Основні сфери застосування асбофрикційних матеріалів пар тертя

Марка	ГОСТ або ТУ	Связуюче	Сфера застосування
-------	-------------	----------	--------------------

Гальма є вельми відповідальним вузлом, оскільки визначають безпеку експлуатації транспортних засобів, тому при їх розробці проводиться вельми точний і детальний розрахунок. Виготовляються дослідні зразки, які проходять спочатку лабораторні, потім стендові і натурні випробування. Особливо ретельно відпрацьовуються нові гальмівні матеріали, що піддаються тривалим випробуванням по спеціальних методиках.

матеріалу			
АГ-1Б	ТУ 38 11446-71	Каучукове	Формовані накладки барабанних гальм легкових автомобілів
6КФ-58 6КФ-59 2-136 110-408 145-40	ТУ 38 11413-70 ТУ 38 11480-73 ТУ 38—559-69 ТУ 38 11429-72 ТУ 38 11434-71	Комбіноване	Формовані накладки дискових гальм легкових автомобілів
6КХ-1Б	ТУ 38-5-560-69	Каучукове	Формовані накладки барабанних гальм вантажних автомобілів
6КХ-4Б 143 2-33- 1-43-А 142-975 2-61	ТУ 38-5-460-69 ТУ 38 11427-71 ТУ 3811428-71 ТУ 11492-73 ТУ 11492-73 ТУ 38 11472-782	Каучукове	Те ж саме
Ретинакс А	ГОСТ 10851-73	Смоляне	Формовані накладки важконавантажених гальм колодок і стрічкових
Ретинакс Б ЕМ-1 ЕМ-2	ГОСТ 15960-70	Каучукове	Еластичні вальцьовані накладки гальм колодок ПТМ

Пресовані накладки з матеріалу на основі картону володіють невисокими коефіцієнтом тертя, теплостійкістю і зносостійкістю і вважаються за неперспективних.

Таблиця 1.2

Середнє значення фізико-механичних характеристик асбополімерних накладок

Характеристика	Накладки			Вальцьовані (еластичні)
	Формовані на зв'язуючому			
	Каучуковому	Комбінованом у	Смоляном	
Твердість, НВ	16-27	17-50	47-48	2-3,5
Щільність, г/см <sup>3</sup>	2-2,5	2-2,6	2,3-2,5	2,1
Межа міцності, МПа				
При зрізі	35,9-69,1	20,7-38,9	28-34,1	13,8-16,3
При стискуванні	56,7-104,8	43,2-151,8	75,1-72,8	25-35
При вигині	32,5-81,8	27,8-56,5	22-42,3	-
При розриві	14,8-52,1	20,4-24,5	25,1-21,8	10,8-11,9
Модуль пружності при вигині, МПа	(38-50)10 <sup>-4</sup>	(39-67)10 <sup>-4</sup>	(69-75)10 <sup>-4</sup>	(0,16-0,21)10 <sup>-4</sup>
Питома ударна робота, кДж/м <sup>2</sup>	3-12,3	2,1-5,8	2,5-6,4	23,4-24,2
Коефіцієнт тертя	0,44-0,56	0,42-0,5	0,37-0,38	0,46-0,47
Знос, мм	0,07-0,17	0,09-0,28	0,13-0,24	0,07-0,18
Ступінь поглинання, %				0,4-0,6
Води	0,1-0,88	0,2-0,7	0,2-0,3	0,45-0,7
Масла	0,2-0,9	0,2-0,3	0,15-0,3	3,3-4,9
Бензину	0,2-1,5	0,2-0,8	0,2-0,3	0,88-1

Питома теплоємність, кДж/кг°С	0,88-1,17	0,92-1,13	0,96-1	0,43-0,5
Теплопровідність, Вт/м°С	0,4-0,52	0,41-0,64	0,76-0,81	0,33-1,3
Теплова усадка, %	0,24-0,63	0,11-0,55	0,38-0,45	

Для попереднього вибору матеріалів фрикційних накладок при проектуванні вузла тертя гальма можна користуватися значеннями параметрів, приведеними раніше, проте необхідно враховувати, що вони декілька відрізняються від характеристик фрикційного зносу натурального гальмівного вузла, залежних від комплексу параметрів режиму роботи і конструкції гальмівного пристрою. Зазвичай в натуральному вузлі тертя гальма коефіцієнт тертя і знос декілька нижче.

#### 1.3.4. Композиційні матеріали

Композити (КМ) - це матеріали, що складаються з двох або більш за компоненти (волокон або інших армуючих складових і матриці, що пов'язує їх) і що володіють специфічними властивостями, відмінними від сумарних властивостей їх компонентів, що становлять. Компоненти композитів не повинні розчинятися або іншим способом поглинати один одного. Вони мають бути добре сумісні. Властивості КМ. не можна визначити тільки по властивостях компонентів, без урахування їх взаємодії.

У волокнистих композитах високоміцні волокна сприймає основна напруга, що виникає в композиції при дії зовнішніх навантажень, і забезпечують жорсткість і міцність композиції у напрямі орієнтації волокон.

#### 1.3.5. Структура і властивості композитів

Аналіз фізико-механических властивостей КМ дозволяє визначити достоїнства полімерних КМ (ПКМ). По міцності, а іноді і по жорсткості, вони практично не поступаються металам. З урахуванням же значної відмінності в щільності переваги ПКМ стають особливо очевидними. Можливість досягнення заданого ступеня анізотропії КМ також можна віднести до достоїнств ПКМ, оскільки при цьому якнайповніше реалізуються прочностні властивості волокнистого наповнювача.

Проте слід зазначити і деякі недоліки КМ. До їх числа відноситься значне розсіяння фізико-механических показників, обумовлене структурною неоднорідністю і недостатньою стабільністю процесу формування. Шаруватість структур більшості ПКМ зумовлює їх слабкий опір межслойному зрушенню. Наявність повітряних або газових включень, обумовлена існуючою технологією формування, а також утворення мікротріщин в процесі виробництва і експлуатації викликає необхідність оцінки герметичності конструкцій, а також оцінки зміни інших властивостей матеріалів в процесі експлуатації. Характерний для деяких ПКМ відносно низький модуль пружності вимагає ускладнення конструкції виробів, наприклад за допомогою додаткових ребер на стінках, збільшення їх товщини, введення шарів пено- і сотопластов і так далі.

Класифікувати ПКМ можна як по хімічній природі наповнювача (склопластики, органопластики, вуглепластики і т. д.) і його вигляду (волокніти, текстоліти і т. д.), так і по характеру макроструктури матеріалу формованого виробу (ізотропне, трансверсально-ізотропне, ортотропне армування). Можлива класифікація і по інших ознаках (наприклад, по методу формування або за призначенням виробу). По взаємному розташуванню (орієнтації) арматури можуть бути виділені три основні групи матеріалів: однонаправлені (волокністі), шаруваті і просторово-зшиті. Якщо всі армуючі елементи розташовані паралельно один іншому, то прийнято вважати, що композитне середовище має однонаправлену структуру; якщо армуючі елементи розташовані під кутом один до іншого в двох або декількох паралельній площині,

то структура називається шаруватою, і нарешті, якщо між армуючими шарами є поперечні зв'язки - просторово-зшитою. Найчастіше застосовується взаємно ортогональне розташування волокон, причому співвідношення між подовжніми і поперечними шарами може бути самим різним (1:2, 1:3, 1:5 і т. д.). Матеріали з укладанням 1 : 1 прийнято називати рівноважними (або равнопрочними).

Орієнтація волокнистого наповнювача і його вміст в полімерній матриці дозволяють, з одного боку, оцінити фізико-механичні властивості матеріалу, а з іншою, визначити технологічні параметри процесу формування виробів, а отже, і вимоги до вживаного устаткування. Для ізотропного матеріалу властивості однакові по всіх напрямках. Для траисверсально-ізотропних матеріалів характерна рівність властивостей для будь-яких напрямів в одній площині і істотна відмінність їх в напрямі, нормальному до цієї площини.

Анізотропна схема армування характеризується відмінністю властивостей матеріалу (не тільки фізико-механических, але і тепло-фізичних, пружно-еластичних, технологічних і інших) на всіх напрямках.

Матеріали з ізотропною структурою отримують за допомогою введення дисперсного волокнистого наповнювача в полімерну матрицю.

За природою армуючого матеріалу розрізняють армування органічними або неорганічними природними, синтетичними, штучними матеріалами. За типом армування КМ. бувають: хаотично армовані (премікси, препреги, високонаповнені композиції), орієнтовані (текстоліти, однонаправлені композиції). По вигляду армуючого матеріалу КМ ділять на армованих безперервними волокнами, пряжею, тканинами, листами, рубаними волокнами. По хімічній природі розрізняють поліефірні, що пов'язують, епоксидні, фенолові, меламінові, поліамідні, кремнійорганічні і ін.

Що по характеру пов'язує бувають термореактивні і термопластичні КМ, а по характеру затвердіння - холодного і гарячого затвердіння. По тиску при отвердінні композити ділять на високого, середнього, низького тиску і формування без тиску.

За способом переробки у виробі (основні методи формування) розрізняють КМ контактного формування, литі, напилювані, такі, що виготовляються намотуванням, пресовані і ін.

Основні види армуючих матеріалів, конструкцій, що широко застосовуються при виготовленні, з ПКМ, приведені на рис. 1.5.

У композитах важливим елементом є матриця (що пов'язує), яка забезпечує монолітність композиту, фіксує форму виробу і взаємне розташування армуючих волокон, розподіляє напругу за об'ємом матеріалу, що діє, забезпечує рівномірне навантаження на волокна і її перерозподіл після руйнування частини волокон.

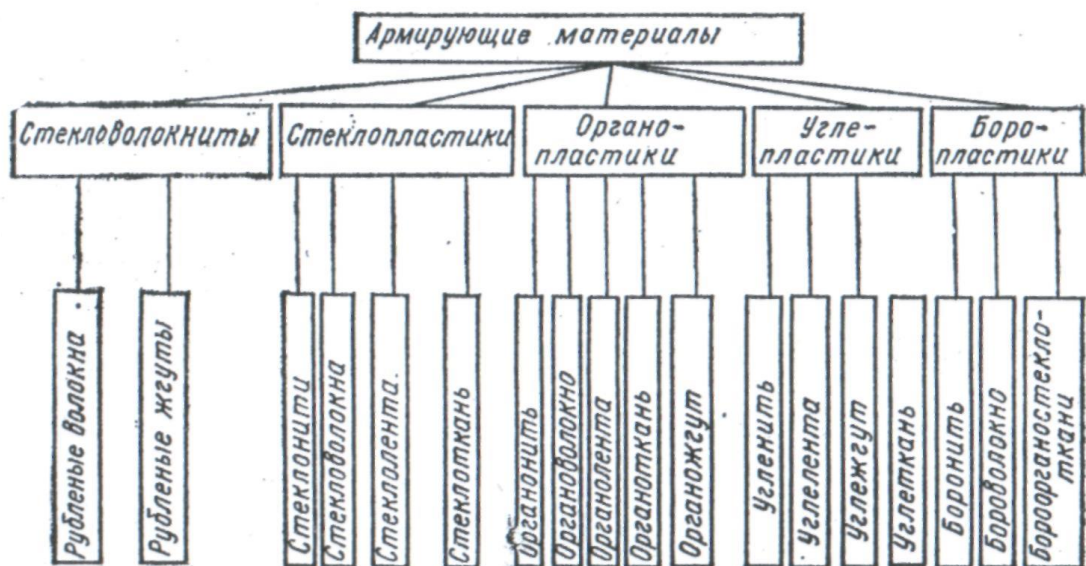


Рис. 1.5. Основні види армуючих матеріалів

Успіх використання ПКМ багато в чому визначається хімічною, механічною і фізичною стабільністю системи волокно - що пов'язує.

### 1.3.6. Фізико-механичні характеристики композитів

Пов'язують для волокнистих ПКМ служать різні термореактивні (затвердеваючі) і термопластичні полімери. Природа матриці визначає рівень робочих температур композиту, характер зміни його властивостей в умовах температурної і атмосферної дії, а також технологічні прийоми і режими отримання і переробки матеріалів у виробі. Тому до того, що полімерному пов'язує пред'являється разом з вимогами високих механічних характеристик ряд спеціальних вимог. Механічні властивості матриці в основному визначають рівень прочностних характеристик ПКМ при зрушенні, стискуванні, рівномірному відриві, при навантаженні ПКМ в напрямках, відмінних від напрямку орієнтації армуючих волокон і тому подібне

Податлива матриця, що заповнює міжволокнистий простір, забезпечує спільну роботу окремих волокон за рахунок власної жорсткості і взаємодії, що існує на межі розділу матриця - волокно. Отже, механічні властивості композиту визначаються високою міцністю армуючих волокон, міцністю і жорсткістю матриці, а також і міцністю зв'язку на межі матриця-волокно. Співвідношення цих параметрів характеризують весь комплекс механічних властивостей матеріалу і механізм його руйнування. Працездатність композиту забезпечується як правильним вибором початкових компонентів, так і раціональною технологією виробництва, що забезпечує міцний зв'язок між компонентами при збереженні первинних властивостей. Як відомо, широке розповсюдження як пов'язують для композитів отримали такі термореактивні полімерні матеріали, які якнайповніше відповідають наступним вимогам: хороша змочуюча здібність і висока адгезія до волокна; високі когезійна міцність і модуль пружності при в'язкому характері руйнування; достатня деформованість, тобто відносні подовження пружної і



пластичної деформації що пов'язує аж до розриву має бути не менше відповідних значень для склоарматури; незначна усадка при отвердінні і значення коефіцієнта термічного розширення, близького до значення цього показника для арматури; мінімальне виділення побічних продуктів при отвердінні; достатня теплостійкість і стабільність фізико-хімічних властивостей при зберіганні і експлуатації; гідрофобність і висока водостійкість; мала корозійна активність по відношенню до металів, хімічна нейтральність що отверділого пов'язує по відношенню до арматури; висока хімічна стійкість; негорючість; прийнятне поєднання технологічних властивостей (в'язкості, життєздатності, температури отвердіння і ін.) і економічних показників полімеру (вартість, дефіцитність і т. п.). Під технологічністю ПКМ розуміється його здатність перероблятися у вироби заданих габаритів і форми, визначається життєздатністю напівфабрикатів (препаратів), температурою, часом і тиском формування.

У табл. 1.3 приведені усереднені дані по чотирьох типах найбільш вживаних у виробництві виробів, що пов'язують, з ПКМ.

Таблиця 1.3

Порівняльні властивості різних типів звязуючих

Показник	Полі-ефірне	Епоксидне	Фенолове	Кремній-органічне	Вуглець-вуглецеве
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	1100-1460	1100-1400	1200-1360	1150-1360	1,6-2,0×10 <sup>-3</sup>
Руйнівна напруга, МПа:					
- розтягування	23,5-68,5	27,4-96	22,5-78,3	6,8-34,2	
- стискування	79,3-250	85-274	68,5-205	49-103	
- вигин	10,8-127	58,8-157	45-118	6,8-96	

Модуль пружності при розтягуванні, ГПа	1,5-4,5	1,9-4,9	2,1-6,8	1,5-3,7	230-600
Відносне подовження при розриві, %	3,7-6	1,2-6,5	0,4-3	0,3-1,5	
Ударна в'язкість, кДж/м <sup>3</sup>	5,9-10,7	2,9-24,5	2,4-11,3	2,3-5,4	
Коефіцієнт терм. розширення $\times 10^{-3}$ , К <sup>-1</sup>	7-15	3-11,7	2-12	2-18	
Теплостійкість по Мартенсу, К	358-383	383-438	403-453	523-553	
Робоча температура тривалої експлуатації, К	393	473	533	723	773-3273
Температура початку інтенсивної деструкції, К	473	533	573	873	
Водопоглинання, %	0,15-0,6	0,03-0,3	0,15-0,6	0,05-0,2	
Усадка при затвердінні, %	4-15	0,5-3,6	0,9-7	2,1-4,3	

При стискуванні композиції те, що пов'язує запобігає подовжньому вигину волокон. Вплив властивостей що пов'язує на властивості композиції при стискуванні виявляється більшою мірою, чим при розтягуванні.

Поліефірні пов'язуючі завдяки їх високій технологічності і невеликій вартості використовуються у виробництві великогабаритних конструкцій з склопластиків, що не випробовують значних навантажень. Обмеження в їх застосуванні пов'язані в основному з великою усадкою при отвердінні, низькими теплостійкістю, атмосферостійкістю і міцністю.

У виробництві відповідальних конструкцій з ПКМ використовуються епоксидні і такі, що фенолові пов'язують, причому останні разом з достатньо високою міцністю додають матеріалу ще і підвищену теплостійкість. До достоїнств тих, що епоксидних пов'язують відносяться незначна усадка при затвердінні і адгезія практично до всіх матеріалів. Ті, що проте ці пов'язують токсичні і дорого коштують.

Ціна фенолових смол відносно невисока, проте їх переробка зв'язана, як правило, з достатньо високим тиском і температурою. Крім того, вони також токсичні.

Кремнійорганічні пов'язуючі знаходять застосування в малонавантажених конструкціях, і їх достоїнства виявляються повною мірою, коли визначальними вимогами до виробу є високі теплостійкість, радіопрозорість і хімічна стійкість. До недоліків тих, що пов'язують цього типу можна віднести низьку адгезіону міцність, крихкість і значну вартість.

### 1.3.7. Вуглець -вуглецеві фрикційні матеріали

Розвиток техніки вимагає механічно міцних і термостійких матеріалів. КМ з металевою матрицею в більшості випадків не володіють достатньою питомою міцністю, а КМ з полімерною матрицею, маючи високі питомі механічні характеристики, значно розупрочнюються при дії високих температур (рис. 1.6). Тому особливий інтерес представляють вуглець - вуглецеві композиційні матеріали (В-ВКМ).

У В-ВКМ висока температуростійкість поєднується з малою щільністю, високою міцністю і модулем пружності, стійкістю до теплового удару. Ці матеріали тривало працездатні при температурах до 773 К в окислювальному середовищі і до 3273 К в інертному середовищі і у вакуумі.

Графітові і вуглецеві матеріали заслужено називають "хлібом" промисловості. Їх виробництво і споживання в промислово розвинених країнах сумірно з виробництвом всіх металів разом узятих (по об'єму, а не по вазі, зважаючи на їх низьку щільність порівняно з більшістю металів). Технологія

виробництва графіту була розроблена більше 100 років тому Бюксмейстером (1878-1880) в Росії, Ачессоном і Кастнером (1887-1893) в США.

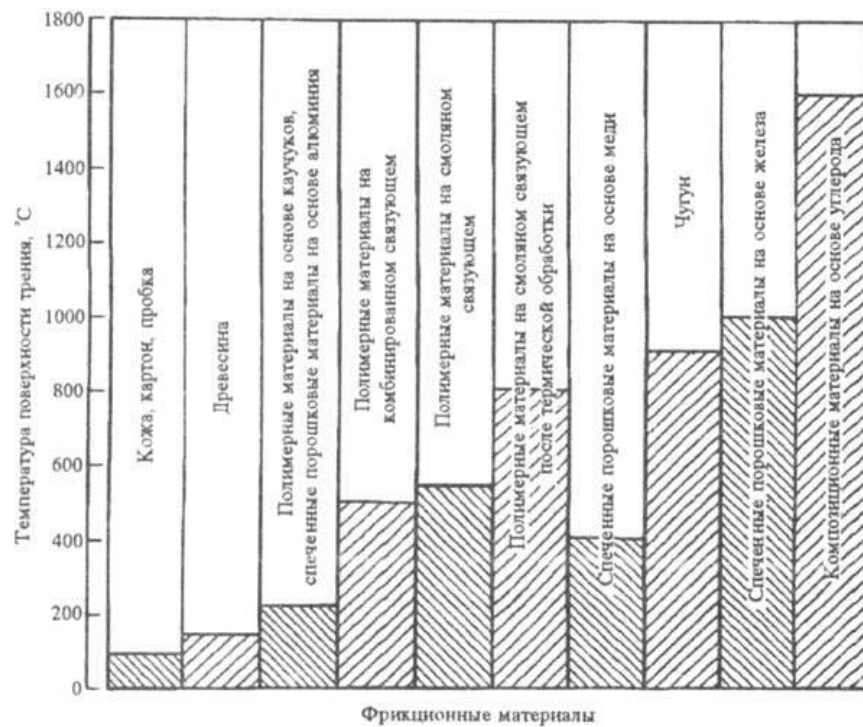


Рис. 1.6. Допустимі температури для різних фрикційних матеріалів

Вуглець - вуглецеві композиційні матеріали (В-ВКМ) з'явилися на 1958-початку 60-х і є графітовою або вуглецевою матрицею, зміцненою вуглецевими волокнами. Порівняно з графітом, В-ВКМ мають вищі прочнісні характеристики, володіють високою стійкістю до термоударам і рядом інших переваг. Основними споживачами графітових матеріалів є металургія, хімічна промисловість і атомна енергетика. Сьогоднішній день світові ціни на графітові матеріали складають від 3 \$/кг (електродний графіт) до 40-200 \$/кг (спеціальний конструкційний і чистий графіт). Обсяг світового виробництва графіту складає декілька мільйонів тонн в рік. За деякими даними, обсяг світового виробництва В-ВКМ сьогодні складає 230-450 т/год при вартості матеріалів 2d структур армування 110 - 2900 \$/кг, 3d і 4d структур - 1100 - 3300 \$/кг і більш.

Приблизно 81% всіх В-ВКМ матеріалів використовується для виробництва гальмівних дисків для літаків, 18% - в ракетно-космічній техніці і лише 1% - для решти всіх сфер застосування. Тоді як потреба В-ВКМ для ракетно-космічної техніки постійно знижується – об'єм виробництва гальмівних дисків для літаків стабільно росте на 12% в рік (дані за декілька років після 1990).

Наповнювач і матриця В-ВКМ залежно від складу, і умов тієї, що карбонізує можуть мати різні модифікації. У прийнятій класифікації вказується спочатку структура вуглецю-наповнювача, потім матриці, наприклад В-ВКМ, графіт-вуглецевий, графіт-графітний матеріал.

В-ВКМ містять вуглецевого наповнювача у вигляді дискретних волокон, безперервних ниток або джгутів, повсті, стрічок, тканин з плоским і об'ємним плетінням, об'ємних структур. Волокна розташовують хаотично, одно-, двух- і трьохнаправлено. Використовують UV нізкомодульні, високомодульні і високоміцні, отримані з віскозних, поліакрилонітрильних волокон і кам'яновугільного пеку.

Як матриця служать піролітичний вуглець, кам'яновугільний пек і полімери, що коксуються, які в процесі, - термодеструкції не розм'якшуються і дають більше 50 % коксу. Найчастіше застосовують фенолові смоли (вихід коксу 54-60 %), але відоме застосування поліїмідів (63-74 %), кремнійорганічних смол (84-87 %), продуктів конденсації фенолу і нафтенів з формальдегідом (70 %), олігобензімідазолов (73,9 %), фурфурілових смол і інших полімерів. Чим більше вихід і міцність коксу, а також міцність його зчеплення з наповнювачем, тим вище якість В-ВКМ.

Особливістю В-ВКМ є відносно висока пористість вуглецевої матриці, а також її пересеченість тріщинами в напрямі, перпендикулярному до наповнювача. Тріщини в матриці виникають при охолодженні виробу від температури отримання (3300К) до кімнатної, унаслідок високої термічної напруги. Для усунення пористості операцію просочення - карбонізує з подальшою графітацією операцією просочення піроуглеродом повторюють кілька разів.

Багатократне просочення покращує механічні властивості і стійкість до окислювання В-ВКМ.

Властивості В-ВКМ змінюються в широкому діапазоні, оскільки вони визначаються багатьма чинниками (табл. 1.4.): властивостями початкового волокна і природою що пов'язує, ступенем наповнення, властивостями коксу і міцністю його зв'язку з волокном, умовами просочення, затвердіння, карбонізує, графітації, числом циклів просочення-карбонізувати, умовами газофазового осадження піроуглерода і ін.

Ефективність наповнення В-ВКМ визначається не тільки реалізацією прочностних і інших властивостей армуючого наповнювача, але і впливом його на механізм руйнування матриці, посилення опору матриці зростанню тріщин.

Таблиця 1.4

#### Механічні властивості вуглецевих волокон

Марка	Щільність $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг·м <sup>3</sup>	Діаметр d, мкм	Модуль пружності, Е	Середня міцність на базі 10 мм, $\sigma$	Гранична деформація $\delta$ , %
			ГПа		
ВМН-3	1,71	7,0	250	1,43	0,6
ВМН-4	1,71	6,0	270	2,21	0,8
ВЭН-210	-	9,9	343	1,47	0,4
Кулон	1,90	-	400-600	2,0	0,4
ЛУ-2	-	-	230	2,0-2,5	1,0
ЛУ-3	1,70	-	250	2,5-3,0	1,1
ЛУ-4	-	-	250	3,0-3,5	1,3
Урал-15	1,5-1,6	-	70-80	1,5-1,7	2,1
Урал-24	1,7-1,8	-	150-200	1,7-2,0	1,1

Элур	1,6	-	150	2,0	1,3
Торнел-300	1,77	-	238	3,15	1,3
Торнел-500	-	7,0	245	3,78	1,5
Торнел-700	1,80	-	245	4,20	1,7
Торнел-800	-	6,0	273	5,46	2,0
Магнаміт AS-3	-	8,0	190	2,70	1,4
Карболон-1	1,95	6,0	380	2,42	0,6
Бесфайт НМ-4	-	6,4	450	1,30	0,35
Торейка Т-300	1,76	8,4	235	3,53	1,5
Торейка Т-700	1,80	-	260	5,10	2,0
Торейка Т-800	1,80	-	300	5,59	1,9
Графіл-А	1,76	-	192	2,55	1,3
Графіл-НМС	1,88	-	365-400	2,0	0,5-0,7
Графіл-НТС	1,77	8,0	240	2,5-2,9	1,0
Модмор-1	2,0	7,8	400-450	1,7-2,5	0,5
Модмор-11	1,8	8,1	270	2,8	0,8-1,0

Верхня межа оптимального наповнення В-ВКМ нижче відповідного рівня для вуглепластиків унаслідок вищої жорсткості вуглецевої матриці (6000...8000 МПа), а також повної відсутності релаксації напруги при температурах нижче 1773...2073 К.

Міцність карбонізованого В-ВКМ на тому, що будь-якому пов'язує пропорційна щільності  $\rho$ , як правило, нижче за міцність початкового вуглепластика, оскільки та, що карбонізує супроводиться усадкою і збільшенням пористості. Графітація карбонізованого вуглепластика підвищує його міцність.

Однонаправлені В-ВКМ мають міцність, що наближається до міцності стали. Сдвігові характеристики таких матеріалів підвищуються при укладанні волокон під кутом від  $+10^\circ$  до  $\pm 20^\circ$ . Максимальна міцність на межслойний зрушення

досягається при тривимірному армуванні. Міцність таких В-ВКМ наближається до міцності алюмінію.

В-ВКМ володіють підвищеною міцністю при високих температурах, але схильні до розтріскування при ударних навантаженнях і великій термічній напрузі. Заповнення пір карбонізованого КМ пластичною феноловою смолою під тиском, тобто отримання матеріалу з біматрицею, забезпечує підвищення його пластичності і пониження теплопровідності.

В-ВКМ мають високу анізотропію теплового розширення. Уздовж волокон теплове розширення матеріалу визначається головним чином тепловим розширенням волокна, а в напрямі, перпендикулярному до орієнтації волокна, - тепловим розширенням того, що пов'язує. Найбільш близьким до волокна по величині теплового розширення є піроуглерод. Композиції на основі смол і пека є напруженими із-за різниці коефіцієнтів термічного розширення компонентів. Коефіцієнт термічного розширення В-ВКМ з безперервними волокнами росте із збільшенням кута між напрямом вимірювання і орієнтацією волокон від негативних значень, характерних для високоорієнтованих вуглецевих матеріалів.

До унікальних властивостей В-ВКМ відноситься висока температуростійкість в інертних і відновних середовищах. По здатності зберігати форму і рівень фізико-механических властивостей в цих середовищах В-ВКМ перевершують відомі конструкційні матеріали. Деякі В-ВКМ, особливо отримані такою, що карбонізує вуглепластика на основі органічних полімерів, характеризуються збільшенням міцності з підвищенням температури експлуатації від 293 до 3000 К. При температурах вище 3273 К В-ВКМ працездатні протягом короткого часу, оскільки в інтервалі 3273-3873 К при тиску нижче 10 МПа починається інтенсивна сублімація графіту. Чим досконало кристалічна структура графіту, тим при вищій температурі і з меншою швидкістю відбуваються термодеструктивні процеси.



Проте властивості В-ВКМ різко змінюються на повітрі при тривалій дії щодо невисоких температур. Так, при 673...923 К в повітряному середовищі відбувається окислення В-ВКМ і, як наслідок, швидке зниження міцності в результаті наростання пористості. Окислення матриці випереджає окислення УВ, якщо останні мають досконалішу структуру вуглецю.

Швидкість окислення В-ВКМ знижується з підвищенням температури їх отримання і зменшенням числа дефектів. Так, унаслідок освіти при тій, що карбонізує менш дефектної матриці стійкість до окислення В-ВКМ на основі кремнійорганічних смол, особливо у разі легування бором, вище, в порівнянні з В-ВКМ на основі фенолоформальдегідної смоли.

Наявність домішок металів, особливо Fe, Ni, Co прискорює окислення матриці. Стійкість В-ВКМ до окислення в цьому випадку може бути значно підвищена шляхом введення до складу В-ВКМ фосфорного ангідриду, який при високих температурах взаємодіятиме з іонами металів.

Ефективно запобігає окисленню виробів з В-ВКМ просочення їх кремнійорганічними з'єднаннями, які змінюють механізм окислення зважаючи на освіту карбіду і оксиду кремнію. Для запобігання або уповільнення окислення В-ВКМ на готові вироби наносять захисні покриття, як які використовують пірографіт, розплав скломаси, сплав карбіду кремнію і оксиду алюмінію, борид цирконію, дісиліцид гафнію або цирконію, карбід бору або цирконію і ін.

Істотно підвищується стійкість до окислення В-ВКМ при армуванні УВ із захисним покриттям з карбіду кремнію. Це покриття, нанесене на кожне волокно, оберігає від руйнування межу контакту наповнювача і матриці і знижує швидкість окислення матеріалу при 773 К в 3-5 разів, при 1773...1973 К і окисленні в дифузійному режимі - більш ніж в 10 разів. Проте в зоні температури плавлення рідких евтектик карбід металу - вуглець віднесення вуглецю може зрости, оскільки швидкість його

випаровування з вільної поверхні рідкої евтектики може бути вище за швидкість випаровування вуглецю з чистого графіту.

Крім того, при великих потужностях гальмування (авіація, швидкісні поїзди) для цих матеріалів характерне посилення вібраційних процесів при гальмуванні, боротьба з якими ускладнює конструкцію гальмівної системи (рис. 1.7).

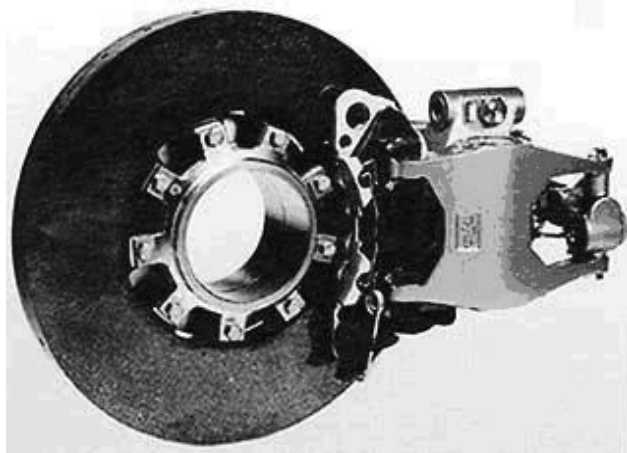


Рис. 1.7. Конструкція гальмівної системи для зниження вібраційних процесів

Серед сучасних фрикційних матеріалів останнього покоління, які потенційно можуть бути використані у високонавантажених системах гальмування, особливе місце займають композиційні матеріали (КМ) з вуглецевою (вуглець-вуглецеві КМ - В-ВКМ) і керамічною (керамічні КМ - ККМ) матрицею, армованою вуглецевими і іншими типами волокон. Можна відзначити наступні

переваги систем гальмування на основі В-ВКМ і ККМ в порівнянні з системами на основі традиційних фрикційних матеріалів, перш за все, металевих і металокерамічних:

- відносно мала щільність, що дозволяє зменшити вагу систем гальмування (приблизно на 40...60%);

- висока стійкість до зношування в різних атмосферних умовах, що дозволяє істотно збільшити кількість гальмувань до ремонту;

- здатність поглинати при гальмуванні велику кількість кінетичної енергії шляхом перетворення її в теплову. При цьому елементи гальмівних пристроїв працюють без пошкодження;

- висока стійкість до термічного удару;

- висока температура експлуатації, що допускається, - більше 1273 К.

Отримувані матеріали мають високий коефіцієнт тертя, особливо при підвищених температурах (0,7...0,8 при температурах понад 673...873 К) і характеризуються невисокою його чутливістю від питомого контактного тиску на поверхні фрикційної пари тертя, швидкості руху транспортного засобу, вологості повітря, а також вони малощумні при експлуатації. Крім того, для В-ВКМ характерна відсутність такого явища як «схоплювання» гальмівних дисків, яке характерне для металокерамічних матеріалів, виникає унаслідок локального розплавлення металевої матриці і обертання колеса, що приводить до повного або часткового зменшення швидкості.

Як і вуглець-вуглецеві фрикційні матеріали, композити з керамічною матрицею застосовуються для підвищення ефективності гальмування, особливо для високошвидкісних і високонавантажених транспортних засобів, коли температура на поверхні пари тертя може досягати 1273...1473 К. Керамічні матеріали, використовувані для фрикційних пар тертя, розділяються на армованих різного типу волокнами або віськерамі, і неармовані (горячепресовання, реакційноспечення).

Основні проблеми матеріалів на основі кераміки пов'язані з їх низькою стійкістю до механічних і теплових ударних навантажень. Ця обставина багато в чому обмежує сферу застосування неармованої кераміки, особливо коли виникає ситуація з екстремним гальмуванням транспортного засобу, різким виділенням великої кількості теплової енергії, що супроводиться.

У вузлах тертя останніми роками найбільше застосування знайшли фрикційні ККМ з вуглецевим армуючим наповнювачем (рубані волокна, тканини, стрічки, мати) і керамічною матрицею на основі карбїду кремнію, отримуваного методом просочення розплавом кремнієм вуглець-вуглецеві заготовки (LSI-процесс).

У автомобільній промисловості гальмівні диски з вуглець-вуглецевих матеріалів, не дивлячись на хороші трибологічні характеристики і високу термостійкість, не знайшли широкого застосування, за винятком спортивних автомобілів (Формула-1 і ін.). Головними причинами відсутності широкого застосування є: висока трудомісткість і вартість виготовлення якісних дисків з В-ВКМ, низький коефіцієнт тертя при негативних і невисоких (до 673 К) температурах матеріалу диска, підвищений знос при температурах понад 873 К унаслідок окислення вуглецю диска, вібраційні процеси при гальмуванні.

У Росії розробкою фрикційних ККМ з SiC матрицею і гальмівних дисків на їх основі для наземного і, перш за все автомобільного транспорту займається ТОВ «НПФ «Кераком» (Санкт-Петербург). Як базовий технологічний процес на підприємстві розвивається модифікація процесу жидкофазного силіцировання (LSI-процес), в якому як заготівка використовується вуглепластик, що карбонізує. Загальний вид дослідного зразка системи гальмування легкового автомобіля з диском з ККМ з карбідокремнієвої матрицею (діаметр диска 260 мм) приведений на рис. 1.8.



Рис. 1.8. Гальмівний диск з

Найбільшими світовими виробниками гальмівних дисків для авіаційної і авіакосмічної техніки з вуглець-вуглецевих матеріалів є Honeywell (США), Carbone Lorraine (Франція), Korea Aerospace Industry, Ltd (Корея) і ряд інших. З російських компаній, гальмівних дисків, що займалися розробкою, з В-ВКМ, виділимо ВАТ НВО «Композит» (В-ВКМ «АРГОЛОН») і ФГУП «Нііграфіт» (В-ВКМ ТЕРМАР). Гальмівні пристрої з монодисками з вуглець-вуглецевого матеріалу застосовуються на російських літаках - Іл96, Ту204, Ту214,

Ty160, An124; на літаках виробництва США - B767, B777, F-15, F-16, F22, B-32; Євросоюзу - A330/340 і ряду інших.

Є інформація про широке застосування композиційних матеріалів з керамічною матрицею в конструкції нового космічного човнака (space glider) X-38, у тому числі і як фрикційні матеріали в гальмівних системах.

#### 1.4. Умови роботи фрикційних вузлів гальма і навантаження, що діють на них

Інтенсивний розвиток техніки, зростання ваги і швидкостей машин (особливо транспортних) викликали необхідність застосування особливо форсованих режимів роботи гальмівних пристроїв.

До найбільш навантаженим відносяться гальма коліс літаків (табл. 1.5). Наприклад, на сучасних літаках гальмування відбувається протягом 15...40 с, а початкові швидкості ковзання фрикційної пари можуть перевищувати 30 м/с. У цих умовах деякі гальмівні пристрої літаків повинні поглинути кінетичну енергію, рівну  $20...30 \cdot 10^6$  Дж. Максимальна потужність, що розвивається гальмами коліс одного з пасажирських літаків з турбореактивними двигунами, приблизно 12 500 к. с.

Таблиця 1.5

#### Нагруженість гальмівних механізмів

Основні дані, що характеризують напруженість гальм машин				
Машина	Гальмо	Фрикційні матеріали	Кінетична енергія, що поглинається одним гальмом, Дж	Температура (поверхнева) у фрикційній парі в °С
Літак	Колодка	Асбокаучукова композиція - метал	$1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$	до 400
	Камерний	Асбосмоляна композиція -	$5 \cdot 10^5 -$	до 500

		чавун	$1,5 \cdot 10^7$	
	Дисковий	Металокераміка - чавун	$1 \cdot 10^6$ — $2,5 \cdot 10^7$	до 800
Пересувний склад железнодорожного транспорту	Колодка	Чавун - сталь	$5 \cdot 10^6$	до 500
	Дисковий	Асбосмоляна композиція- сталь		
Автомобіль (вантажний і легковий)	Колодка	Асбокаучукова композиція - метал	$1 \cdot 10^6$	150-400
		Асбокаучукова композиція - метал		
	Дисковий	Металокераміка - метал	$5 \cdot 10^6$	800
Бурові лебідки	Стрічковий	Асбокаучукова (асбосмоляна) композиція - метал	$4 \cdot 10^9$	600
Крокуючий екскаватор	Стрічковий	Асбокаучукова композиція - чавун	$3 \cdot 10^6$	400
Гусеничний трактор	Стрічковий	Асбокаучукова композиція - метал	$1 \cdot 10^5$	300
	Дисковий	Металокераміка - сталь		

При цьому за одну посадку гальма цього літака виділяють до 16 250 ккал тепла, а температура в зоні тертя досягне  $1000 \dots 1200^\circ\text{C}$ . У деяких гальмах об'ємна температура може підвищуватися до  $200 \dots 600^\circ\text{C}$ .

У багатьох машинах енергонагруженість гальмівних пристроїв визначається величиною кінетичної енергії, що доводиться на одиницю маси гальмівного вузла. Іноді

для характеристики ефективності використання будівельного об'єму застосовують термін питома енергоємність колеса, тобто відношення величини кінетичної енергії до фактичного будівельного об'єму гальмівного колеса.

Застосування і вдосконалення систем автоматичного гальмування (двохсигнальні системи, системи з програмним регулюванням) значно підвищують ефективність гальмування і у зв'язку з цим викликають додаткове теплове навантаження на гальма.

У дисковому гальмі з фрикційною парою сталь 65Г і металокераміка, що працює в середовищі мастила, швидкість ковзання змінюється від 75 м/с до нуля, а питома тиск досягає 500 Дж/см<sup>2</sup> і більш.

Тривале або часте інтенсивне включення гальм автомобіля підвищує температуру в них до 300...600°C. Температура обода лебідки при спуску бурового інструменту (через 2...3 ч після початку спуску) досягає 600°C. На поверхні тертя фрикційного матеріалу гальмівних пристроїв лебідок крокуючого екскаватора температура підвищується до 320...400°C.

Дані, приведені в табл. 1.5, показують, що для кожного типу машини часто застосовують гальма, що різко відрізняються один від одного величиною кінетичної енергії, що поглинається, і температурою. Це пов'язано з тим, що машини одного і того ж типу (наприклад, транспортні машини) можуть мати різну вантажопідйомність, швидкість включення гальм і інші параметри.

Природно, що і напруженість, а також тепловий режим таких гальм для одного і того ж типу машини можуть бути різко відмінними. Тому доцільно проводити розмежування гальмівних пристроїв по їх напруженості і, особливо, температурним умовам роботи.

Фрикційні вузли гальмівних пристроїв розділяють на три групи по напруженості і величині об'ємної температури:

- *перша* - легкі умови роботи (короткочасна об'ємна температура до 200°C; тривала - до 120°C; тиск- до 80 Дж/см<sup>2</sup>);

- *друга* - середні умови роботи (короткочасна об'ємна температура до 400°C, тривала -до 250°C; тиск до 150 Дж/см<sup>2</sup>);

- *третья*- важкі умови роботи (короткочасна об'ємна температура до 600°C; тривала - до 150°C; тиск - до 600 Дж/см<sup>2</sup>).

Таблиця 1.6

Сфери застосування пар тертя гальмівних пристроїв

Умови роботи	Матеріали пар тертя	Допустимий тиск, МПа	Температура пари тертя, °C		Коефіцієнт тертя
			поверхнев а	об'ємна максималь на	
Вельми легкі і легкі без змазування	Асбокаучукові, спечені матеріали на основі міді і алюмінію, природні полімери (шкіра, модифікована деревина) в парі із сталлю	0,8	60...200	120	0,3...0,35
Середні без змазування	Асбополімерні композиції з тим, що комбінованим пов'язує, порошкові матеріали на основі міді і заліза в парі із сталлю і чавуном	1,5	Не більш 400	250	0,25...0,28
Важкі без змазування	Порошкові матеріали на залізній основі, композиційні матеріали, углеродисті, а також асбополімерні в парі із сталлю і чавуном	6	Не більш 1200	600	0,22...0,25



По величині температури робочих поверхневих шарів фрикційних елементів гальмівні пристрої можна розділити на п'ять груп:

- 1) з вельми легким режимом роботи - до 100°C;
- 2) з легким - до 250°C;
- 3) з середнім - до 600...700°C;
- 4) з тяжким - до 1000°C;
- 5) надважким - більш 1000°C.

Приведену класифікацію доцільно застосовувати при проектуванні нових гальм і підборі матеріалів для них, причому цю класифікацію слід застосовувати у кожній галузі машинобудування.

Наприклад, вимоги до фрикційних вузлів і гальма в цілому для автотранспорту не можуть бути єдиними, оскільки є автомобілі, де поверхнева температура деталей гальма не перевищує 100...150°C. У інших же вона досягає 900...1000°C. Для згаданих машин застосовують різні типи фрикційних матеріалів; крім того, може бути різною і методика випробувань цих матеріалів. Сфери застосування пар тертя гальмівних пристроїв, що рекомендуються, приведені в табл. 1.6.

#### 1.5. Вимоги до фрикційних матеріалів

Показники якості гальмівних пристроїв визначаються в основному конструктивного виконання вузла тертя і оптимального поєднання матеріалів фрикційному пари. Для забезпечення стабільності гальмівного моменту, підвищення надійності і зносостійкості елементів гальма застосовують спеціальні матеріали з підвищеними фрикційними властивостями (фрикційні накладки) у

контакті з металевим контртілом. Фрикційні накладки виготовляють з шкіри, пробки, модифікованої деревини, металів, асбополімерних композицій, порошкових матеріалів. Вони є бистроїзнашиваючимися елементами в порівнянні з металевим контртілом і тому мають бути достатньо дешевими, а фрикційний вузол повинен мати таку конструкцію, при якій забезпечується швидка зміна зношених накладок.

При виборі матеріалів пари тертя рекомендується враховувати вид контакту її елементів, значення коефіцієнта взаємного перекриття ( $K_{вз}$ ), вимоги до контактної жорсткості вузла тертя, вид охолодження, наявність або відсутність змащувального матеріалу, показники якості по ГОСТ 15467-79.

Фрикційні матеріали повинні мати стабільний коефіцієнт тертя, задані механічні і теплофізичні властивості, добре прироблятися до контртіла (при першому гальмуванні  $M_T \geq 0,8 M_{T. \text{ расч.}}$ ), мають бути технологічними, корозійно-стійкими, володіти достатньою механічною міцністю, масло-, волого- і вогнестійкістю, високою зносостійкістю, низькою схильністю до схоплювання в гарячому і холодному стані.

Верхню і нижню межі коефіцієнта тертя задають залежно від конструкції, призначення і умов експлуатації гальмівного пристрою. Нижню межу коефіцієнта тертя визначає умова забезпечення заданого гальмівного моменту, а верхній - збереження стійкості руху транспортної спорідненості при максимально допустимих уповільненнях. Значення коефіцієнта тертя вище розрахункових можуть з'явитися причиною юза ходових коліс транспортного засобу, їх підвищеного зносу, втрати керованості. Значення коефіцієнта тертя, що рекомендуються, для гальмівних пристроїв автотранспортних засобів складають 0,35, підйомно-транспортних машин - 0,35...0,45, літаків - 0,25...0,5.

Зносостійкість визначає термін служби фрикційних накладок, міжремонтні пробіги машин п час ремонтних простоїв. Оцінюють її виходячи з типу гальма, умов експлуатації і якості фрикційного матеріалу. Так, термін служби накладок гальмівних пристроїв автомобілів повинен складати 50...100 тис. км. пробігу.

Теплофізичні властивості пари тертя гальма визначаються в основному теплоємністю і теплопровідністю матеріалів. Теплоємність сприяє зниженню температури пари тертя за рахунок поглинання теплоти, а теплопровідність - за рахунок перенесення теплоти від поверхні тертя в глиб матеріалу і далі до поверхні охолодження.

Механічні властивості є важливими показниками матеріалів. Фрикційна пара гальма працює в умовах складного напруженого стану. Напряга стискування фрикційної накладки приблизно дорівнює нормальному тиску  $P$ . Сила тертя при гальмуванні викликає в накладці розтягуюча напруга і напруга зрізу. Напруга зрізу орієнтування дорівнює твору коефіцієнта тертя на нормальний тиск  $f_p$ . При терті фрикційних матеріалів в області підвищених температур їх твердість пропорційна площі фактичного контакту поверхонь, що труться, і визначається тиском на плямі фактичного торкання. Модуль пружності фрикційного матеріалу при пружному контакті (легко навантажені гальма з об'ємною температурою до 100°C) впливає на характер фрикційної взаємодії і визначає фактичні площа контакту і тиск на плямах контакту.

Фрикційний матеріал повинен мати мінімальні теплове розширення, усадку і високий модуль пружності, оскільки при жорсткому кріпленні накладки до металевого каркаса унаслідок теплового розширення і усадки фрикційного матеріалу може виникати значна температурна і усадкова напруга в накладці.

Процес накладення фрикційної накладки на контртіло характеризується ударним додатком навантаження, тому фрикційний матеріал повинен володіти високою ударною в'язкістю. При повторно-короткочасному режимі гальмування фрикційна накладка випробовує багатократні циклічні навантаження і повинна мати достатній опір втомі при циклічних діях.

Складність підбору фрикційних матеріалів для гальмівних пристроїв полягає в суперечності, як указувалося раніше, головних вимог, що пред'являються до цих

матеріалів: необхідність отримання великих і стабільних коефіцієнтів тертя в процесі експлуатації при збереженні достатньо високої зносостійкості деталей гальма. Здатність пари тертя зберігати стабільне значення коефіцієнта тертя і малий знос в широкому діапазоні температур називається фрикційною теплостійкістю.

Основними теплофізичними характеристиками фрикційних матеріалів є: високі теплопровідність, питома і об'ємна теплоємність; низький коефіцієнт теплового розширення і висока точка плавлення або розм'якшення.

Фрикційні матеріали повинні мати також малий модуль пружності, при якому температурна напруга, викликані градієнтом температури, будуть мінімальною. Мінімальна питома вага матеріалів дозволить понизити вагу конструкції гальмівного пристрою, що особливо важливе для літаків.

Висока теплопровідність необхідна для запобігання виникненню в тонкому поверхневому шарі температури плавлення матеріалу. Якщо поверхневий шар розм'якшиться, то можливе наволочення металу на інший матеріал фрикційної пари і прихоплювання гальм. У зв'язку з цим матеріал повинен володіти і високою точкою плавлення або розм'якшення.

Низький коефіцієнт теплового розширення фрикційного матеріалу зменшує теплову напругу між внутрішньою і зовнішньою поверхнею елемента пари тертя (наприклад, гальмівного барабана, диска).

Висока питома теплоємність дозволяє матеріалу поглинати більшу кількість тепла при мінімальному підвищенні температури, а велика об'ємна теплоємність дозволяє мати мінімальні габарити барабана (диска) при певній питомій вазі матеріалу.

Окрім цього, до фрикційних матеріалів пред'являються вимоги по швидкій прирабативаємісті, корозійній стійкості при змінах температури від 60 до +1500°C, вогнебезпеки, а також технологічні вимоги (можливість обробки на верстатному

устаткуванні, кріплення до сталевго каркаса) і експлуатаційні вимоги (безшумність, масло і водостійкість і ін.).

До матеріалів гальмівних пар, що працюють в тяжких умовах, пред'являються також додаткові вимоги - висока механічна міцність, стійкість проти теплової втоми, відсутність тенденції дряпати поверхню тертя зв'язаної деталі, відсутність явищ схоплювання при роботі, забезпечення плавного гальмування.

Як показали дослідження однією з основних вимог, що пред'являються до фрикційних матеріалів для високонавантажених гальмівних пристроїв, слід рахувати відносну стабільність і рівномірність зміни хімічного і фазового складу, структури і, отже, властивостей поверхневого шару матеріалів в процесі експлуатації.

Жоден чистий метал або який-небудь інший матеріал не задовольняє всім перерахованим вимогам. Тому завдання підбору і створення нових фрикційних матеріалів є складним і вимагає проведення широкого комплексу досліджень.

Вирішальними в терті ковзання є два процеси: коливання контактуючих нерівностей і розм'якшення поверхневого шару під дією температури тертя. Остання переводить зовнішнє тертя у внутрішнє в тонкому, розм'якшеному поверхневому шарі.

Молекулярно-механічна теорія тертя розглядає два види взаємодії поверхонь, що труться: механічне (впровадження) і молекулярне (тяжіння і схоплювання). Одним із загальних положень цієї теорії є принцип підсумовування елементарних сил тертя. При цьому виникає необхідність визначення площ того, що стосується двох твердих тіл і питомих сил тертя, тобто опору, що виникає на одиниці фактичної площі торкання.

Результати експериментальних і теоретичних досліджень показали, що фактична площа торкання утворюється в результаті одночасної деформації як окремих мікро-виступів (шорсткість), так і напівпростору, на якому вони розташовані

(хвилястість). При цьому частина мікро-виступів деформується пластично, інша частина-упруго. Хвилі, на яких розташовані мікро-виступи, деформуються переважно пружно.

Існують три групи зносу:

1. Механічний знос, що включає три види: абразивний, унаслідок пластичної деформації і при крихкому руйнуванні.

2. Молекулярно-механічний - знос при захопленні.

3. Корозійно-механічний - корозійний окислювальний знос.

Велика увага в цій класифікації приділяється умовам тертя, що викликають той або інший вигляд зносу. Дія роботи сили тертя вказана на рис. 1.9.

Розглядається як поверхневе руйнування тіл, що труться, під впливом тангенціальних зусиль тертя, що викликають в окремих шаруючи (поблизу ділянок контакту) напругу, що перевищує межу текучості або міцності. Зусилля тертя викликають сколювання, виривання з поверхневого шару твердого тіла найдрібніших частинок з пластичним перебігом матеріалу в зовнішньому шарі, для крихких тіл, без нього.

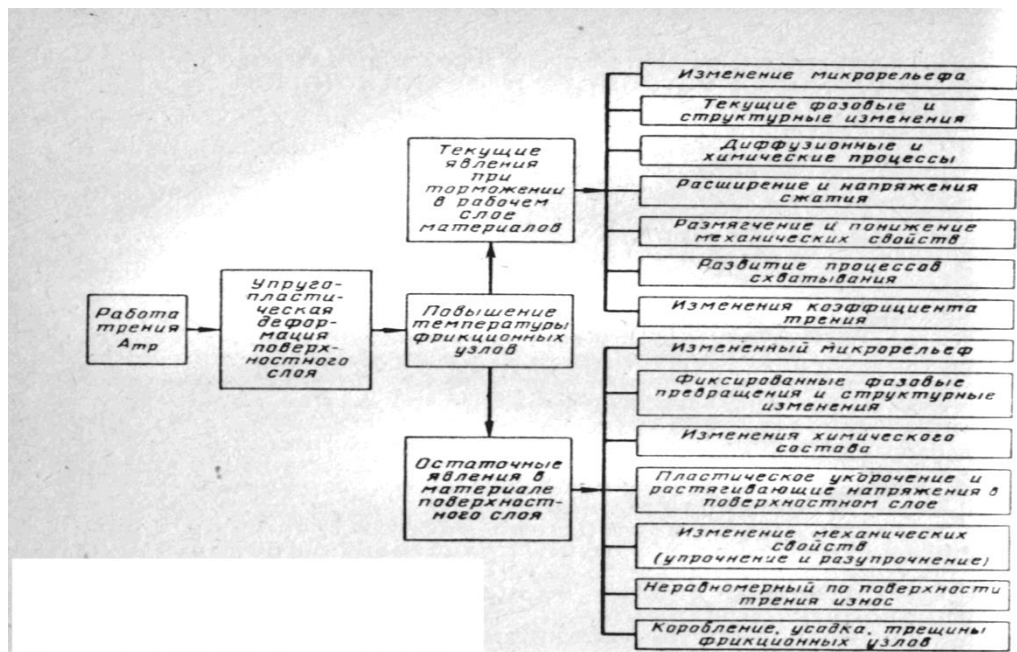


Рис. 1.9. Структурна схема дії роботи тертя на фрикційні матеріали

Таким чином, знос розглядається як явище поверхневого диспергування в результаті багатократної пластичної деформації, зміцнення і втомного руйнування під впливом роботи тертя. Зовнішнє середовище робить значний вплив на вказані явища і величину зносу.

Адсорбційну або адсорбційно-хімічну дію навколишнього середовища інтенсифікують процес, полегшуючи пластичну деформацію і послідовне крихке руйнування металів в поверхневому шарі.

Сухе тертя окислених металевих поверхонь (з погляду фізичної істоти цього процесу) слід розглядати як граничне тертя при мастилi шарами оксидів. Граничне тертя відбувається у всіх випадках, коли тверді поверхні розділені тонкими адсорбційними шарами будь-якого походження.

## 1.6. Висновок до розділу

1. Проведений статистичний аналіз тенденцій розвитку дискових гальмівних систем і перспектив застосування різних видів дисків і нових матеріалів.

2. Проаналізовані нові методи виробництва В-ВКМ і ККМ, які найвигідніше використовувати з погляду економіки, і мають найменший по тривалості технологічний цикл.

3. Проведений огляд і аналіз фізико-хімічних властивостей всіх видів фрикційних матеріалів. Досліджені всі переваги і недоліки В-ВКМ і ККМ.

4. Проаналізовані умови роботи гальмівних систем і навантаження діють на них.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИСТРОЇВ

### ДИСКОВИХ ГАЛЬМ І ФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Загальною тенденцією розвитку і вдосконалення сучасних транспортних засобів є підвищення потужності і збільшення швидкості руху. А значить, актуальніше стає проблема гальмування. До елементів гальмівних систем пред'являється достатньо великий перелік вимог, які в сукупності повинні забезпечувати безпеку при гальмуванні, виконувати постійно зростаючі нормативні вимоги до величини гальмівного шляху, часу гальмування і уповільнення, що допускається. Крім того, повинні забезпечуватися довготривалість терміну експлуатації, економічність і технологічність процесу виготовлення і ремонту, незалежність трибологічних характеристик від температурних і погодних умов, стабільність при тривалих термінах експлуатації гальмівних систем, малозумність процесу гальмування і так далі.



Завдяки ряду переваг, властивих дисковим гальмівним механізмам, спостерігається розширення їх використання в автомобілебудуванні. Цим обгрунтовується актуальність питань, пов'язаних з підвищенням їх міцності і надійності, які значною мірою обгрунтовуються розміром механічної і термічної напруги, яка виникає в плямі контакту гальмівного диска і колодки.

Значний внесок до досліджень робочих процесів дискових гальм і розробки їх конструкцій внесли такі учені як Р.А. Акопян, І.І. Будько, Ц.Р. Борисов, А.А. Велетнів, М.Л. Володимиров, Е.Д. Браун, А.Б. Гредеськул, Г.С. Гудз, А.Г. Гинзбург, В.А. Кульов, В.Я. Кушов, Р.О. Меламуд, І.С. Оржевський, М.А. Подрігало, Е.Б. Решитників, А.М. Туренко, О.С. Федосов, А.В. Чичинадзе, Я.П. Яворський і ін.

Питання удосконалення аналітичних моделей механічних і теплових процесів в дискових гальмівних механізмах (ДТМ) і розробки ДТМ з внутрішньою скобою розглянуті в роботі [12]. Аналіз робочих процесів у фрикційній парі ДТМ, дослідження її довговічності і розробка уніфікованих ДТМ для колісних тракторів приведені в роботі [21]. Дослідження температурних режимів і розробка конструкції закритого ДТМ викладені в роботі [27]. Нові конструкції ДТМ запропоновані також в роботах [5, 6, 8]. Динамічні процеси в ДТМ досліджувалися в роботах [2, 3].

Моделюванню теплових процесів з використанням методу теплового балансу присвячені роботи [16, 23] - для барабанних гальмівних механізмів (БТМ) і [4, 9, 25, 26, 14] - для ДТМ, а результати експериментальних досліджень розподілу температур в ДТМ наводяться в роботах [7, 17].

Моделювання температур з використанням фізичних і математичних моделей проведене в роботах [1, 3, 8] для БГМ, і [25, 44, 48] - для ДТМ.

Питанням дослідження термічної міцності ДТМ і впливу на неї різних чинників присвячені роботи [7, 10, 11, 13]. У роботі [34] розглянутий частковий випадок, якщо температура не змінюється по радіусу диска і фланець диска холодний, а в роботі [18] досліджувалася середня дотична напруга, викликана гальмівним моментом. Вплив різних варіантів кріплення диска досліджений в роботах [35, 36], а в роботі [22] вивчений також питання термоциклічної міцності диска.

Аналіз цих робіт показує, що в них не приділено належної уваги аналізу залежності температури від виду матеріалу вживаного в гальмівних пристроях при реальних законах розподілу температурних полів і застосуванню сучасних методів математичного моделювання розподілу теплових процесів в ДТМ.

### 1.1. Вентильовані диски гальмівних систем

Гальми - це пристрій для зниження швидкості руху або для здійснення повної зупинки машини або механізму. Кінетична енергія перетворюється за допомогою тертя в тепло, тому ми говоримо про «фрикційні гальми». Дотичні поверхні - гальмівний диск або гальмівний барабан з сірого чавуну або литої сталі, і гальмівні накладки.

Збільшення швидкісних можливостей автомобілів привело до впровадження дискових гальм. Дискові гальма розсіюють тепло набагато краще, ніж барабанні. І сам диск, і кріпильна скоба для кріплення гальмівних механізмів, і гальмівні колодки відкриті для доступу повітря. Вільне обдування гальм виключає зниження гальмуючої дії.

Вага гальмівного диска не менш важлива для його якісної роботи, ніж діаметр і конструкція. Зв'язано це з такими характеристиками, як теплоємність і

тепловіддача. Є ще один аспект впливу ваги гальм на керованість транспортного засобу. Існує так званий гіроскопічний ефект. Він полягає в тому, що чим більше маса тіла, що обертається, тим складніше за неї вивести з рівноваги. Особливо це стосується маневрування на високих швидкостях.

Боротьба за зниження підпружинних мас і поліпшення відведення тепла привела до створення так званих вентилязованих дисків. Вони є своєрідним сендвіч з двох дисків, між якими зроблені спеціальні отвори, що формують лопаті, у вигляді турбіни (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Вентилюваний гальмівний диск

Завдяки цим лопастям і каналам тепло відводиться ефективніше, а вага диска знижується. При навантаженнях гальмівні диски можуть нагріватися до дуже високих температур, і якщо це тепло передасться маточині - вірогідний вихід з ладу цього вузла. Рішення цього питання знайшлося у виготовленні розбірних гальмівних дисків. Вони є безпосередньо робочим диском, що скріплює болтовим з'єднанням з середньою частиною, яка кріпиться на маточину. Часто можна зустріти гальмівні диски з перфорацією і канавками (шліцами). Виконані по всій робочій площині диска крізні отвори знижують вагу диска, сприяють ефективнішому зниженню його температури при роботі, видаляють газ, що утворюється при терті колодок об диск. Отже їх відведення у край важливе, особливо в гальмах, що працюють в граничних режимах. Перфорація попереджає викривлення гальмівного диска. Канавки спільно з отворами сприяють видаленню води, грязі, пилу, що знижує ризик подряпати гальмівний диск. І канавки, і перфорація збільшують додаткову гальмівну силу і зменшують знос диска. Автоспорт, з його підвищеними навантаженнями на гальма зажадав ефективного очищення гальмівних колодок. Річ у тому, що при роботі на великих навантаженнях гальмівні колодки дуже

швидко покриваються тонким шаром нагару - вигорілого і відпрацьованого фрикційного матеріалу. Канавки і шліци зрізають цей відпрацьований шар, оновлюючи колодку. Це дозволяє підтримувати працездатність колодок впродовж всієї гонки.

Австралійська компанія DBA запатентувала передову технологію системи вентиляції гальмівного диска (рис. 1.2). Назвали такі диски «Kangaroo Paw (Лапа Кенгуру)». Назва обумовлена тим, що в розрізі перемички між двома половинками диска нагадують слід кенгуру. Завдяки тому, що 144 стовпчики мають особливу форму і розташовані в певному порядку між двома сторонами гальмівного диска, створюється ефект ротора. Обертання диска приводить до утворення турбулентності повітря усередині диска, збільшуючи його швидкість. Це приводить до того, що гаряче повітря виштовхується з усередині дискового простору, сприяючи інтенсивнішому охолодженню. Така архітектура гальмівного диска робить

його міцнішим і стабільнішим при загальному зниженні маси.



Рис. 1.2. Вентильований гальмівний диск «Kangaroo Paw»

Ще одна американська компанія Delphi модернізували весь дисковий гальмівний механізм. Вони зробили дводискові гальма для передніх коліс автомобіля, що отримав назву «Twin Disk». Тут для гальмування використовуються не дві, а три гальмівні колодки. До звичайної пари додається середня колодка, розташована між двох «плаваючих» дисків, не зв'язаних один з одним

перегородками. Завдяки такій компоновці гідравлічний поршень переносить своє зусилля не на дві площини гальмівного диска, як завжди, а відразу на чотири. Тим самим ефективність гальм, динаміка гальмування збільшується в 1,7 разу в порівнянні

із звичайними дисковими гальмами. Зусилля на педаль знижується практично удвічі. Крім того, вентиляція таких дисків значно краща.

## 1.2. Методи виробництва нових фрикційних матеріалів

Серед сучасних волокнистих ККМ виділяються композити з SiC матрицею, армовані вуглецевими волокнами. Завдяки виключно високій твердості і стійкості до абразивного зносу карбїду кремнію, такі композити є одними з найперспективніших сучасних матеріалів для виробів тріботехнічного і, перш за все, фрикційного призначення.

Відзначимо, що до останнього часу В-ВКМ і ККМ, в основному, використовувалися в спеціальних сферах застосування таких, як ракетно-космічна, авіаційна, атомна енергетика і т.д. Найважливіша проблема розширення сфер застосування цих унікальних матеріалів у виробах масового попиту, до яких можна віднести і системи гальмування різних транспортних засобів, полягає в розробці економічно ефективної технології отримання такого типу композитів. Найбільш загальна схема технологічного процесу виробництва виробів з волокнисто-армованих композитів з вуглецевою і керамічною матрицею, у тому числі і фрикційного призначення, включає операції:

- 1) отримання волокнистого каркаса (пресформи) з хаотичним або орієнтованим розташуванням волокон;
- 2) насичення (ущільнення) волокнистого каркаса матричним матеріалом;
- 3) механічна обробка отриманої заготовки.

В даний час другу найбільш важливу операцію технологічного процесу - ущільнення каркаса - реалізують за допомогою різних твердо-, жидко- і газофазних методів, а також їх комбінацій.

### ***Твердофазні методи отримання ККМ:***

1) у групі методів отримання В-ВКМ і ККМ твердофазні технології є найменш поширеними і використовуються тільки для отримання керамічних композитів. Як правило, вони є модифікацією порошкового методу отримання технічної кераміки. Порошок матричного компоненту змішують з армуючим наповнювачем у формі коротких волокон або вусів і додають невелику кількість полімерного зв'язуючого. Потім суміш пресують і термообробляють;

2) в рамках цієї технології можуть бути отримані і керамічні композити, армовані вуглецевими нанотрубками (ВНТ). ККМ тут отримують методом гарячого пресування і зпікання суміші керамічного порошку і ВНТ. Причому суміш може бути отримана двома способами - за сухою і розчину технологією. Другий спосіб використовується з метою забезпечення кращого диспергування ВНТ.

### ***Газофазні методи ущільнення волокнистого каркаса.***

Газофазні методи отримання В-ВКМ і ККМ засновані на ущільненні пористих волокнистих каркасів в процесі фільтрації через них газоподібних хімічних прекурсорів, їх гомогенного і гетерогенного термохімічного розкладання і осадження матричного матеріалу на поверхні нагрітих армуючих волокон. Цей метод отримав назву CVI (Chemical Vapor Infiltration).

При отриманні вуглецевої матриці як хімічні реагенти (прекурсорів) застосовуються газоподібні вуглеводні (метан, пропан, етилен, бензол, ацетилен і тому подібне). У виробництві ККМ методами CVI розглядалася можливість використання як матриця різних керамічних матеріалів. Проте відносно широке промислове застосування і комерційну значущість поки мають тільки ККМ з SiC-матрицею. Існує велика кількість початкових компонентів, які можуть бути використані для піролітичного осадження карбиду кремнію.

У практиці виробництва КМ, в основному, отримали розвиток п'ять модифікацій методу CVI: ізотермічний, термоградієнтний, ізотермічний і термоградієнтний методи

з примусовою фільтрацією, метод з пульсацією тиску. Дані модифікації методу CVI відрізняються, перш за все, механізмом перенесення газоподібних компонентів в пористому каркасі. Найбільше практичне застосування в даний час знайшли ізотермічний і термоградієнтний варіанти методу CVI.

1) ізотермічний метод (ICVI) реалізується в камері, що рівномірно обігривається. Таким чином, формування високоякісних КМ може займати достатньо тривалий термін (до декількох місяців);

2) термоградієнтний метод (TG CVI) характеризується наявністю градієнта температури по товщині каркаса. Цей метод дозволяє отримувати КМ з високою щільністю за один цикл і характеризується щодо великої швидкістю осадження і можливістю об'ємного ущільнення матеріалу.

### ***Жидкофазні методи ущільнення волокнистого каркаса.***

Тут можна виділити два варіанти реалізації процесу:

1) перший заснований на процесах високотемпературного піролізу відповідних елементоорганічних прекурсорів на основі термопластичних і термореактивних полімерів, якими просочують волокнистий каркас (процеси PIP - Polymer Infiltration and Pyrolysis або LPI - Liquid Polymer Infiltration). Для отримання вуглецевої матриці цим методом як початкові матеріали зазвичай використовують термореактивні фенолові і фурфурилові смоли і пеки з кам'яновугільної смоли або нафти. Для отримання карбідокремневої матриці застосовують полікарбосилани або інші кремнійзмістові полімери. В результаті подальшої термічної обробки полікарбосилани розкладаються з виділенням твердого залишку, збагаченого карбідом кремнію. Приведемо укрупнену схему технологічного процесу ущільнення каркаса жидкофазним методом (рис. 1.3).

1.1. Просочення волокнистого каркаса що рідким органічним пов'язує. Для підвищення якості просочення (мінімізації залишкової пористості) її проводять з вакуумуванням або під тиском.

1.2. Отвердіння полімерної смоли, яке проводять, як правило, під тиском і при температурно-тимчасових параметрах процесу, оптимальних для даного типу пов'язує.

1.3. Піроліз, що отвердів, проводиться в процесі високотемпературної обробки в неокисляючому середовищі і може протікати як при нормальному, так і при підвищеному (до 100 МПа) тиску. Ключовим моментом в процесі тієї, що карбонізує є вибір температурно-тимчасового режиму, який забезпечив би максимальне утворення коксового залишку з того, що полімерного пов'язує.

1.4. Повторення циклу “просочення - отвердіння - піроліз”. Для отримання високоякісних КМ (з максимальною щільністю, тобто з мінімальною пористістю) цей цикл доводиться повторювати неодноразово (до 3-8 разів).

Є приклади використання технології PIP для отримання фрикційних В-ВКМ модифікованих вуглецевих нанотрубок. Такий композит отримували шляхом просочення пористого хаотично-армованого рубаними волокнами В-ВКМ суспензією ВНТ в розчині фенолової смоли і метанолу з тією, що подальшою карбонізує отриманого напівфабрикату. Трібологічні випробування показали, що введення вуглецевих нанотрубок дозволяє збільшити зносостійкість В-ВКМ.

Відомі приклади отримання фрикційного композиту за комбінованою технологією, заснованою на поєднанні CVI і PIP процесів. На першому етапі вуглеволокнистий каркас ущільнювали вуглецевою матрицею за газофазною технологією. В результаті отримували пористі В-ВКМ, який на другому етапі просочували розчином полікарбосилана, з подальшим його піролізом і утворенням SiC матриці.





Рис. 1.3. Схема процесу ущільнення каркаса жидкофазним методом

2) другий варіант жидкофазного методу застосовується для отримання КМ з карбідокремневої матрицею. У основі методу лежить механізм реакційного спікання матеріалу заготовки в процесі силіцировання - просочення розплавом кремнію (процес LSI - Liquid Silicon Infiltration). Дані технологічні процеси володіють рядом достоїнств в порівнянні з іншими методами: ККМ мають достатньо високу міцність і теплопровідність; матриця має щільну, практично безпористу структуру; для реалізації процесу потрібне відносно просте технологічне устаткування; процес відносно недорогий і продуктивний унаслідок його невеликої тривалості.

Стосовно волокнисто-армованих ККМ ця жидкофазна технологія має декілька модифікацій, що відрізняються, перш за все, способом введення у волокнистий каркас вуглецевого наповнювача. Найчастіше зустрічаються дві модифікації: просочення армуючого матеріалу суспензією, що містить

вуглеграфітовий порошок і просочення полімерного пов'язуючого з подальшою карбонізацією того, що пов'язує і образує в міжволоконному просторі коксу - вуглецевої матриці.

Друга модифікація технології LSI розглядається в даний час як найбільш перспективна для отримання фрикційних ККМ з SiC матрицею. Перші спроби отримання ККМ системи Cf/C-SiC методом силіцировання вуглець-вуглецевих заготовок були здійснені більше тридцяти років тому, проте тільки трохи більше десяти років тому ці матеріали почали розглядатися як фрикційні матеріали для гальмівних колодок і дисків. Отримувані за цією технологією фрикційні ККМ розрізняються по складу (волокна, наповнювачі), мікроструктурі (зміст кераміки, її розподіл), властивостям (щільність, міцність, теплопровідність), а також за умовами отримання (нанесення покриттів на волокна, температура процесу і так далі).

Проте вони завжди ґрунтувалися на вуглецевих волокнах і карбідокремневої матриці як головних компонентах ККМ.

Фрикційні ККМ, що отримуються за цією технологією, можуть мати різні структури, отримані або пошаровим укладанням тканини або однонаправлених шарів, або хаотичним армуванням з волокон різної довжини. Треба відзначити, що застосування технології пресування заготовок, заснованої на використанні коротких волокон, дозволяє значно здешевити і спростити виробництво фрикційних деталей. Крім того, квазіізотропні композити з армуванням короткими волокнами мають вищу теплопровідність в напрямі перпендикулярному поверхні тертя в порівнянні з шаруватими структурами на основі тканин і однонаправлених стрічок.

Це призводить до зниження поверхневої температури гальмівних дисків і, відповідно, до вищого і стабільнішого коефіцієнта тертя і нижчої швидкості зносу.

Спроби поліпшити експлуатаційні властивості елементів гальмування з ККМ привели до розробки градієнтних фрикційних матеріалів, в яких висока зносостійкість поверхневих шарів поєднується з високою ударною в'язкістю внутрішніх шарів. Основними зовнішніми чинниками, що впливають на працездатність фрикційної пари тертя, є: максимальна температура і її градієнт по товщині фрикційного елемента, а також величини статичного і динамічного навантаження, які приводять до виникнення теплової і механічної напруги в матеріалі фрикційного елемента. З іншого боку, коли ми оцінюємо роботу гальмівних систем, ми виходимо, в основному, з трьох параметрів: коефіцієнт тертя, його стабільність в часі і швидкість зносу фрикційного матеріалу. Значення коефіцієнта тертя в основному залежать від температури поверхні тертя, швидкості руху транспортного засобу і питомого тиску контакту пари тертя. Стабільність коефіцієнта тертя - це показник того, наскільки однорідне тертя протягом періоду гальмування. Знос поверхонь, що труться, визначається або по втраті маси елемента пари тертя, або по їх лінійному або об'ємному зносу.

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (В-ВКМ) застосовуються у високонавантажених вузлах тертя, для яких характерне високе тепловиділення. Найбільш відомі марки В-ВКМ: Карбеникс-4000 (США), SEPCARB (Франція), DAC-I (Корея), СТД, «АРГОЛОН», ТЕРМАР (Росія), УТ-4 (Україна) і ін.

### 1.3. Властивості і фізико-хімічні характеристики матеріалів дискових гальм

У сучасних гальмівних системах застосовують різні фрикційні матеріали, такі як композиційні матеріали з полімерною матрицею, металокераміку, спечені фрикційні матеріали на основі порошків різних металів. Проте всі зростаючі вимоги по енергонагруженості гальмівних пристроїв постійно стимулюють дослідження по створенню нових типів фрикційних матеріалів з вищими

експлуатаційними характеристиками. Слід зазначити, що якщо енергія гальмування автомобіля масою 2000 кг із швидкістю 128 км/год з прискоренням ( $-0,8$ ) м/с<sup>2</sup> складає близько 20 kW, то для сучасних швидкісних поїздів вона перевищує 800 kW, а для літаків досягає 37 MW. Це приводить до того, що температура в зоні тертя фрикційної пари може перевищувати 1273...1473 K, і різні конструктивні рішення, направлені на розсіювання теплової енергії, наприклад, вентиляція гальмівних дисків, принципово не вирішують цю проблему.

Існують різні види фрикційних матеріалів: металеві, неметалеві, порошкові, металокерамічні і композиційні фрикційні матеріали.

### 1.3.1. Металеві і неметалеві фрикційні матеріали

До металевих фрикційних матеріалів відносять чавуни і сталі різних марок. Їх використовують головним чином в незамінюваних або рідко замінюваних елементах гальмівних і фрикційних пристроїв як так звані контртіла (силові диски, барабани, шайби і т. п.), термін служби яких порівнюємо з терміном служби всього гальмівного механізму. За легких умов експлуатації металеві фрикційні матеріали застосовують також як у відповідь деталі (тіл); найбільш поширені такі поєднання матеріалів, як сталь - сталь, чавун - сталь, бронза - сталь. Основні недоліки цих фрикційних матеріалів - нестабільність коефіцієнта тертя при різкій зміні температури, схильність до захоплення поверхонь, що труться; вони поступово замінюються неметалічними фрикційними матеріалами.

Металокерамічні на залізній або мідній основі. Матеріали на залізній основі (наприклад, ФМК-8, ФМК-П, МКВ-50 і ін.), застосовують переважно для високонавантажених гальмівних пристроїв, що працюють без мастила. У їх склад

можуть входити різні компоненти: мідь, графіть, азбест, Окисел кремнію, карбід кремнію, барит, карбід бору, сіра (або її з'єднання), хром, нікель, вольфрам і ін. Металокерамічні матеріали на мідній основі працюють, як правило, з мастилом. У їх склад зазвичай включають: олово, свинець, графіть, залізо, іноді окисел кремнію і цинк. Матеріали на мідній основі застосовують в гальмах і фрикціонах автомобілів, тракторів, Поршневих двигунів вертольотів і інших машин.

Неметалеві фрикційні матеріали виготовляють головним чином з використанням базальтових, вуглецевих, кевларових, рідше азбестових і інших високомодульних волокон; що пов'язує - каучуки, смоли і їх поєднання; наповнювачі - кремнезем, сурик, барит, мідний, латунний, бронзовий дріт або стружка,  $\text{MoS}_2$  і ін. Із-за застосування що полімерного пов'язує такі фрикційні матеріали часто називаються полімерними. Один з кращих матеріалів цієї групи - ретінакс, що отримується гарячим пресуванням у вигляді брикетів з азбесту, меленого бариту, латуні і смоли фенолформальдегідної; працює при температурі на поверхні тертя вище  $600^\circ\text{C}$ .

### 1.3.2. Порошкові матеріали

Спечені порошкові матеріали, що виготовляються методами порошкової металургії, по коефіцієнту тертя і зносостійкості якнайповніше задовольняють сучасним вимогам до важко навантажених гальмівних пристроїв.

З них виготовляють пари тертя гальм могутніх машин при початковій швидкості тертя вище 50 м/с і тиску більше 25 МПа при роботі без змащувального матеріалу і при швидкості вище 100 м/с і тиску більше 70 МПа при роботі із змащувальним матеріалом.

Розрізняють матеріали на залізній і мідній основах. Залізо і мідь підвищують міцність і властивості фрикційного зносу матеріалів. Матеріали на залізній основі зазвичай застосовують для важких і надважких умов експлуатації без змащувального матеріалу, а на мідній - для легких умов роботи без змащувального матеріалу і з ним.

Спечені порошкові фрикційні матеріали отримують, як правило, на мідній або залізній основі. Як наповнювачі і добавки використовують матеріали, що забезпечують стабільність коефіцієнт тертя (карбіди і оксиди металів), відсутність захоплювання (графіть, азбест,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{CuS}$ ,  $\text{ZnS}$ ), підвищення опору ковзанню ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{BC}$ ,  $\text{SiC}$ , мулліт і ін.), поліпшення теплового режиму (кольорові метали і сплави  $\text{Sn}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Al}$ ). Підвищення міцності з'єднання наповнювачів і добавок з металом-основою досягається безпосередньо в процесі зпикання. Найбільшого поширення набули матеріали на основі заліза і міді. З матеріалів на залізній основі найбільшого поширення набули ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50Л і СМК. Матеріал ФМК-8 призначений для роботи у важко навантажених дискових гальмах великої енергоємності. Матеріал ФМК-11 в порівнянні з ФМК-8 має більший за значенням і стабільніший коефіцієнт тертя, але володіє меншою зносостійкістю. Матеріал МКВ-50А для накладок дискових гальм забезпечує високу стабільність механічних властивостей при температурі до  $600^\circ\text{C}$ , а за значенням і стабільності коефіцієнта тертя і по зносостійкості перевершує.

Матеріали типу ФМК. Матеріал на основі заліза типу СМК відрізняється підвищеним вмістом марганцю, присутністю карбіду і нітриду бору, карбіду кремнію і дисульфиду молібдену. Модифікації цього матеріалу призначені для застосування у важко навантажених, дискових і стрічкових гальмах дискових колодок.

Перші три матеріали розроблено для важко навантажених гальм і муфт літаків і військової техніки. Матеріал СМК-80 застосовується в гальмах і муфтах зчеплення великовантажних автомобілів - кар'єрних самоскидів вантажопідйомністю більше 65 т.

Матеріали на основі міді. Матеріали на основі оловянистої бронзи мають високу зносостійкість, достатньо високий коефіцієнт тертя і в порівнянні з матеріалами на залізній основі менше зношують зв'язане контртіло.

Коефіцієнт тертя матеріалів на мідній основі в парі із сталлю і чавуном залежно від режиму тертя складає 0,23...0,5; максимально допустима стала об'ємна температура 200...300°C. У деяких гальмівних пристроях застосовують порошкові матеріали на основі алюмінієвої бронзи. При щільності 6,0...6,5 г/см<sup>3</sup> вони мають твердість HB 60...80, межа міцності при вигині до 300 МПа, при зрізі до 200 МПа.

Коефіцієнт тертя матеріалів на основі алюмінієвої бронзи у контакті із сталлю складає 0,3...0,33. Вони широко використовуються у важких транспортних засобах.

Найбільшого поширення набув матеріал МК-5 (перший рядок таблиці). У автомобіле- і тракторобудуванні з цих матеріалів виготовляють гальмівні диски, колодки і накладки для муфт зчеплення.

Матеріали для роботи в умовах рідинного мастила. Переваги гальмівних пристроїв з парою тертя, що працює в умовах рідинного мастила, полягають у високій зносостійкості, плавності наростання гальмівного моменту, легкості і надійності охолодження. Швидкість на початку гальмування досягає 100 м/с і більш. До їх недоліків відносяться низький (0,08...0,1) коефіцієнт тертя, великі габаритні розміри і високий (до 700 МПа) тиск. Коефіцієнт тертя фрикційних пар гальмівних пристроїв при роботі із змащувальним матеріалом багато в чому залежить від конструкції змащувальних канавок на поверхні тертя. Форма канавок визначає ефективність охолодження поверхні тертя і знос накладки.

### 1.3.3. Фрикційні асбополімерні матеріали

Порошкова технологія дозволяє отримувати фрикційні матеріали із заданими властивостями. Для автомобілів малої і середньої вантажопідйомності і для сільськогосподарських і промислових тракторів малої і середньої потужності зазвичай використовуються фрикційні матеріали на полімерній основі. Вони застосовуються також в сільськогосподарському і дорожно-строительном машинобудуванні, в буровій техніці і так далі

Як правило, до складу матеріалів входять три компоненти:

- теплостійкий армуючий матеріал з міцними волокнами, наприклад азбест (15...16%);

- теплостійкі з високим і стабільним коефіцієнтом тертя порошкоподібні наповнювачі неорганічного походження (20...60%);

- що полімерне пов'язує: натуральні і синтетичні каучуки, синтетичні смоли (15...30%) з агентами вулканізації або затверджувачем, прискорювачами і активаторами вулканізації або затвердження.

Фрикційні асбополімерні матеріали (ФАПМ) набули широкого поширення в гальмівних пристроях під'ємнотранспортних, будівельно-дорожніх, землерийних і шахтних підйомних машин, рухомого складу метрополітену, трамваїв, бурових установок, автотранспортних засобів і так далі ФАПМ є багатокомпонентною композицією, основним компонентом якої (до 70%) є азбест. Для додання матеріалу певних технологічних і експлуатаційних властивостей ФАПМ містить мінеральних і органічних наповнювачів. Від поєднання і кількісного змісту наповнювачів залежать коефіцієнт тертя, зносостійкість, фізико-механічні показники, а також технологічні властивості матеріалу в процесі його виготовлення.



Армуючим елементом є унікальний природний мінерал, що здобувається відкритим методом, - азбест. Елементарні волокна азбесту мають вид трубок із зовнішнім діаметром близько 32 нм і внутрішнім - 2,6 нм, тобто в поперечному напрямі волокно має розміри, характерні для колоїдно-дисперсних матеріалів. Елементарні волокна упаковані в пасмі діаметром від декількох десятків до сотень мікрометрів. У пасмах волокна утримуються силами міжмолекулярного тяжіння. Середня довжина волокна складає 1...3 мм. По своїй хімічній природі азбест є водним силікатом магнію. Волокна азбесту володіють високою міцністю на розтягування (до 3 ГПа), що набагато перевищує міцність стали. Порожнини волокон частково або повністю заповнені водою, яка утворює на внутрішній поверхні практично мономолекулярний шар, тому вона проявляє властивості інші, чим звичайна волога, віддаляючись лише при температурі вище 425°C. Вид кристалічної решітки цього матеріалу достовірно не встановлений. Азбест володіє високим коефіцієнтом тертя (до 0,8), який слабо міняється залежно від температури. То ж можна сказати про міцність волокон, яка при нагріванні до 400°C знижується всього на 20%. Лише при 800 °C спостерігається руйнування волокнистої структури. Таким чином, азбест неначе спеціально створений як основа для фрикційного матеріалу.

Проте у азбесту є і істотний недолік. Він вважається екологічно за небезпечний матеріал. Якнайтонші моноволокна, потрапляючи в повітря у вигляді пилу, утворюють стійку суспензію, яка вельми поволі осідає. Потрапляючи в легені людей і тварин, волокна вражають органи дихання, викликаючи особливе захворювання - асбестоз. Уражені ділянки легенів можуть стати центрами утворення ракових кліток. У багатьох країнах вже заборонено використання азбесту в будівництві, електротехніці і інших галузях. Такі ж тенденції спостерігаються і у виробництві гальмівних матеріалів, але знайти ефективну заміну азбесту поки не вдалося. Є спроби замінити азбест волокнами з скла, базальту, шлаку, бору, вуглецю, але ці матеріали не дають такий же ефект, як азбест. Зокрема,

немає такого матеріалу, який так само, як азбест, очищав би поверхню металевого контртіла і при цьому поглинав і зв'язував продукти зношування, не кажучи про інші якості. Тому азбест поки зберігає заслужене на лідерство серед компонентів фрикційних матеріалів.

Наповнювачами азбестових матеріалів служать залізний сурик, барітовий концентрат, оксиди хрому і інших металів. Додаються також порошкоподібний кокс, графіт, технічний вуглець. Для підвищення теплопровідності вводяться пороша і стружка з міді, латуні, цинку, алюмінію, залоза і так далі

Компонентом, що пов'язує, у ФАПМ є каучуки, смоли і їх комбінації. Використовуються бутадієнові, бутадієн-тіррільні, бутадієн-метіл-вінілпірідінові, стиролові і інші синтетичні каучуки. Як смоли застосовуються фенолформальдегідні, анілін фенол-формальдегідні, кремнійорганічні, епоксидні компаунди і ін. Одночасно вводяться вулканізатори і отверджувачі.

Матеріали на тому, що каучуковому пов'язує володіють високим коефіцієнтом тертя і зносостійкістю при щодо невисоких температурах тертя (до 250°C) ФАПМ па що смоляному пов'язує мають вищу (до 600°C) теплостійкість, але відносно низькі і нестабільні значення коефіцієнта тертя (рис. 1.4).

Вироби на смолянній основі мають велику теплостійкість, але володіють нестабільним коефіцієнтом тертя, крихкістю. Тому якнайкращий результат досягається при сумісному використанні смол і каучуків. Невдале поєднання тих, що пов'язують із-за нестабільності коефіцієнта тертя приводить до виникнення автофрикційних коливань (скрип і виск гальм).

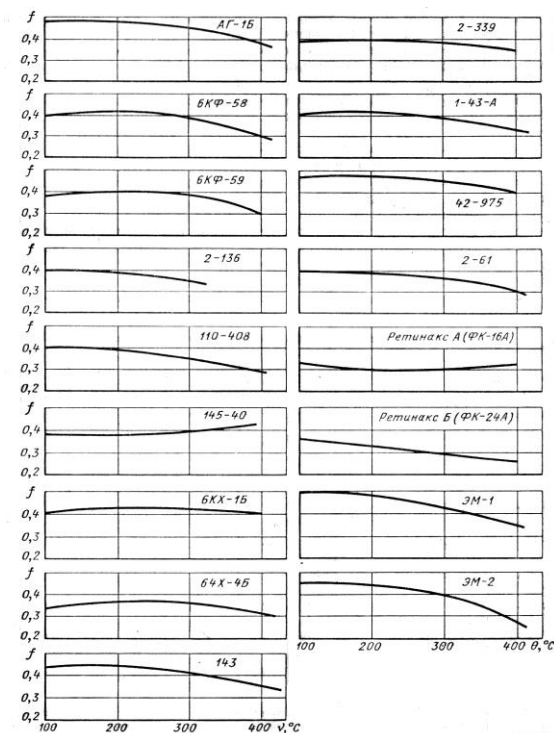


Рис. 1.4. Залежності коефіцієнта тертя

від температури для фрикційних

За способом виготовлення накладки з ФАПМ розділяють: формовані, вальцьовані, ткані і пресовані. Формовані накладки мають високу зносостійкість і стабільний коефіцієнт тертя і застосовуються в гальмах залізничного рухомого складу і поїздах метрополітенів, автотракторних засобів, будівельно-дорожніх і землерийних машин і так далі (табл. 1.1).

Вальцьовані накладки відрізняються підвищеною еластичністю, можливістю використання в гальмівних пристроях з різним радіусом кривизни поверхні тертя контртіла, невеликою вартістю. Недоліками їх є низька міцність і теплостійкість. Ткані накладки при високій міцності мають порівняно низьку теплостійкість (табл. 1.2).

Таблиця 1.1

Основні сфери застосування асбофрикційних матеріалів пар тертя

Марка	ГОСТ або ТУ	Связуюче	Сфера застосування
-------	-------------	----------	--------------------

Гальма є вельми відповідальним вузлом, оскільки визначають безпеку експлуатації транспортних засобів, тому при їх розробці проводиться вельми точний і детальний розрахунок. Виготовляються дослідні зразки, які проходять спочатку лабораторні, потім стендові і натурні випробування. Особливо ретельно відпрацьовуються нові гальмівні матеріали, що піддаються тривалим випробуванням по спеціальних методиках.

матеріалу			
АГ-1Б	ТУ 38 11446-71	Каучукове	Формовані накладки барабанних гальм легкових автомобілів
6КФ-58 6КФ-59 2-136 110-408 145-40	ТУ 38 11413-70 ТУ 38 11480-73 ТУ 38—559-69 ТУ 38 11429-72 ТУ 38 11434-71	Комбіноване	Формовані накладки дискових гальм легкових автомобілів
6КХ-1Б	ТУ 38-5-560-69	Каучукове	Формовані накладки барабанних гальм вантажних автомобілів
6КХ-4Б 143 2-33- 1-43-А 142-975 2-61	ТУ 38-5-460-69 ТУ 38 11427-71 ТУ 3811428-71 ТУ 11492-73 ТУ 11492-73 ТУ 38 11472-782	Каучукове	Те ж саме
Ретинакс А	ГОСТ 10851-73	Смоляне	Формовані накладки важконавантажених гальм колодок і стрічкових
Ретинакс Б ЕМ-1 ЕМ-2	ГОСТ 15960-70	Каучукове	Еластичні вальцьовані накладки гальм колодок ПТМ

Пресовані накладки з матеріалу на основі картону володіють невисокими коефіцієнтом тертя, теплостійкістю і зносостійкістю і вважаються за неперспективних.

Таблиця 1.2

Середнє значення фізико-механичних характеристик асбополімерних накладок

Характеристика	Накладки			Вальцьовані (еластичні)
	Формовані на зв'язуючому			
	Каучуковому	Комбінованом у	Смоляном	
Твердість, НВ	16-27	17-50	47-48	2-3,5
Щільність, г/см <sup>3</sup>	2-2,5	2-2,6	2,3-2,5	2,1
Межа міцності, МПа				
При зрізі	35,9-69,1	20,7-38,9	28-34,1	13,8-16,3
При стискуванні	56,7-104,8	43,2-151,8	75,1-72,8	25-35
При вигині	32,5-81,8	27,8-56,5	22-42,3	-
При розриві	14,8-52,1	20,4-24,5	25,1-21,8	10,8-11,9
Модуль пружності при вигині, МПа	(38-50)10 <sup>-4</sup>	(39-67)10 <sup>-4</sup>	(69-75)10 <sup>-4</sup>	(0,16-0,21)10 <sup>-4</sup>
Питома ударна робота, кДж/м <sup>2</sup>	3-12,3	2,1-5,8	2,5-6,4	23,4-24,2
Коефіцієнт тертя	0,44-0,56	0,42-0,5	0,37-0,38	0,46-0,47
Знос, мм	0,07-0,17	0,09-0,28	0,13-0,24	0,07-0,18
Ступінь поглинання, %				0,4-0,6
Води	0,1-0,88	0,2-0,7	0,2-0,3	0,45-0,7
Масла	0,2-0,9	0,2-0,3	0,15-0,3	3,3-4,9
Бензину	0,2-1,5	0,2-0,8	0,2-0,3	0,88-1

Питома теплоємність, кДж/кг°С	0,88-1,17	0,92-1,13	0,96-1	0,43-0,5
Теплопровідність, Вт/м°С	0,4-0,52	0,41-0,64	0,76-0,81	0,33-1,3
Теплова усадка, %	0,24-0,63	0,11-0,55	0,38-0,45	

Для попереднього вибору матеріалів фрикційних накладок при проектуванні вузла тертя гальма можна користуватися значеннями параметрів, приведеними раніше, проте необхідно враховувати, що вони декілька відрізняються від характеристик фрикційного зносу натурального гальмівного вузла, залежних від комплексу параметрів режиму роботи і конструкції гальмівного пристрою. Зазвичай в натуральному вузлі тертя гальма коефіцієнт тертя і знос декілька нижче.

#### 1.3.4. Композиційні матеріали

Композити (КМ) - це матеріали, що складаються з двох або більш за компоненти (волокон або інших армуючих складових і матриці, що пов'язує їх) і що володіють специфічними властивостями, відмінними від сумарних властивостей їх компонентів, що становлять. Компоненти композитів не повинні розчинятися або іншим способом поглинати один одного. Вони мають бути добре сумісні. Властивості КМ. не можна визначити тільки по властивостях компонентів, без урахування їх взаємодії.

У волокнистих композитах високоміцні волокна сприймає основна напруга, що виникає в композиції при дії зовнішніх навантажень, і забезпечують жорсткість і міцність композиції у напрямі орієнтації волокон.

#### 1.3.5. Структура і властивості композитів

Аналіз фізико-механических властивостей КМ дозволяє визначити достоїнства полімерних КМ (ПКМ). По міцності, а іноді і по жорсткості, вони практично не поступаються металам. З урахуванням же значної відмінності в щільності переваги ПКМ стають особливо очевидними. Можливість досягнення заданого ступеня анізотропії КМ також можна віднести до достоїнств ПКМ, оскільки при цьому якнайповніше реалізуються прочностні властивості волокнистого наповнювача.

Проте слід зазначити і деякі недоліки КМ. До їх числа відноситься значне розсіяння фізико-механических показників, обумовлене структурною неоднорідністю і недостатньою стабільністю процесу формування. Шаруватість структур більшості ПКМ зумовлює їх слабкий опір межслойному зрушенню. Наявність повітряних або газових включень, обумовлена існуючою технологією формування, а також утворення мікротріщин в процесі виробництва і експлуатації викликає необхідність оцінки герметичності конструкцій, а також оцінки зміни інших властивостей матеріалів в процесі експлуатації. Характерний для деяких ПКМ відносно низький модуль пружності вимагає ускладнення конструкції виробів, наприклад за допомогою додаткових ребер на стінках, збільшення їх товщини, введення шарів пено- і сотопластов і так далі.

Класифікувати ПКМ можна як по хімічній природі наповнювача (склопластики, органопластики, вуглепластики і т. д.) і його вигляду (волокніти, текстоліти і т. д.), так і по характеру макроструктури матеріалу формованого виробу (ізотропне, трансверсально-ізотропне, ортотропне армування). Можлива класифікація і по інших ознаках (наприклад, по методу формування або за призначенням виробу). По взаємному розташуванню (орієнтації) арматури можуть бути виділені три основні групи матеріалів: однонаправлені (волокністі), шаруваті і просторово-зшиті. Якщо всі армуючі елементи розташовані паралельно один іншому, то прийнято вважати, що композитне середовище має однонаправлену структуру; якщо армуючі елементи розташовані під кутом один до іншого в двох або декількох паралельній площині,

то структура називається шаруватою, і нарешті, якщо між армуючими шарами є поперечні зв'язки - просторово-зшитою. Найчастіше застосовується взаємно ортогональне розташування волокон, причому співвідношення між подовжніми і поперечними шарами може бути самим різним (1:2, 1:3, 1:5 і т. д.). Матеріали з укладанням 1 : 1 прийнято називати рівноважними (або равнопрочними).

Орієнтація волокнистого наповнювача і його вміст в полімерній матриці дозволяють, з одного боку, оцінити фізико-механичні властивості матеріалу, а з іншою, визначити технологічні параметри процесу формування виробів, а отже, і вимоги до вживаного устаткування. Для ізотропного матеріалу властивості однакові по всіх напрямках. Для траисверсально-ізотропних матеріалів характерна рівність властивостей для будь-яких напрямів в одній площині і істотна відмінність їх в напрямі, нормальному до цієї площини.

Анізотропна схема армування характеризується відмінністю властивостей матеріалу (не тільки фізико-механических, але і тепло-фізичних, пружно-еластичних, технологічних і інших) на всіх напрямках.

Матеріали з ізотропною структурою отримують за допомогою введення дисперсного волокнистого наповнювача в полімерну матрицю.

За природою армуючого матеріалу розрізняють армування органічними або неорганічними природними, синтетичними, штучними матеріалами. За типом армування КМ. бувають: хаотично армовані (премікси, препреги, високонаповнені композиції), орієнтовані (текстоліти, однонаправлені композиції). По вигляду армуючого матеріалу КМ ділять на армованих безперервними волокнами, пряжею, тканинами, листами, рубаними волокнами. По хімічній природі розрізняють поліефірні, що пов'язують, епоксидні, фенолові, меламінові, поліамідні, кремнійорганічні і ін.



Що по характеру пов'язує бувають термореактивні і термопластичні КМ, а по характеру затвердіння - холодного і гарячого затвердіння. По тиску при отвердінні композити ділять на високого, середнього, низького тиску і формування без тиску.

За способом переробки у виробі (основні методи формування) розрізняють КМ контактного формування, литі, напилювані, такі, що виготовляються намотуванням, пресовані і ін.

Основні види армуючих матеріалів, конструкцій, що широко застосовуються при виготовленні, з ПКМ, приведені на рис. 1.5.

У композитах важливим елементом є матриця (що пов'язує), яка забезпечує монолітність композиту, фіксує форму виробу і взаємне розташування армуючих волокон, розподіляє напругу за об'ємом матеріалу, що діє, забезпечує рівномірне навантаження на волокна і її перерозподіл після руйнування частини волокон.

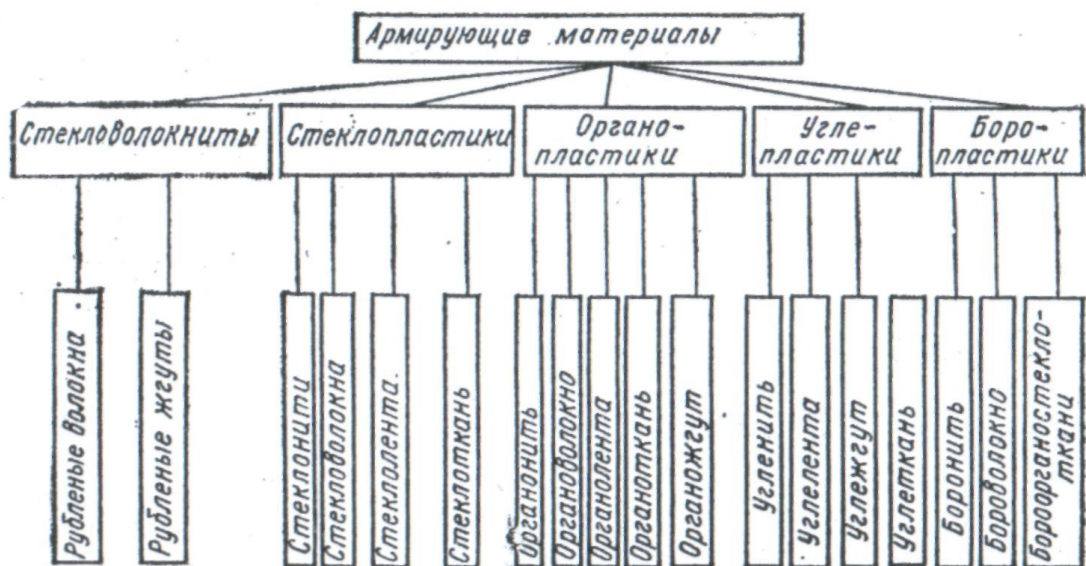


Рис. 1.5. Основні види армуючих матеріалів

Успіх використання ПКМ багато в чому визначається хімічною, механічною і фізичною стабільністю системи волокно - що пов'язує.

### 1.3.6. Фізико-механичні характеристики композитів

Пов'язують для волокнистих ПКМ служать різні термореактивні (затвердеваючі) і термопластичні полімери. Природа матриці визначає рівень робочих температур композиту, характер зміни його властивостей в умовах температурної і атмосферної дії, а також технологічні прийоми і режими отримання і переробки матеріалів у виробі. Тому до того, що полімерному пов'язує пред'являється разом з вимогами високих механічних характеристик ряд спеціальних вимог. Механічні властивості матриці в основному визначають рівень прочностних характеристик ПКМ при зрушенні, стискуванні, рівномірному відриві, при навантаженні ПКМ в напрямках, відмінних від напрямку орієнтації армуючих волокон і тому подібне

Податлива матриця, що заповнює міжволокнистий простір, забезпечує спільну роботу окремих волокон за рахунок власної жорсткості і взаємодії, що існує на межі розділу матриця - волокно. Отже, механічні властивості композиту визначаються високою міцністю армуючих волокон, міцністю і жорсткістю матриці, а також і міцністю зв'язку на межі матриця-волокно. Співвідношення цих параметрів характеризують весь комплекс механічних властивостей матеріалу і механізм його руйнування. Працездатність композиту забезпечується як правильним вибором початкових компонентів, так і раціональною технологією виробництва, що забезпечує міцний зв'язок між компонентами при збереженні первинних властивостей. Як відомо, широке розповсюдження як пов'язують для композитів отримали такі термореактивні полімерні матеріали, які якнайповніше відповідають наступним вимогам: хороша змочуюча здібність і висока адгезія до волокна; високі когезійна міцність і модуль пружності при в'язкому характері руйнування; достатня деформованість, тобто відносні подовження пружної і

пластичної деформації що пов'язує аж до розриву має бути не менше відповідних значень для склоарматури; незначна усадка при отвердінні і значення коефіцієнта термічного розширення, близького до значення цього показника для арматури; мінімальне виділення побічних продуктів при отвердінні; достатня теплостійкість і стабільність фізико-хімічних властивостей при зберіганні і експлуатації; гідрофобність і висока водостійкість; мала корозійна активність по відношенню до металів, хімічна нейтральність що отверділого пов'язує по відношенню до арматури; висока хімічна стійкість; негорючість; прийнятне поєднання технологічних властивостей (в'язкості, життєздатності, температури отвердіння і ін.) і економічних показників полімеру (вартість, дефіцитність і т. п.). Під технологічністю ПКМ розуміється його здатність перероблятися у вироби заданих габаритів і форми, визначається життєздатністю напівфабрикатів (препаратів), температурою, часом і тиском формування.

У табл. 1.3 приведені усереднені дані по чотирьох типах найбільш вживаних у виробництві виробів, що пов'язують, з ПКМ.

Таблиця 1.3

Порівняльні властивості різних типів звязуючих

Показник	Полі- ефірне	Епоксидне	Фенолове	Кремній- органічне	Вуглець- вуглецев е
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	1100-1460	1100-1400	1200-1360	1150-1360	1,6-2,0×10 <sup>-3</sup>
Руйнівна напруга, МПа:					
- розтягування	23,5-68,5	27,4-96	22,5-78,3	6,8-34,2	
- стискування	79,3-250	85-274	68,5-205	49-103	
- вигин	10,8-127	58,8-157	45-118	6,8-96	

Модуль пружності при розтягуванні, ГПа	1,5-4,5	1,9-4,9	2,1-6,8	1,5-3,7	230-600
Відносне подовження при розриві, %	3,7-6	1,2-6,5	0,4-3	0,3-1,5	
Ударна в'язкість, кДж/м <sup>3</sup>	5,9-10,7	2,9-24,5	2,4-11,3	2,3-5,4	
Коефіцієнт терм. розширення $\times 10^{-3}$ , К <sup>-1</sup>	7-15	3-11,7	2-12	2-18	
Теплостійкість по Мартенсу, К	358-383	383-438	403-453	523-553	
Робоча температура тривалої експлуатації, К	393	473	533	723	773-3273
Температура початку інтенсивної деструкції, К	473	533	573	873	
Водопоглинання, %	0,15-0,6	0,03-0,3	0,15-0,6	0,05-0,2	
Усадка при затвердінні, %	4-15	0,5-3,6	0,9-7	2,1-4,3	

При стискуванні композиції те, що пов'язує запобігає подовжньому вигину волокон. Вплив властивостей що пов'язує на властивості композиції при стискуванні виявляється більшою мірою, чим при розтягуванні.

Поліефірні пов'язуючі завдяки їх високій технологічності і невеликій вартості використовуються у виробництві великогабаритних конструкцій з склопластиків, що не випробовують значних навантажень. Обмеження в їх застосуванні пов'язані в основному з великою усадкою при отвердінні, низькими теплостійкістю, атмосферостійкістю і міцністю.

У виробництві відповідальних конструкцій з ПКМ використовуються епоксидні і такі, що фенолові пов'язують, причому останні разом з достатньо високою міцністю додають матеріалу ще і підвищену теплостійкість. До достоїнств тих, що епоксидних пов'язують відносяться незначна усадка при затвердінні і адгезія практично до всіх матеріалів. Ті, що проте ці пов'язують токсичні і дорого коштують.

Ціна фенолових смол відносно невисока, проте їх переробка зв'язана, як правило, з достатньо високим тиском і температурою. Крім того, вони також токсичні.

Кремнійорганічні пов'язуючі знаходять застосування в малонавантажених конструкціях, і їх достоїнства виявляються повною мірою, коли визначальними вимогами до виробу є високі теплостійкість, радіопрозорість і хімічна стійкість. До недоліків тих, що пов'язують цього типу можна віднести низьку адгезіону міцність, крихкість і значну вартість.

### 1.3.7. Вуглець -вуглецеві фрикційні матеріали

Розвиток техніки вимагає механічно міцних і термостійких матеріалів. КМ з металевою матрицею в більшості випадків не володіють достатньою питомою міцністю, а КМ з полімерною матрицею, маючи високі питомі механічні характеристики, значно розупрочнюються при дії високих температур (рис. 1.6). Тому особливий інтерес представляють вуглець - вуглецеві композиційні матеріали (В-ВКМ).

У В-ВКМ висока температуростійкість поєднується з малою щільністю, високою міцністю і модулем пружності, стійкістю до теплового удару. Ці матеріали тривало працездатні при температурах до 773 К в окислювальному середовищі і до 3273 К в інертному середовищі і у вакуумі.

Графітові і вуглецеві матеріали заслужено називають "хлібом" промисловості. Їх виробництво і споживання в промислово розвинених країнах сумірно з виробництвом всіх металів разом узятих (по об'єму, а не по вазі, зважаючи на їх низьку щільність порівняно з більшістю металів). Технологія

виробництва графіту була розроблена більше 100 років тому Бюксмейстером (1878-1880) в Росії, Ачессоном і Кастнером (1887-1893) в США.

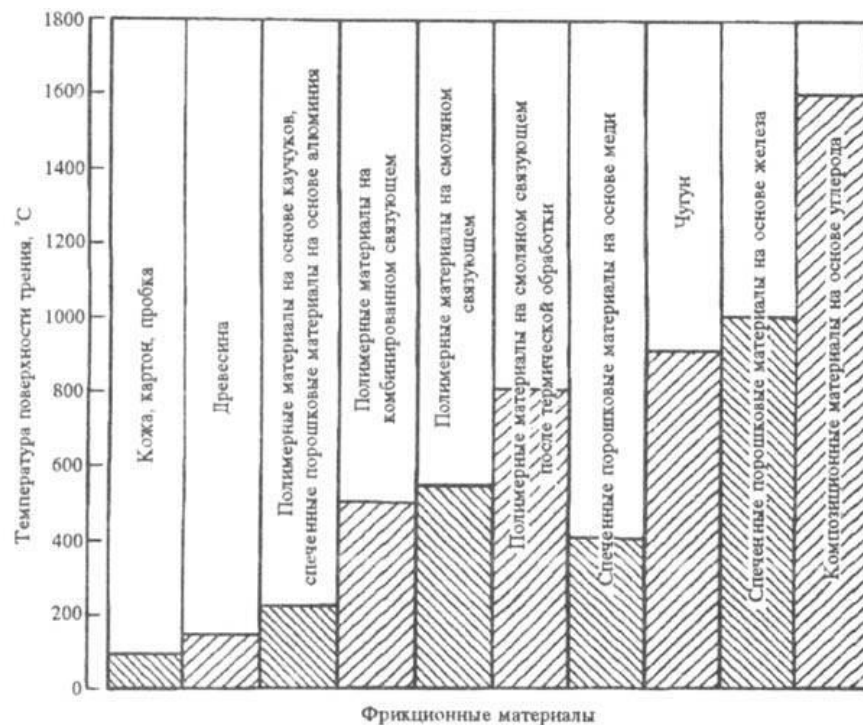


Рис. 1.6. Допустимі температури для різних фрикційних матеріалів

Вуглець - вуглецеві композиційні матеріали (В-ВКМ) з'явилися на 1958-початку 60-х і є графітовою або вуглецевою матрицею, зміцненою вуглецевими волокнами. Порівняно з графітом, В-ВКМ мають вищі прочнісні характеристики, володіють високою стійкістю до термоударам і рядом інших переваг. Основними споживачами графітових матеріалів є металургія, хімічна промисловість і атомна енергетика. Сьогоднішній день світові ціни на графітові матеріали складають від 3 \$/кг (електродний графіт) до 40-200 \$/кг (спеціальний конструкційний і чистий графіт). Обсяг світового виробництва графіту складає декілька мільйонів тонн в рік. За деякими даними, обсяг світового виробництва В-ВКМ сьогодні складає 230-450 т/год при вартості матеріалів 2d структур армування 110 - 2900 \$/кг, 3d і 4d структур - 1100 - 3300 \$/кг і більш.

Приблизно 81% всіх В-ВКМ матеріалів використовується для виробництва гальмівних дисків для літаків, 18% - в ракетно-космічній техніці і лише 1% - для решти всіх сфер застосування. Тоді як потреба В-ВКМ для ракетно-космічної техніки постійно знижується – об'єм виробництва гальмівних дисків для літаків стабільно росте на 12% в рік (дані за декілька років після 1990).

Наповнювач і матриця В-ВКМ залежно від складу, і умов тієї, що карбонізує можуть мати різні модифікації. У прийнятій класифікації вказується спочатку структура вуглецю-наповнювача, потім матриці, наприклад В-ВКМ, графіт-вуглецевий, графіт-графітний матеріал.

В-ВКМ містять вуглецевого наповнювача у вигляді дискретних волокон, безперервних ниток або джгутів, повсті, стрічок, тканин з плоским і об'ємним плетінням, об'ємних структур. Волокна розташовують хаотично, одно-, двух- і трьохнаправлено. Використовують UV нізкомодульні, високомодульні і високоміцні, отримані з віскозних, поліакрилонітрильних волокон і кам'яновугільного пеку.

Як матриця служать піролітичний вуглець, кам'яновугільний пек і полімери, що коксуються, які в процесі, - термодеструкції не розм'якшуються і дають більше 50 % коксу. Найчастіше застосовують фенолові смоли (вихід коксу 54-60 %), але відоме застосування поліїмідів (63-74 %), кремнійорганічних смол (84-87 %), продуктів конденсації фенолу і нафтенів з формальдегідом (70 %), олігобензімідазолов (73,9 %), фурфурілових смол і інших полімерів. Чим більше вихід і міцність коксу, а також міцність його зчеплення з наповнювачем, тим вище якість В-ВКМ.

Особливістю В-ВКМ є відносно висока пористість вуглецевої матриці, а також її пересеченість тріщинами в напрямі, перпендикулярному до наповнювача. Тріщини в матриці виникають при охолодженні виробу від температури отримання (3300К) до кімнатної, унаслідок високої термічної напруги. Для усунення пористості операцію просочення - карбонізує з подальшою графітацією операцією просочення піроуглеродом повторюють кілька разів.

Багатократне просочення покращує механічні властивості і стійкість до окислювання В-ВКМ.

Властивості В-ВКМ змінюються в широкому діапазоні, оскільки вони визначаються багатьма чинниками (табл. 1.4.): властивостями початкового волокна і природою що пов'язує, ступенем наповнення, властивостями коксу і міцністю його зв'язку з волокном, умовами просочення, затвердіння, карбонізує, графітації, числом циклів просочення-карбонізувати, умовами газофазового осадження піроуглерода і ін.

Ефективність наповнення В-ВКМ визначається не тільки реалізацією прочностних і інших властивостей армуючого наповнювача, але і впливом його на механізм руйнування матриці, посилення опору матриці зростанню тріщин.

Таблиця 1.4

#### Механічні властивості вуглецевих волокон

Марка	Щільність $\rho \cdot 10^{-3}$ , кг·м <sup>3</sup>	Діаметр d, мкм	Модуль пружності, Е	Середня міцність на базі 10 мм, $\sigma$	Гранична деформація $\delta$ , %
			ГПа		
ВМН-3	1,71	7,0	250	1,43	0,6
ВМН-4	1,71	6,0	270	2,21	0,8
ВЭН-210	-	9,9	343	1,47	0,4
Кулон	1,90	-	400-600	2,0	0,4
ЛУ-2	-	-	230	2,0-2,5	1,0
ЛУ-3	1,70	-	250	2,5-3,0	1,1
ЛУ-4	-	-	250	3,0-3,5	1,3
Урал-15	1,5-1,6	-	70-80	1,5-1,7	2,1
Урал-24	1,7-1,8	-	150-200	1,7-2,0	1,1



Элур	1,6	-	150	2,0	1,3
Торнел-300	1,77	-	238	3,15	1,3
Торнел-500	-	7,0	245	3,78	1,5
Торнел-700	1,80	-	245	4,20	1,7
Торнел-800	-	6,0	273	5,46	2,0
Магнаміт AS-3	-	8,0	190	2,70	1,4
Карболон-1	1,95	6,0	380	2,42	0,6
Бесфайт НМ-4	-	6,4	450	1,30	0,35
Торейка Т-300	1,76	8,4	235	3,53	1,5
Торейка Т-700	1,80	-	260	5,10	2,0
Торейка Т-800	1,80	-	300	5,59	1,9
Графіл-А	1,76	-	192	2,55	1,3
Графіл-НМС	1,88	-	365-400	2,0	0,5-0,7
Графіл-НТС	1,77	8,0	240	2,5-2,9	1,0
Модмор-1	2,0	7,8	400-450	1,7-2,5	0,5
Модмор-11	1,8	8,1	270	2,8	0,8-1,0

Верхня межа оптимального наповнення В-ВКМ нижче відповідного рівня для вуглепластиків унаслідок вищої жорсткості вуглецевої матриці (6000...8000 МПа), а також повної відсутності релаксації напруги при температурах нижче 1773...2073 К.

Міцність карбонізованого В-ВКМ на тому, що будь-якому пов'язує пропорційна щільності  $\rho$ , як правило, нижче за міцність початкового вуглепластика, оскільки та, що карбонізує супроводиться усадкою і збільшенням пористості. Графітація карбонізованого вуглепластика підвищує його міцність.

Однонаправлені В-ВКМ мають міцність, що наближається до міцності стали. Сдвігові характеристики таких матеріалів підвищуються при укладанні волокон під кутом від  $+10^\circ$  до  $\pm 20^\circ$ . Максимальна міцність на межслойний зрушення

досягається при тривимірному армуванні. Міцність таких В-ВКМ наближається до міцності алюмінію.

В-ВКМ володіють підвищеною міцністю при високих температурах, але схильні до розтріскування при ударних навантаженнях і великій термічній напрузі. Заповнення пір карбонізованого КМ пластичною феноловою смолою під тиском, тобто отримання матеріалу з біматрицею, забезпечує підвищення його пластичності і пониження теплопровідності.

В-ВКМ мають високу анізотропію теплового розширення. Уздовж волокон теплове розширення матеріалу визначається головним чином тепловим розширенням волокна, а в напрямі, перпендикулярному до орієнтації волокна, - тепловим розширенням того, що пов'язує. Найбільш близьким до волокна по величині теплового розширення є піроуглерод. Композиції на основі смол і пека є напруженими із-за різниці коефіцієнтів термічного розширення компонентів. Коефіцієнт термічного розширення В-ВКМ з безперервними волокнами росте із збільшенням кута між напрямом вимірювання і орієнтацією волокон від негативних значень, характерних для високоорієнтованих вуглецевих матеріалів.

До унікальних властивостей В-ВКМ відноситься висока температуростійкість в інертних і відновних середовищах. По здатності зберігати форму і рівень фізико-механических властивостей в цих середовищах В-ВКМ перевершують відомі конструкційні матеріали. Деякі В-ВКМ, особливо отримані такою, що карбонізує вуглепластика на основі органічних полімерів, характеризуються збільшенням міцності з підвищенням температури експлуатації від 293 до 3000 К. При температурах вище 3273 К В-ВКМ працездатні протягом короткого часу, оскільки в інтервалі 3273-3873 К при тиску нижче 10 МПа починається інтенсивна сублімація графіту. Чим досконало кристалічна структура графіту, тим при вищій температурі і з меншою швидкістю відбуваються термодеструктивні процеси.

Проте властивості В-ВКМ різко змінюються на повітрі при тривалій дії щодо невисоких температур. Так, при 673...923 К в повітряному середовищі відбувається окислення В-ВКМ і, як наслідок, швидке зниження міцності в результаті наростання пористості. Окислення матриці випереджає окислення УВ, якщо останні мають досконалішу структуру вуглецю.

Швидкість окислення В-ВКМ знижується з підвищенням температури їх отримання і зменшенням числа дефектів. Так, унаслідок освіти при тій, що карбонізує менш дефектної матриці стійкість до окислення В-ВКМ на основі кремнійорганічних смол, особливо у разі легування бором, вище, в порівнянні з В-ВКМ на основі фенолоформальдегідної смоли.

Наявність домішок металів, особливо Fe, Ni, Co прискорює окислення матриці. Стійкість В-ВКМ до окислення в цьому випадку може бути значно підвищена шляхом введення до складу В-ВКМ фосфорного ангідриду, який при високих температурах взаємодіятиме з іонами металів.

Ефективно запобігає окисленню виробів з В-ВКМ просочення їх кремнійорганічними з'єднаннями, які змінюють механізм окислення зважаючи на освіту карбиду і оксиду кремнію. Для запобігання або уповільнення окислення В-ВКМ на готові вироби наносять захисні покриття, як які використовують пірографіт, розплав скломаси, сплав карбиду кремнію і оксиду алюмінію, борид цирконію, дісиліцид гафнію або цирконію, карбід бору або цирконію і ін.

Істотно підвищується стійкість до окислення В-ВКМ при армуванні УВ із захисним покриттям з карбиду кремнію. Це покриття, нанесене на кожне волокно, оберігає від руйнування межу контакту наповнювача і матриці і знижує швидкість окислення матеріалу при 773 К в 3-5 разів, при 1773...1973 К і окисленні в дифузійному режимі - більш ніж в 10 разів. Проте в зоні температури плавлення рідких евтектик карбід металу - вуглець віднесення вуглецю може зрости, оскільки швидкість його

випаровування з вільної поверхні рідкої евтектики може бути вище за швидкість випаровування вуглецю з чистого графіту.

Крім того, при великих потужностях гальмування (авіація, швидкісні поїзди) для цих матеріалів характерне посилення вібраційних процесів при гальмуванні, боротьба з якими ускладнює конструкцію гальмівної системи (рис. 1.7).

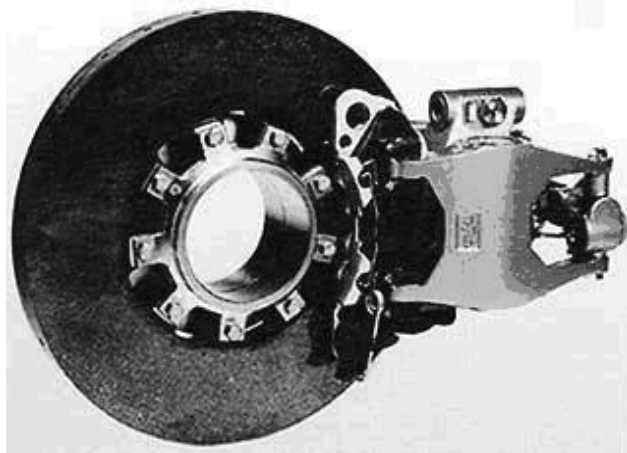


Рис. 1.7. Конструкція гальмівної системи для зниження вібраційних процесів

Серед сучасних фрикційних матеріалів останнього покоління, які потенційно можуть бути використані у високонавантажених системах гальмування, особливе місце займають композиційні матеріали (КМ) з вуглецевою (вуглець-вуглецеві КМ - В-ВКМ) і керамічною (керамічні КМ - ККМ) матрицею, армованою вуглецевими і іншими типами волокон. Можна відзначити наступні

переваги систем гальмування на основі В-ВКМ і ККМ в порівнянні з системами на основі традиційних фрикційних матеріалів, перш за все, металевих і металокерамічних:

- відносно мала щільність, що дозволяє зменшити вагу систем гальмування (приблизно на 40...60%);

- висока стійкість до зношування в різних атмосферних умовах, що дозволяє істотно збільшити кількість гальмувань до ремонту;

- здатність поглинати при гальмуванні велику кількість кінетичної енергії шляхом перетворення її в теплову. При цьому елементи гальмівних пристроїв працюють без пошкодження;

- висока стійкість до термічного удару;

- висока температура експлуатації, що допускається, - більше 1273 К.

Отримувані матеріали мають високий коефіцієнт тертя, особливо при підвищених температурах (0,7...0,8 при температурах понад 673...873 К) і характеризуються невисокою його чутливістю від питомого контактного тиску на поверхні фрикційної пари тертя, швидкості руху транспортного засобу, вологості повітря, а також вони малощумні при експлуатації. Крім того, для В-ВКМ характерна відсутність такого явища як «схоплювання» гальмівних дисків, яке характерне для металокерамічних матеріалів, виникає унаслідок локального розплавлення металевої матриці і обертання колеса, що приводить до повного або часткового зменшення швидкості.

Як і вуглець-вуглецеві фрикційні матеріали, композити з керамічною матрицею застосовуються для підвищення ефективності гальмування, особливо для високошвидкісних і високонавантажених транспортних засобів, коли температура на поверхні пари тертя може досягати 1273...1473 К. Керамічні матеріали, використовувані для фрикційних пар тертя, розділяються на армованих різного типу волокнами або віськерамі, і неармовані (горячепресовання, реакційноспечення).

Основні проблеми матеріалів на основі кераміки пов'язані з їх низькою стійкістю до механічних і теплових ударних навантажень. Ця обставина багато в чому обмежує сферу застосування неармованої кераміки, особливо коли виникає ситуація з екстремним гальмуванням транспортного засобу, різким виділенням великої кількості теплової енергії, що супроводиться.

У вузлах тертя останніми роками найбільше застосування знайшли фрикційні ККМ з вуглецевим армуючим наповнювачем (рубані волокна, тканини, стрічки, мати) і керамічною матрицею на основі карбїду кремнію, отримуваного методом просочення розплавом кремнієм вуглець-вуглецеві заготовки (LSI-процесс).

У автомобільній промисловості гальмівні диски з вуглець-вуглецевих матеріалів, не дивлячись на хороші трибологічні характеристики і високу термостійкість, не знайшли широкого застосування, за винятком спортивних автомобілів (Формула-1 і ін.). Головними причинами відсутності широкого застосування є: висока трудомісткість і вартість виготовлення якісних дисків з В-ВКМ, низький коефіцієнт тертя при негативних і невисоких (до 673 К) температурах матеріалу диска, підвищений знос при температурах понад 873 К унаслідок окислення вуглецю диска, вібраційні процеси при гальмуванні.

У Росії розробкою фрикційних ККМ з SiC матрицею і гальмівних дисків на їх основі для наземного і, перш за все автомобільного транспорту займається ТОВ «НПФ «Кераком» (Санкт-Петербург). Як базовий технологічний процес на підприємстві розвивається модифікація процесу жидкофазного силіцировання (LSI-процес), в якому як заготовка використовується вуглепластик, що карбонізує. Загальний вид дослідного зразка системи гальмування легкового автомобіля з диском з ККМ з карбідокремнієвої матрицею (діаметр диска 260 мм) приведений на рис. 1.8.



Рис. 1.8. Гальмівний диск з

Найбільшими світовими виробниками гальмівних дисків для авіаційної і авіакосмічної техніки з вуглець-вуглецевих матеріалів є Honeywell (США), Carbone Lorreaine (Франція), Korea Aerospace Industry, Ltd (Корея) і ряд інших. З російських компаній, гальмівних дисків, що займалися розробкою, з В-ВКМ, виділимо ВАТ НВО «Композит» (В-ВКМ «АРГОЛОН») і ФГУП «Нііграфіт» (В-ВКМ ТЕРМАР). Гальмівні пристрої з монодисками з вуглець-вуглецевого матеріалу застосовуються на російських літаках - Іл96, Ту204, Ту214,

Ty160, An124; на літаках виробництва США - B767, B777, F-15, F-16, F22, B-32; Євросоюзу - A330/340 і ряду інших.

Є інформація про широке застосування композиційних матеріалів з керамічною матрицею в конструкції нового космічного човнака (space glider) X-38, у тому числі і як фрикційні матеріали в гальмівних системах.

#### 1.4. Умови роботи фрикційних вузлів гальма і навантаження, що діють на них

Інтенсивний розвиток техніки, зростання ваги і швидкостей машин (особливо транспортних) викликали необхідність застосування особливо форсованих режимів роботи гальмівних пристроїв.

До найбільш навантаженим відносяться гальма коліс літаків (табл. 1.5). Наприклад, на сучасних літаках гальмування відбувається протягом 15...40 с, а початкові швидкості ковзання фрикційної пари можуть перевищувати 30 м/с. У цих умовах деякі гальмівні пристрої літаків повинні поглинути кінетичну енергію, рівну  $20...30 \cdot 10^6$  Дж. Максимальна потужність, що розвивається гальмами коліс одного з пасажирських літаків з турбореактивними двигунами, приблизно 12 500 к. с.

Таблиця 1.5

#### Нагруженість гальмівних механізмів

Основні дані, що характеризують напруженість гальм машин				
Машина	Гальмо	Фрикційні матеріали	Кінетична енергія, що поглинається одним гальмом, Дж	Температура (поверхнева) у фрикційній парі в °С
Літак	Колодка	Асбокаучукова композиція - метал	$1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$	до 400
	Камерний	Асбосмоляна композиція -	$5 \cdot 10^5 -$	до 500

		чавун	$1,5 \cdot 10^7$	
	Дисковий	Металокераміка - чавун	$1 \cdot 10^6$ — $2,5 \cdot 10^7$	до 800
Пересувний склад железнодорожного транспорту	Колодка	Чавун - сталь	$5 \cdot 10^6$	до 500
	Дисковий	Асбосмоляна композиція- сталь		
Автомобіль (вантажний і легковий)	Колодка	Асбокаучукова композиція - метал	$1 \cdot 10^6$	150-400
		Асбокаучукова композиція - метал		
	Дисковий	Металокераміка - метал	$5 \cdot 10^6$	800
Бурові лебідки	Стрічковий	Асбокаучукова (асбосмоляна) композиція - метал	$4 \cdot 10^9$	600
Крокуючий екскаватор	Стрічковий	Асбокаучукова композиція - чавун	$3 \cdot 10^6$	400
Гусеничний трактор	Стрічковий	Асбокаучукова композиція - метал	$1 \cdot 10^5$	300
	Дисковий	Металокераміка - сталь		

При цьому за одну посадку гальма цього літака виділяють до 16 250 ккал тепла, а температура в зоні тертя досягне  $1000 \dots 1200^\circ\text{C}$ . У деяких гальмах об'ємна температура може підвищуватися до  $200 \dots 600^\circ\text{C}$ .

У багатьох машинах енергонагруженість гальмівних пристроїв визначається величиною кінетичної енергії, що доводиться на одиницю маси гальмівного вузла. Іноді



для характеристики ефективності використання будівельного об'єму застосовують термін питома енергоємність колеса, тобто відношення величини кінетичної енергії до фактичного будівельного об'єму гальмівного колеса.

Застосування і вдосконалення систем автоматичного гальмування (двохсигнальні системи, системи з програмним регулюванням) значно підвищують ефективність гальмування і у зв'язку з цим викликають додаткове теплове навантаження на гальма.

У дисковому гальмі з фрикційною парою сталь 65Г і металокераміка, що працює в середовищі мастила, швидкість ковзання змінюється від 75 м/с до нуля, а питома тиск досягає 500 Дж/см<sup>2</sup> і більш.

Тривале або часте інтенсивне включення гальм автомобіля підвищує температуру в них до 300...600°C. Температура обода лебідки при спуску бурового інструменту (через 2...3 ч після початку спуску) досягає 600°C. На поверхні тертя фрикційного матеріалу гальмівних пристроїв лебідок крокуючого екскаватора температура підвищується до 320...400°C.

Дані, приведені в табл. 1.5, показують, що для кожного типу машини часто застосовують гальма, що різко відрізняються один від одного величиною кінетичної енергії, що поглинається, і температурою. Це пов'язано з тим, що машини одного і того ж типу (наприклад, транспортні машини) можуть мати різну вантажопідйомність, швидкість включення гальм і інші параметри.

Природно, що і напруженість, а також тепловий режим таких гальм для одного і того ж типу машини можуть бути різко відмінними. Тому доцільно проводити розмежування гальмівних пристроїв по їх напруженості і, особливо, температурним умовам роботи.

Фрикційні вузли гальмівних пристроїв розділяють на три групи по напруженості і величині об'ємної температури:

- *перша* - легкі умови роботи (короткочасна об'ємна температура до 200°C; тривала - до 120°C; тиск- до 80 Дж/см<sup>2</sup>);

- *друга* - середні умови роботи (короткочасна об'ємна температура до 400°C, тривала -до 250°C; тиск до 150 Дж/см<sup>2</sup>);

- *третья*- важкі умови роботи (короткочасна об'ємна температура до 600°C; тривала - до 150°C; тиск - до 600 Дж/см<sup>2</sup>).

Таблиця 1.6

Сфери застосування пар тертя гальмівних пристроїв

Умови роботи	Матеріали пар тертя	Допустимий тиск, МПа	Температура пари тертя, °C		Коефіцієнт тертя
			поверхнев а	об'ємна максималь на	
Вельми легкі і легкі без змазування	Асбокаучукові, спечені матеріали на основі міді і алюмінію, природні полімери (шкіра, модифікована деревина) в парі із сталлю	0,8	60...200	120	0,3...0,35
Середні без змазування	Асбополімерні композиції з тим, що комбінованим пов'язує, порошкові матеріали на основі міді і заліза в парі із сталлю і чавуном	1,5	Не більш 400	250	0,25...0,28
Важкі без змазування	Порошкові матеріали на залізній основі, композиційні матеріали, углеродисті, а також асбополімерні в парі із сталлю і чавуном	6	Не більш 1200	600	0,22...0,25

По величині температури робочих поверхневих шарів фрикційних елементів гальмівні пристрої можна розділити на п'ять груп:

- 1) з вельми легким режимом роботи - до 100°C;
- 2) з легким - до 250°C;
- 3) з середнім - до 600...700°C;
- 4) з тяжким - до 1000°C;
- 5) надважким - більш 1000°C.

Приведену класифікацію доцільно застосовувати при проектуванні нових гальм і підборі матеріалів для них, причому цю класифікацію слід застосовувати у кожній галузі машинобудування.

Наприклад, вимоги до фрикційних вузлів і гальма в цілому для автотранспорту не можуть бути єдиними, оскільки є автомобілі, де поверхнева температура деталей гальма не перевищує 100...150°C. У інших же вона досягає 900...1000°C. Для згаданих машин застосовують різні типи фрикційних матеріалів; крім того, може бути різною і методика випробувань цих матеріалів. Сфери застосування пар тертя гальмівних пристроїв, що рекомендуються, приведені в табл. 1.6.

#### 1.5. Вимоги до фрикційних матеріалів

Показники якості гальмівних пристроїв визначаються в основному конструктивного виконання вузла тертя і оптимального поєднання матеріалів фрикційному пари. Для забезпечення стабільності гальмівного моменту, підвищення надійності і зносостійкості елементів гальма застосовують спеціальні матеріали з підвищеними фрикційними властивостями (фрикційні накладки) у

контакті з металевим контртілом. Фрикційні накладки виготовляють з шкіри, пробки, модифікованої деревини, металів, асбополімерних композицій, порошкових матеріалів. Вони є бистроїзнашиваючимися елементами в порівнянні з металевим контртілом і тому мають бути достатньо дешевими, а фрикційний вузол повинен мати таку конструкцію, при якій забезпечується швидка зміна зношених накладок.

При виборі матеріалів пари тертя рекомендується враховувати вид контакту її елементів, значення коефіцієнта взаємного перекриття ( $K_{вз}$ ), вимоги до контактної жорсткості вузла тертя, вид охолодження, наявність або відсутність змащувального матеріалу, показники якості по ГОСТ 15467-79.

Фрикційні матеріали повинні мати стабільний коефіцієнт тертя, задані механічні і теплофізичні властивості, добре прироблятися до контртіла (при першому гальмуванні  $M_T \geq 0,8 M_{T. \text{ расч.}}$ ), мають бути технологічними, корозійно-стійкими, володіти достатньою механічною міцністю, масло-, волого- і вогнестійкістю, високою зносостійкістю, низькою схильністю до схоплювання в гарячому і холодному стані.

Верхню і нижню межі коефіцієнта тертя задають залежно від конструкції, призначення і умов експлуатації гальмівного пристрою. Нижню межу коефіцієнта тертя визначає умова забезпечення заданого гальмівного моменту, а верхній - збереження стійкості руху транспортної спорідненості при максимально допустимих уповільненнях. Значення коефіцієнта тертя вище розрахункових можуть з'явитися причиною юза ходових коліс транспортного засобу, їх підвищеного зносу, втрати керованості. Значення коефіцієнта тертя, що рекомендуються, для гальмівних пристроїв автотранспортних засобів складають 0,35, підйомно-транспортних машин - 0,35...0,45, літаків - 0,25...0,5.

Зносостійкість визначає термін служби фрикційних накладок, міжремонтні пробіги машин п час ремонтних простоїв. Оцінюють її виходячи з типу гальма, умов експлуатації і якості фрикційного матеріалу. Так, термін служби накладок гальмівних пристроїв автомобілів повинен складати 50...100 тис. км. пробігу.

Теплофізичні властивості пари тертя гальма визначаються в основному теплоємністю і теплопровідністю матеріалів. Теплоємність сприяє зниженню температури пари тертя за рахунок поглинання теплоти, а теплопровідність - за рахунок перенесення теплоти від поверхні тертя в глиб матеріалу і далі до поверхні охолодження.

Механічні властивості є важливими показниками матеріалів. Фрикційна пара гальма працює в умовах складного напруженого стану. Напряга стискування фрикційної накладки приблизно дорівнює нормальному тиску  $P$ . Сила тертя при гальмуванні викликає в накладці розтягуюча напряга і напряга зрізу. Напряга зрізу орієнтування дорівнює твору коефіцієнта тертя на нормальний тиск  $f_p$ . При терті фрикційних матеріалів в області підвищених температур їх твердість пропорційна площі фактичного контакту поверхонь, що труться, і визначається тиском на плямі фактичного торкання. Модуль пружності фрикційного матеріалу при пружному контакті (легко навантажені гальма з об'ємною температурою до  $100^{\circ}\text{C}$ ) впливає на характер фрикційної взаємодії і визначає фактичні площа контакту і тиск на плямах контакту.

Фрикційний матеріал повинен мати мінімальні теплове розширення, усадку і високий модуль пружності, оскільки при жорсткому кріпленні накладки до металевого каркаса унаслідок теплового розширення і усадки фрикційного матеріалу може виникати значна температурна і усадкова напряга в накладці.

Процес накладення фрикційної накладки на контртіло характеризується ударним додатком навантаження, тому фрикційний матеріал повинен володіти високою ударною в'язкістю. При повторно-короткочасному режимі гальмування фрикційна накладка випробовує багатократні циклічні навантаження і повинна мати достатній опір втомі при циклічних діях.

Складність підбору фрикційних матеріалів для гальмівних пристроїв полягає в суперечності, як указувалося раніше, головних вимог, що пред'являються до цих

матеріалів: необхідність отримання великих і стабільних коефіцієнтів тертя в процесі експлуатації при збереженні достатньо високої зносостійкості деталей гальма. Здатність пари тертя зберігати стабільне значення коефіцієнта тертя і малий знос в широкому діапазоні температур називається фрикційною теплостійкістю.

Основними теплофізичними характеристиками фрикційних матеріалів є: високі теплопровідність, питома і об'ємна теплоємність; низький коефіцієнт теплового розширення і висока точка плавлення або розм'якшення.

Фрикційні матеріали повинні мати також малий модуль пружності, при якому температурна напруга, викликані градієнтом температури, будуть мінімальною. Мінімальна питома вага матеріалів дозволить понизити вагу конструкції гальмівного пристрою, що особливо важливе для літаків.

Висока теплопровідність необхідна для запобігання виникненню в тонкому поверхневому шарі температури плавлення матеріалу. Якщо поверхневий шар розм'якшиться, то можливе наволочення металу на інший матеріал фрикційної пари і прихоплювання гальм. У зв'язку з цим матеріал повинен володіти і високою точкою плавлення або розм'якшення.

Низький коефіцієнт теплового розширення фрикційного матеріалу зменшує теплову напругу між внутрішньою і зовнішньою поверхнею елемента пари тертя (наприклад, гальмівного барабана, диска).

Висока питома теплоємність дозволяє матеріалу поглинати більшу кількість тепла при мінімальному підвищенні температури, а велика об'ємна теплоємність дозволяє мати мінімальні габарити барабана (диска) при певній питомій вазі матеріалу.

Окрім цього, до фрикційних матеріалів пред'являються вимоги по швидкій прирабативаємісті, корозійній стійкості при змінах температури від 60 до +1500°C, вогнебезпеки, а також технологічні вимоги (можливість обробки на верстатному

устаткуванні, кріплення до сталевого каркаса) і експлуатаційні вимоги (безшумність, масло і водостійкість і ін.).

До матеріалів гальмівних пар, що працюють в тяжких умовах, пред'являються також додаткові вимоги - висока механічна міцність, стійкість проти теплової втоми, відсутність тенденції дряпати поверхню тертя зв'язаної деталі, відсутність явищ схоплювання при роботі, забезпечення плавного гальмування.

Як показали дослідження однією з основних вимог, що пред'являються до фрикційних матеріалів для високонавантажених гальмівних пристроїв, слід рахувати відносну стабільність і рівномірність зміни хімічного і фазового складу, структури і, отже, властивостей поверхневого шару матеріалів в процесі експлуатації.

Жоден чистий метал або який-небудь інший матеріал не задовольняє всім перерахованим вимогам. Тому завдання підбору і створення нових фрикційних матеріалів є складним і вимагає проведення широкого комплексу досліджень.

Вирішальними в терті ковзання є два процеси: коливання контактуючих нерівностей і розм'якшення поверхневого шару під дією температури тертя. Остання переводить зовнішнє тертя у внутрішнє в тонкому, розм'якшеному поверхневому шарі.

Молекулярно-механічна теорія тертя розглядає два види взаємодії поверхонь, що труться: механічне (впровадження) і молекулярне (тяжіння і схоплювання). Одним із загальних положень цієї теорії є принцип підсумовування елементарних сил тертя. При цьому виникає необхідність визначення площ того, що стосується двох твердих тіл і питомих сил тертя, тобто опору, що виникає на одиниці фактичної площі торкання.

Результати експериментальних і теоретичних досліджень показали, що фактична площа торкання утворюється в результаті одночасної деформації як окремих мікро-виступів (шорсткість), так і напівпростору, на якому вони розташовані

(хвилястість). При цьому частина мікро-виступів деформується пластично, інша частина-упруго. Хвилі, на яких розташовані мікро-виступи, деформуються переважно пружно.

Існують три групи зносу:

1. Механічний знос, що включає три види: абразивний, унаслідок пластичної деформації і при крихкому руйнуванні.

2. Молекулярно-механічний - знос при схоплюванні.

3. Корозійно-механічний - корозійний окислювальний знос.

Велика увага в цій класифікації приділяється умовам тертя, що викликають той або інший вигляд зноса. Дія роботи сили тертя вказана на рис. 1.9.

Розглядається як поверхневе руйнування тіл, що труться, під впливом тангенціальних зусиль тертя, що викликають в окремих шаруючи (поблизу ділянок контакту) напругу, що перевищує межу текучості або міцності. Зусилля тертя викликають сколювання, виривання з поверхневого шару твердого тіла найдрібніших частинок з пластичним перебігом матеріалу в зовнішньому шарі, для крихких тіл, без нього.



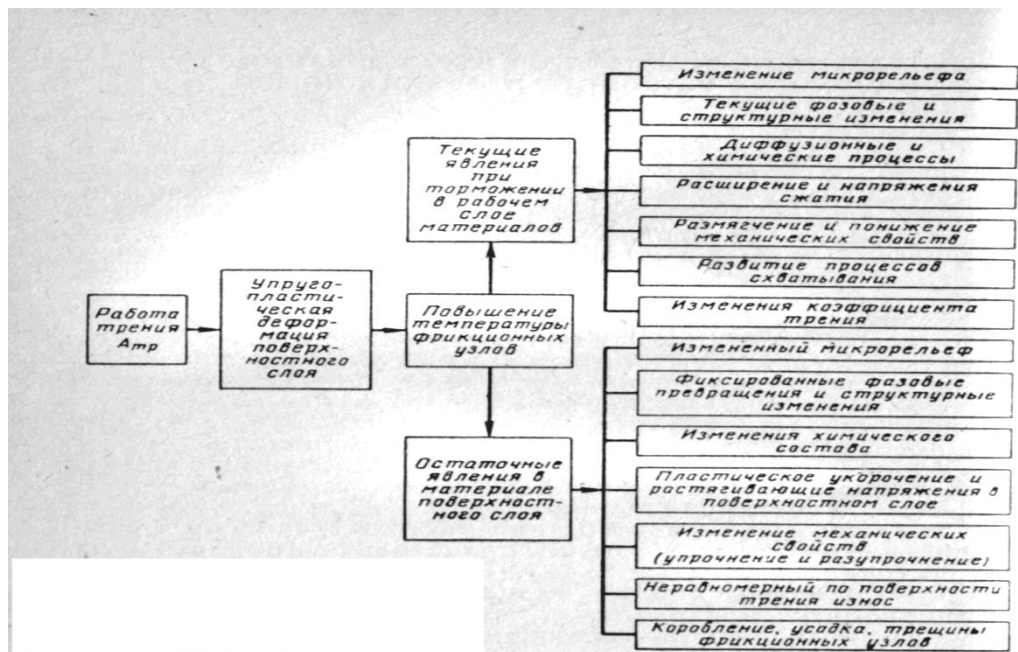


Рис. 1.9. Структурна схема дії роботи тертя на фрикційні матеріали

Таким чином, знос розглядається як явище поверхневого диспергування в результаті багатократної пластичної деформації, зміцнення і втомного руйнування під впливом роботи тертя. Зовнішнє середовище робить значний вплив на вказані явища і величину зносу.

Адсорбційну або адсорбційно-хімічну дію навколишнього середовища інтенсифікують процес, полегшуючи пластичну деформацію і послідовне крихке руйнування металів в поверхневому шарі.

Сухе тертя окислених металевих поверхонь (з погляду фізичної істоти цього процесу) слід розглядати як граничне тертя при мастилi шарами оксидів. Граничне тертя відбувається у всіх випадках, коли тверді поверхні розділені тонкими адсорбційними шарами будь-якого походження.

## 1.6. Висновок до розділу

1. Проведений статистичний аналіз тенденцій розвитку дискових гальмівних систем і перспектив застосування різних видів дисків і нових матеріалів.

2. Проаналізовані нові методи виробництва В-ВКМ і ККМ, які найвигідніше використовувати з погляду економіки, і мають найменший по тривалості технологічний цикл.

3. Проведений огляд і аналіз фізико-хімічних властивостей всіх видів фрикційних матеріалів. Досліджені всі переваги і недоліки В-ВКМ і ККМ.

4. Проаналізовані умови роботи гальмівних систем і навантаження діють на них.

## РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АВТОВОЗНИХ ДИСКОВИХ ГАЛЬМОВИХ ПРИСТРОЇВ

В умовах підвищення швидкостей руху та осевих навантажень барабанні гальмові механізми вичерпують свої можливості через недостатню теплорозсіюючу здатність, схильність до втрати ефективності при нагріванні та нестабільність гальмівного моменту [43]. Основна перешкода для впровадження дискових гальм на середніх та великих автобусах полягає у відсутності ефективних і надійних приводних пристроїв та регуляторів зазору у фрикційних парах. Вирішення цих питань лягло в основу проектування та виготовлення нових дискових гальмових механізмів. Їх лабораторні дослідження мали на меті визначення ефективності гальм в цілому та їх приводних пристроїв зокрема, а також дослідження стабільності характеристик в функції температури, швидкості ковзання та тиску в контактній фрикційній парі. Оцінювалися також масогабаритні характеристики нових дискових гальмових механізмів у порівнянні з традиційними барабанними.

### 2.1. Дисковий гальмовий механізм з клинково - роликівим перетворювачем, розташованим перпендикулярно до гальмового диска

На рис. 2.1 показаний загальний вигляд виготовленого гальмового механізму, який встановлений на інерційному стенді. Фрикційні накладки цих гальмових механізмів сформовані та виготовлені в м. Ярославлі (Росія).

Для імітації на інерційному стенді типових режимів випробувань 0, I і II розраховувалися режими випробувань, виходячи з балансу кінетичної енергії махової маси інерційного стенда та енергії, що поглинається одним гальмовим механізмом

автобуса. Наявність двох редукторів (до і після махової маси) дає можливість відтворювати також необхідну кутову швидкість гальмового барабана чи диска.

Результати імітації на інерційному стенді випробувань 0 показали, що при застосуванні гальмової камери 12<sup>//</sup> і тиску повітря в ній 0,6 МПа досягнутий гальмівний момент склав 9,48 кНм, що становить 91% від розрахункового значення та 94% від необхідного значення моменту для передніх коліс автобуса середнього класу. При цьому фактичне значення затискного зусилля склало 74 кН (при розрахунковому значенні 81 кН). Випробування I і II показали, що залишкова ефективність нагрітого гальма при обох видах випробувань знаходиться в межах нормативних вимог. На мал. 2.2 наведений зразок осцилограми випробувань гальма, а на рис. 2.3 і 2.4 показаний розподіл температур на поверхнях ротора та фланця гальмового диска. Максимального значення температура досягає в середній частині пояса тертя. Маса виготовленого дискового гальма на 30% менша від маси барабанного гальма аналогічного призначення.

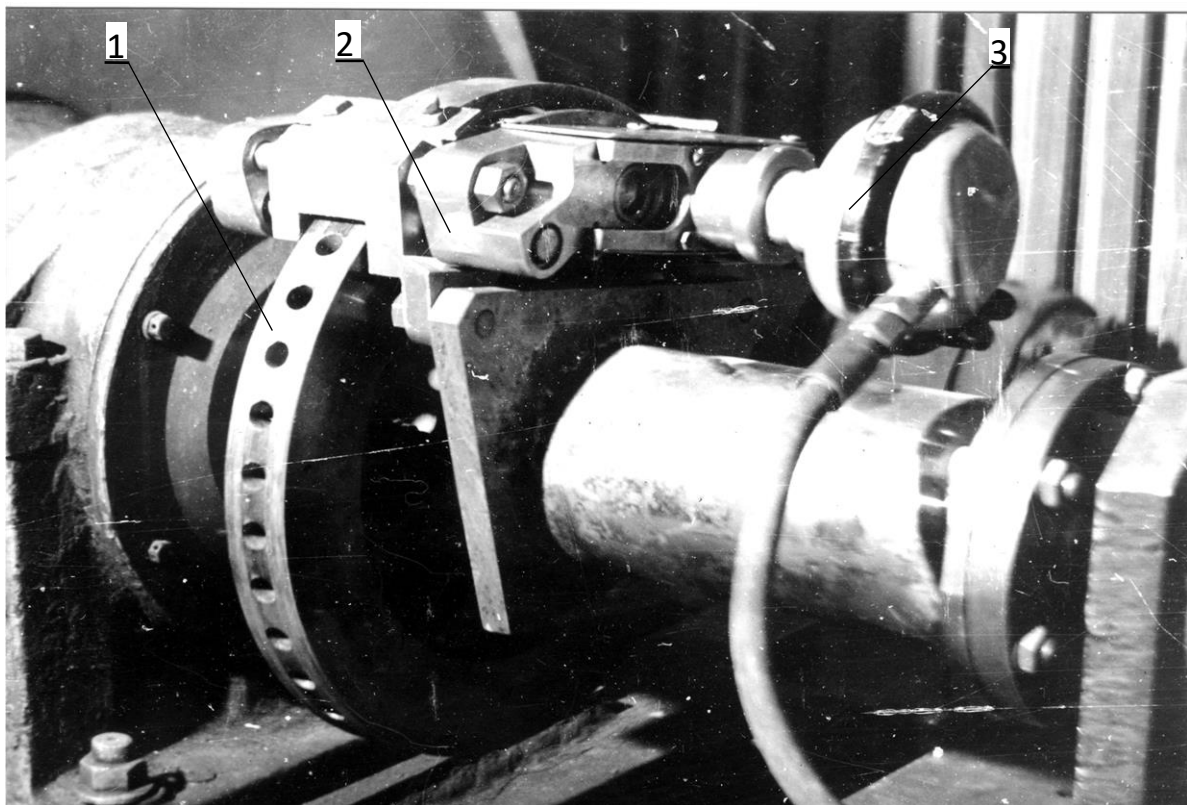
Експериментальними дослідженнями підтверджена працездатність дискового гальма. Із виявлених недоліків слід відмітити підвищений опір тертя в елементах регулятора зазору та недостатню величину створюваного гальмівного моменту з точки зору використання гальм на автобусах великого класу. Для ліквідації першого із названих недоліків був модернізований регулятор зазору, а для збільшення гальмівного моменту був розроблений варіант гальмового механізму з двома клиново-роликівими перетворювачами розташованими перпендикулярно гальмовому диску.

## 2.2. Дисковий гальмовий механізм з силовим приводом у вигляді пневмомотора

На рис. 2.5 показаний загальний вигляд цього гальма, встановленого на інерційному стенді. Для виготовлення гумової тороїдної оболонки була

спроектована та виготовлена спеціальна пресформа, фрагмент якої показаний на рис. 2.6. До її складу входять нижня 1 та верхня 4 плити, матриця 2, вставка 7, циліндричні вкладники 3 і 6 та фігурний пуансон 5. На етапі формування заготовки для тороїдної оболонки 8 замість фігурного 5 використовувався циліндричний пуансон без гофроутворюючих поверхонь, а на другому етапі на місце циліндричного встановлювався фігурний пуансон 5. Через отвір 9 до гумової оболонки підводилось стиснуте повітря, яке формувало гофрований профіль оболонки, після чого здійснювалася її вулканізація.

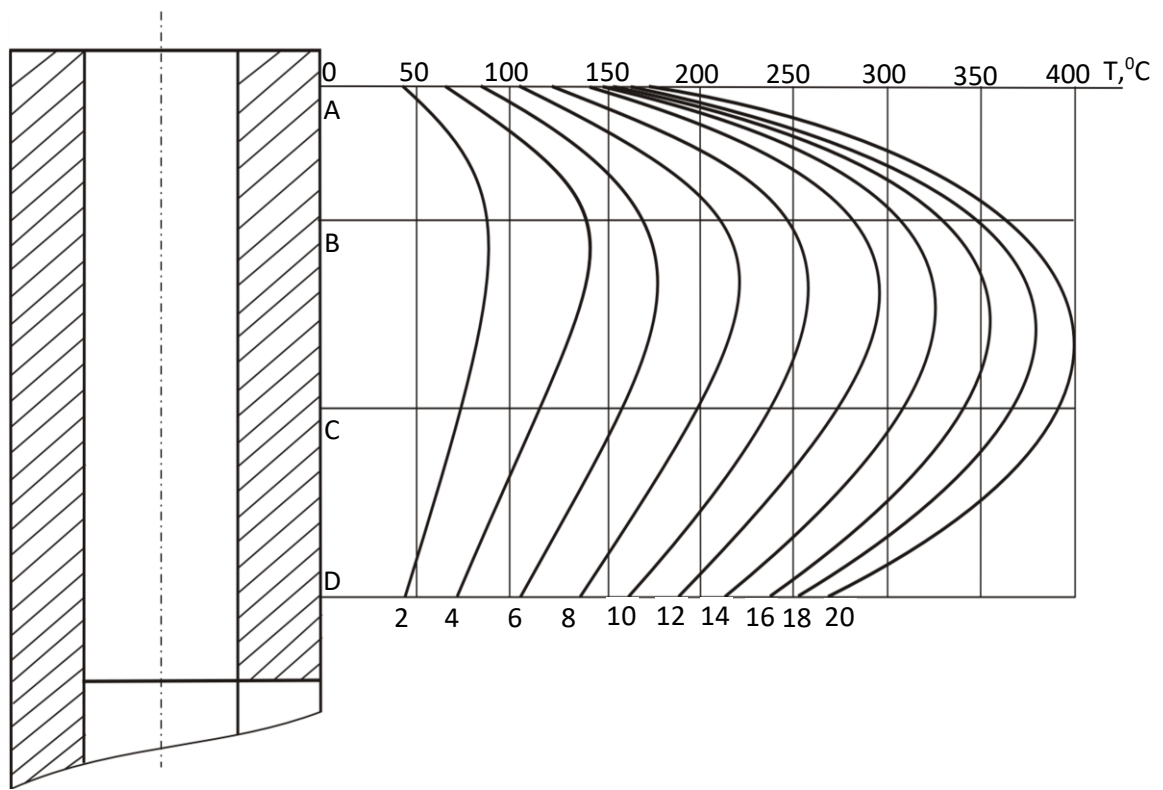
При імітації випробувань  $O$  був досягнутий гальмівний момент  $9,7$  кНм, що складає  $93\%$  від розрахункового значення.



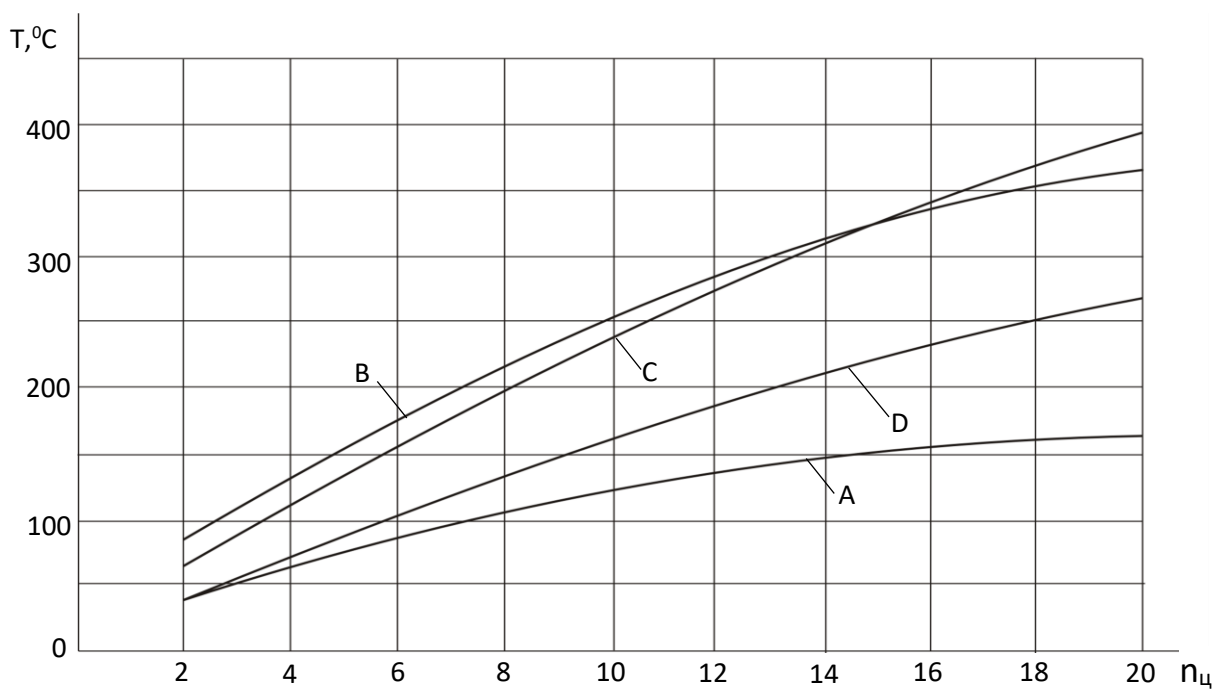
**РИС. 2.1. ЗАГАЛЬНИЙ ВИГЛЯД ВСТАНОВЛЕНОГО НА ІНЕРЦІЙНОМУ СТЕНДІ ДИСКОВОГО ГАЛЬМОВОГО МЕХАНІЗМА З КЛИНОВО-РОЛИКОВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ, РОЗТАШОВАНИМ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ДО ГАЛЬМОВОГО ДИСКА: 1 – ВЕНТИЛЬОВАНИЙ ГАЛЬМОВИЙ ДИСК; 2 – “ПЛАВАЮЧА” СКОБА; 3 – ГАЛЬМОВА КАМЕРА**







**РИС. 2.3. ТЕМПЕРАТУРНІ ПОЛЯ ПОВЕРХОНЬ РОТОРА І ФЛАНЦЯ ГАЛЬМОВОГО ДИСКА ТА ЇХ ЗМІНА В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЦИКЛІВ ГАЛЬМУВАНЬ В ПРОЦЕСІ ПОПЕРЕДНЬОГО ЕТАПУ ВИПРОБУВАНЬ І (ЦИФРИ 2...20 ВІДПОВІДАЮТЬ ПОРЯДКОВИМ НОМЕРАМ ЦИКЛІВ**



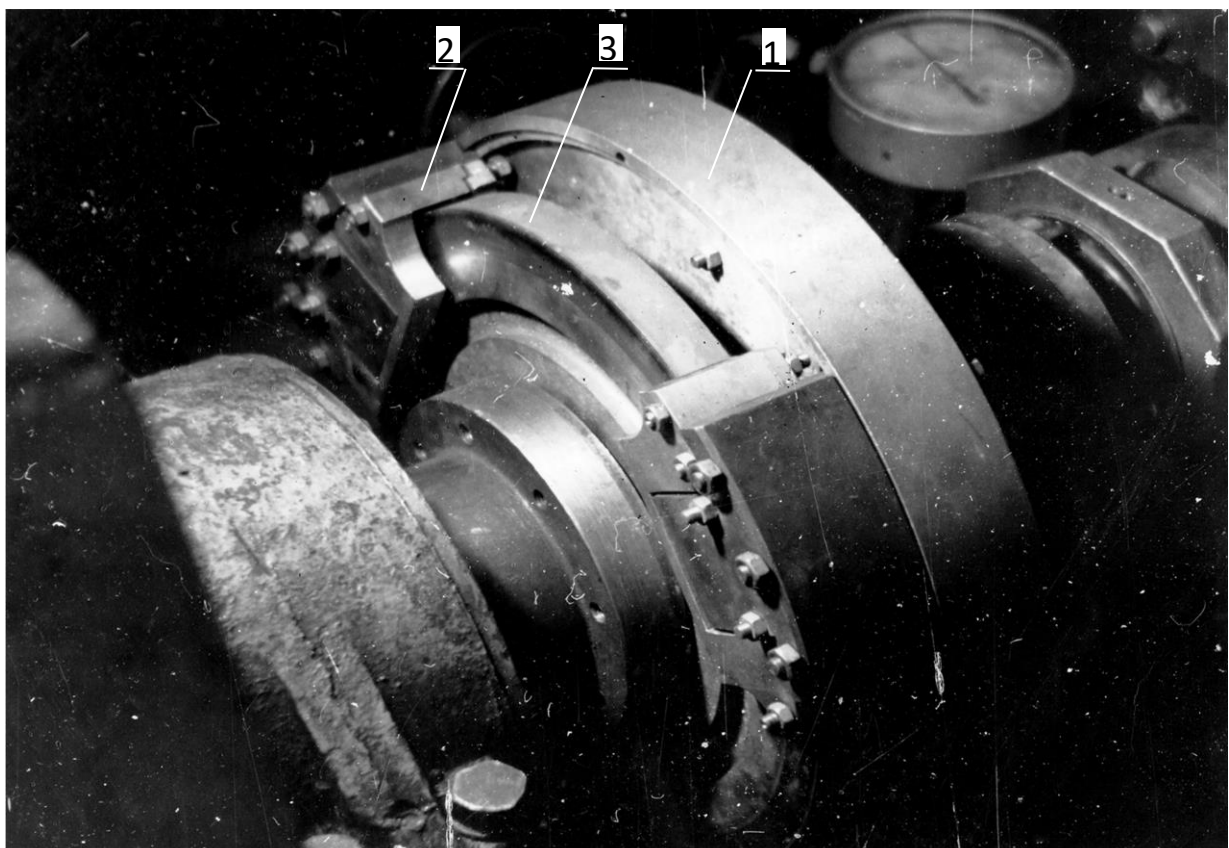
**РИС. 2.4. ЗМІНА ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ РОТОРА ГАЛЬМОВОГО ДИСКА В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ПОРЯДКОВОГО НОМЕРА ЦИКЛУ В ПРОЦЕСІ ПОПЕРЕДНЬОГО ЕТАПУ ВИПРОБУВАНЬ І ДЛЯ КІЛЬЦЕВИХ ПОЯСІВ А...D**

Це пояснюється тим, що в розрахунках не можливо було точно врахувати втрати на тертя між поверхнею гумової оболонки та супорта. Температурні поля та графіки зміни температури поверхонь ротора та фланця в часі наведені на рис. 2.7 і 2.8. Як і при випробуваннях I, максимальне значення температури досягалося в середній частині пояса тертя, яке в кінці попереднього етапу випробувань II склало  $470^{\circ}\text{C}$ . Параметри залишкової ефективності гальмового механізму після випробувань I і II не виходили за межі нормативних значень.

Під час випробування першого варіанта конструкції виявлені такі недоліки як підвищена (на 18%) металоємність у порівнянні з барабанним гальмом аналогічного призначення, великий час спрацювання (1,2 с), недостатня теплоізоляція гумової оболонки. Ці недоліки усунені в другому варіанті конструкції за рахунок введення в конструкцію регулятора зазору, теплоізоляційних штовхачів та придання супорту раціональної форми, що зменшило його металоємність.

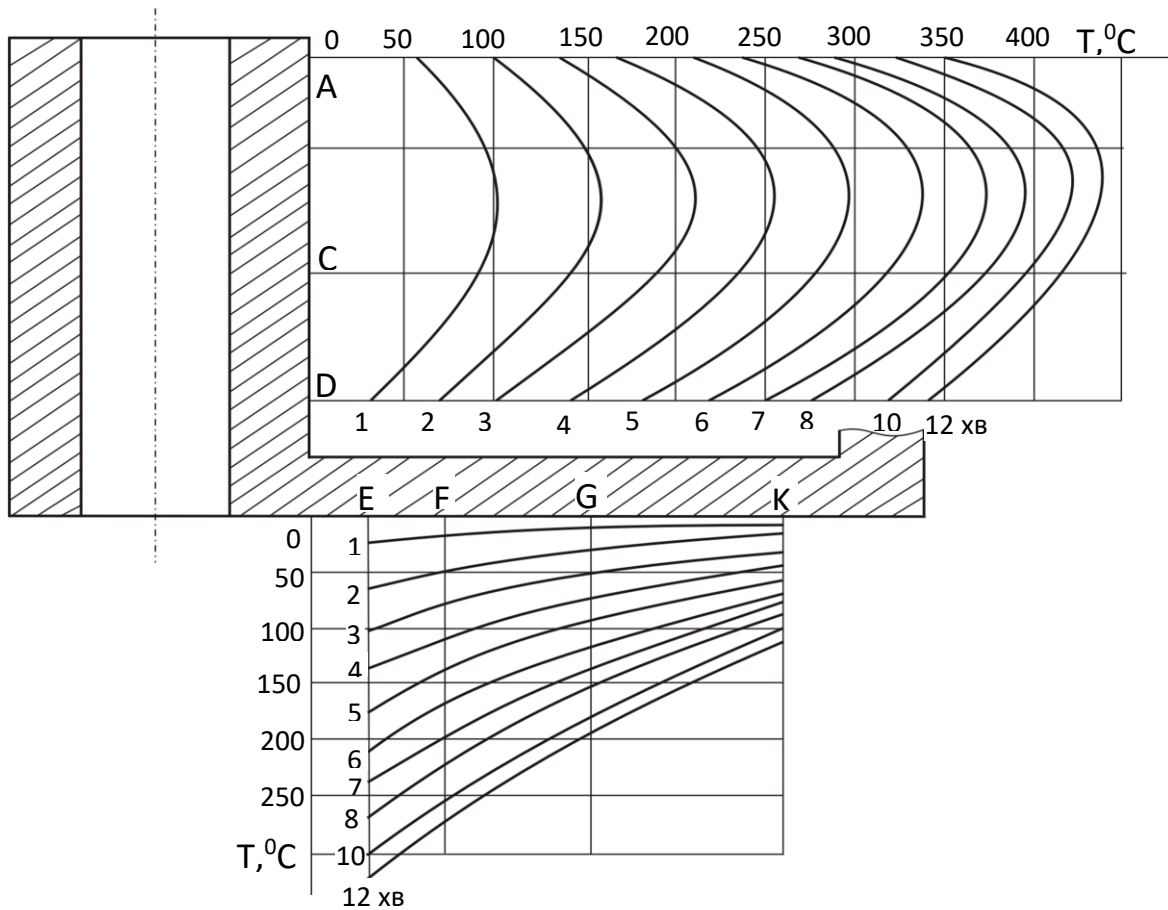
### 2.3. Дисковий гальмовий механізм з гідравлічним приводом

Гальмовий механізм виготовлений з можливістю випробувати два варіанти конструкції – скоби розташовані поряд (рис. 2.9,а) і три скоби розташовані під кутом  $120^{\circ}$  (рис. 2.9,б). При імітації випробувань 0 встановлено [130], що гальмовий механізм забезпечує необхідну ефективність (гальмівний момент досяг значення 9,95 кНм). Тиск в робочих циліндрах скоби створювався за допомогою пневмогідралічного циліндра. Відхилення одержаного графіка від лінійності пояснюється зменшенням коефіцієнта тертя фрикційних пар зі збільшенням тиску в контакті (рис. 2.10 і 2.11). Гальмовий механізм успішно також витримав випробування I (залишкова ефективність 93% при максимальній температурі ротора  $390^{\circ}\text{C}$  і фланця  $260^{\circ}\text{C}$ ) і випробування II (залишкова ефективність 89% при максимальній температурі ротора  $410^{\circ}\text{C}$  і фланця  $300^{\circ}\text{C}$ ). Досліджені температурні поля поверхонь гальмового диска при типових випробувань (для випробування 0 результати наведені на рис. 2.12), а також фрикційні характеристики гальмового механізму.

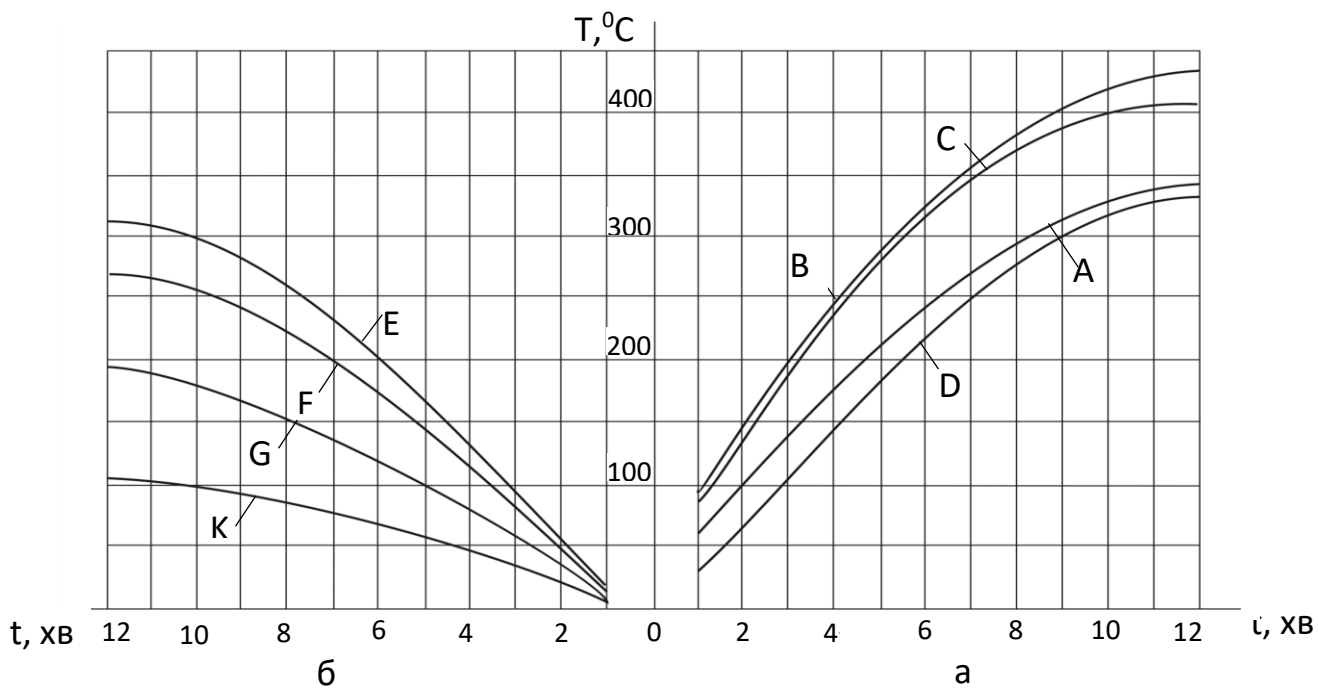








**РИС. 2.7. ТЕМПЕРАТУРНІ ПОЛЯ ПОВЕРХОНЬ РОТОРА І ФЛАНЦЯ ГАЛЬМОВОГО ДИСКА ТА ЇХ ЗМІНА В ЧАСІ В ПРОЦЕСІ ВИПРОБУВАНЬ (ЦИФРИ 1...12 ВІДПОВІДАЮТЬ ХВИЛИНАМ ГАЛЬМУВАННЯ)**



**РИС. 2.8. ЗМІНА В ЧАСІ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ РОТОРА (А) ТА ФЛАНЦЯ (Б)**

При випробуваннях перевага надавалась варіанту конструкції, коли три скоби розташовувалися поряд, оскільки теоретичними дослідженнями встановлено, що в цьому випадку виникають менші дотичні напруження в стику ротора з фланцем. Встановлено, що маса цього гальма на 12% менша від маси барабанного гальма аналогічного призначення.

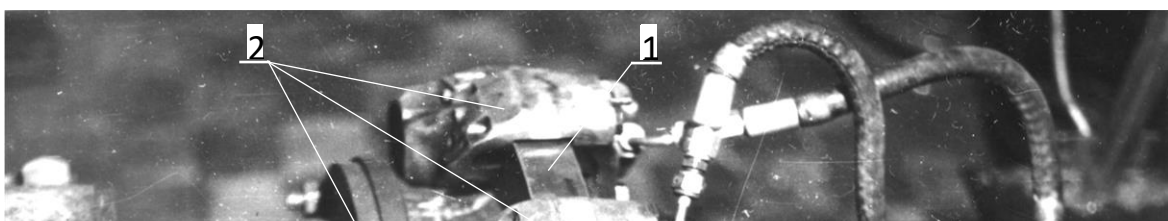
Таким чином, результати проведених досліджень показують, що на автобусах середнього та великого класів можна успішно застосовувати дискові гальмові механізми з гідравлічним приводом, оскільки конструкція таких скоб відпрацьована і не вимагає додаткових механічних перетворювачів. Що ж до використання трьох скоб, то це слід розглядати лише як перехідний варіант перед

проектуванням однієї скоби з необхідним рівнем затискного зусилля та кутом охоплення фрикційних накладок.

#### 2.4. Висновок до розділу

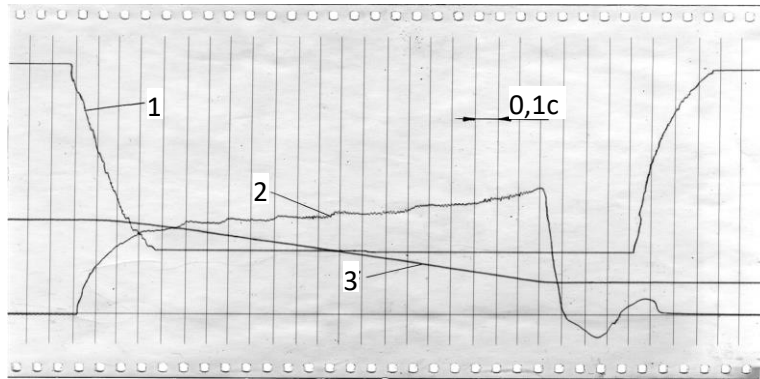
1. Лабораторні та експериментальні дослідження визначили ефективність дискових гальм в цілому та їх приводних пристроїв зокрема, а також дослідили стабільності характеристик в функції температури, швидкості ковзання та тиску в контакті фрикційних пар.

2. Проведення випробувань дали змогу оцінити масогабаритні характеристики нових дискових гальмових механізмів у порівнянні з традиційними барабанними, які встановлювались на автобусах малого та середнього класу.

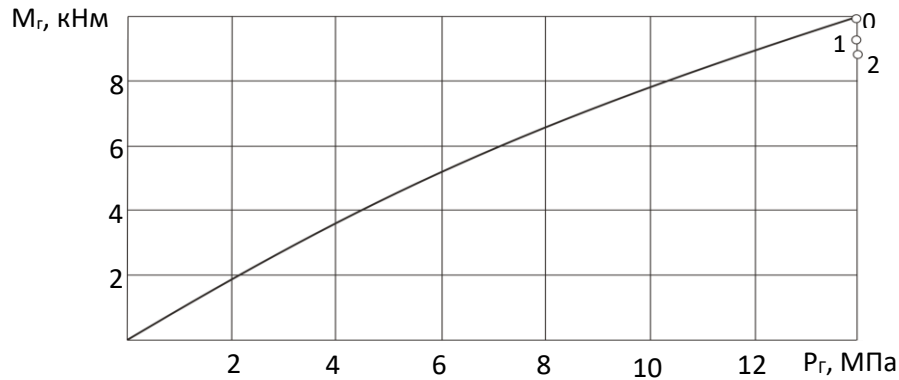




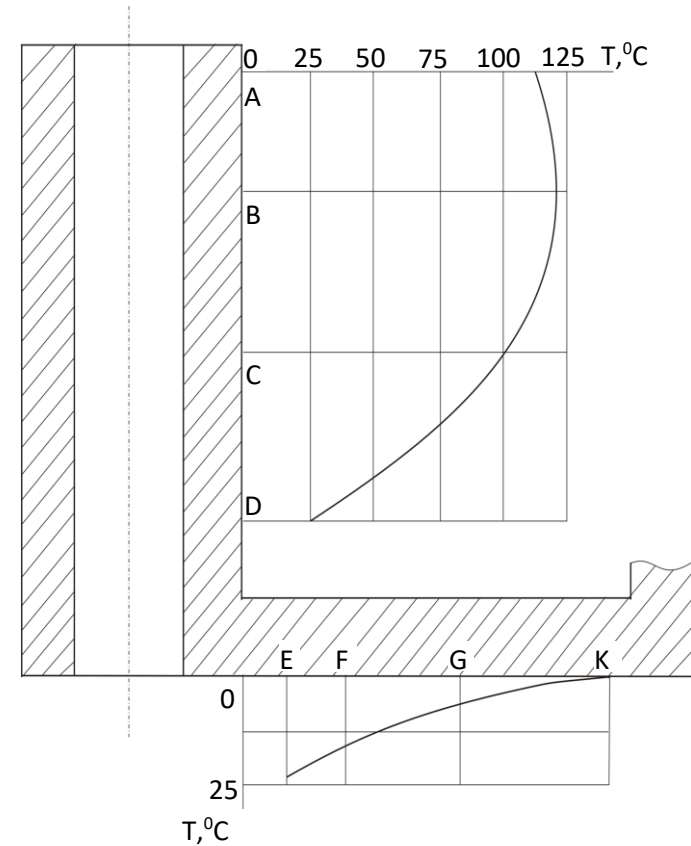




**РИС. 2.10. ЗРАЗОК ОСЦИЛОГРАМИ, ОДЕРЖАНОЇ ПРИ ІМІТАЦІЇ ВИПРОБУВАНЬ “НУЛЬ” ДИСКОВОГО ГАЛЬМОВОГО МЕХАНІЗМУ З ТРЬОМА ГІДРАВЛІЧНИМИ СКОБАМИ: 1 – ТИСК ПОВІТРЯ В КАМЕРІ; 2**



**РИС. 2.11. ЗАЛЕЖНІСТЬ ГАЛЬМІВНОГО МОМЕНТУ ВІД ТИСКУ В ГІДРОЦИЛІНДРАХ ДЛЯ “ХОЛОДНОГО” ГАЛЬМОВОГО МЕХАНІЗМУ (0, 1 І 2 – ЗНАЧЕННЯ ГАЛЬМІВНИХ МОМЕНТІВ, ОДЕРЖАНІ ВІДПОВІДНО В ПРОЦЕСІ ВИПРОБУВАННЯ НА ОСНОВНИХ ЕТАПІВ**



**РИС. 2.12. ТЕМПЕРАТУРНІ ПОЛЯ ПОВЕРХОНЬ РОТОРА І ФЛАНЦЯ ГАЛЬМОВОГО ДИСКА ПІСЛЯ ПРОВЕДЕННЯ**





### РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ДИСКОВИХ ГАЛЬМОВИХ ПРИСТРОЯХ

В умовах підвищення швидкостей руху і осьових навантажень барабанні гальмівні механізми вичерпують свої можливості із-за недостатньої теплорозсіючої здатності, схильності до втрати ефективності при нагріванні і нестабільності гальмівного моменту [47]. Основна проблема дискових гальм полягає у відсутності нових фрикційних матеріалів і дискових механізмів з незалежними трибологічними характеристиками від температурних і погодних умов, стабільністю при тривалих термінах експлуатації гальмівних систем, малозумність процесу гальмування і т. д.

Вирішення цих питань лягло в основу проектування фрикційних В-ВКМ. Їх лабораторні дослідження мали на меті визначення ефективності гальм в цілому, а також дослідження стабільності характеристик у функції температури, швидкості ковзання і тиску в контакті фрикційних пар. Оцінювалися також температурні залежності від часу гальмування в плямі контакту різних видів фрикційних матеріалів.

#### 3.1. Алгоритм розрахунку дискових гальм

У гальмах дискових колодок відношення внутрішнього радіусу доріжки тертя до зовнішнього радіусу  $R_B / R_H \leq 0,7$ , коефіцієнт  $K_{B3} \ll 1$ , причому його вибирають з урахуванням вимоги оптимальності форми елементів пари тертя, що дозволяє забезпечити максимальне використання гальма по потужності при мінімальних габаритних розмірах фрикційної пари.

У гальмах застосовують секторні, круглі і прямокутні накладки.

З урахуванням форми накладок і відстаней їх від осі обертання гальмівний момент визначають:

$$M_T = \frac{fpA_B R_{CP} \alpha}{\beta}, \quad (3.1)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя;

$A_B$  – площа тертя вставки з одного боку;

$\alpha$  – коефіцієнт, залежний від відношення  $R_B / R_H$ ;

$\beta$  – коефіцієнт, залежний від центрального кута  $\varphi_B$ ;

$R_{CP}$  для накладок всіх форм знаходять по формулі:  $R_{CP} = (R_B + R_H) / 2$ ,

де  $R_H$  – зовнішній радіус гальмівного диска,

$R_B$  – внутрішній радіус гальмівного диска.

Закон розподілу тиску  $P$  по поверхні тертя накладки залежить від способу кріплення гальмівної колодки: у тих, що жорстких направляють (рис. 3.1, а) або за допомогою шарніра (рис. 3.1, б). При кріпленні колодки в тих, що жорстких направляють:

$$p = \frac{p_{CP} R_{CP}}{r} \quad \text{– при пропорційності зносу накладки і диска тиску і шляху}$$

тертя;

$$p = \frac{p_{CP} (R_H^2 - R_B^2)}{2r^2 \ln \frac{R_H}{R_B}} \quad \text{– при пропорційності зносу накладки і диска шляху}$$

тертя і твору тиску на швидкість ковзання,

$$\text{де } p_{CP} = N / s; \quad s = \frac{\varphi_B}{2} (R_H^2 - R_B^2); \quad r \text{ – відстань від осі обертання}$$

гальмівного диска до даної точки поверхні тертя.

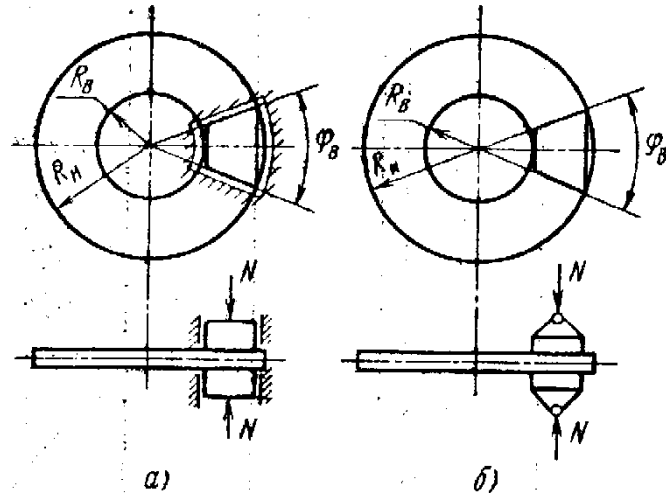


Рис. 3.1. Способи кріплення гальмівних колодок:

*a* – в жерстких направляючих; *б* - за допомогою шарніра

При шарнірному кріпленні колодки закон розподілу тиску по радіусу диска залежить від форми поверхні тертя накладки і зсуву осі шарніра кріплення колодки щодо середнього радіусу поверхні тертя:

для прямокутної накладки (див. рис. 3.2, *a*)

$$p = p_{cp} \frac{2c(x + 2c - 3b)}{9(c - b)^2} \text{ при } x > 3b - 2c; \quad p = 0 \text{ при } x \leq 3b - 2c; \quad (3.2)$$

для секторної накладки (див. рис. 3.2, *б*)

$$p = p_{cp} \frac{R_H + \frac{c}{2}}{R_B + x} \left[ 1 - \frac{3}{c^2} (2b - c)(c - 2x) \right]. \quad (3.3)$$

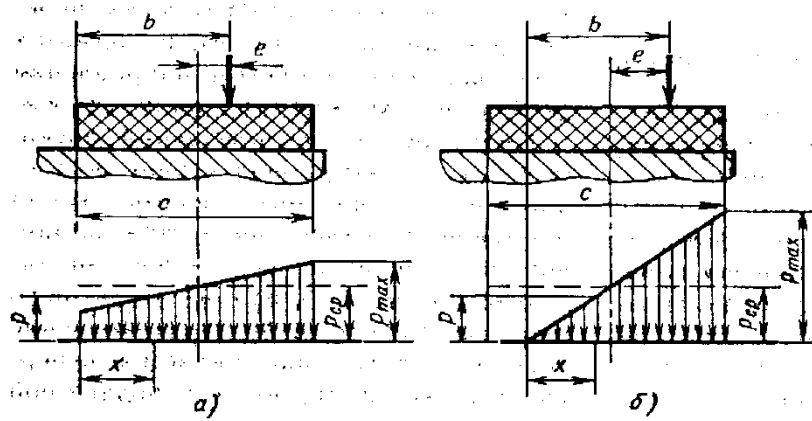


Рис. 3.2. Розподіли тиску уздовж радіусу поверхні тертя при шарнірній установці колодки з накладкою: *a* - прямокутною; *б* - секторною

Для забезпечення рівномірності зношування накладки зміщення осі шарніра кріплення колодки щодо середини накладки повинне складати:

$$\text{для прямокутної накладки: } e = \frac{c}{3} \left( \frac{1 + \frac{R_B}{R_H}}{1 - \frac{R_B}{R_H}} \right) - \frac{c}{2};$$

(3.3)

$$\text{для секторної накладки: } e = c \cdot \left( \frac{1 + \frac{R_B}{R_H}}{1 - \frac{R_B}{R_H}} \right) \cdot \left[ \frac{\sin\left(\frac{\varphi_B}{2}\right)}{\varphi_B} - \frac{1}{2} \right]$$

(3.4)

Залежності  $\frac{e}{c}$  від  $\frac{R_B}{R_H}$  при різних значеннях  $\varphi_B$  для секторної накладки приведені на рис. 3.3.

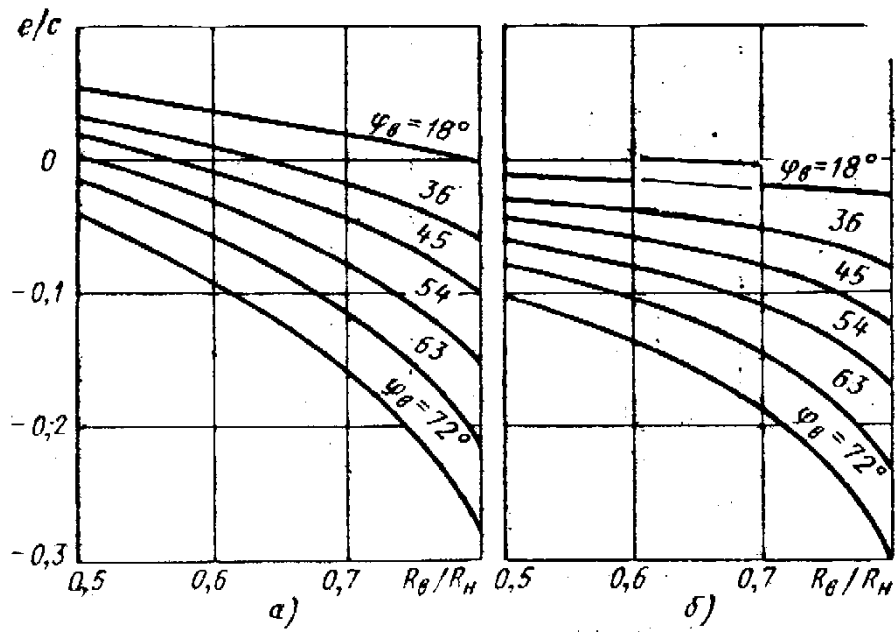


Рис. 3.3. Залежності  $\frac{e}{c}$  от  $\frac{R_B}{R_H}$  при різних значеннях  $\varphi_B$  :

*a* –  $p = const$  , *б* –  $fp = const$

Для прямокутної накладки табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Залежності  $e/c$  от  $R_B/R_H$

$\frac{R_B}{R_H}$	0,5	0,6	0,7	0,8
$\frac{e}{c}$	-0,0556	-0,0417	-0,0294	-0,0185

Для найбільш поширеного в практиці конструювання гальм дискових колодок випадку:  $K_{B3} = 0,1 \dots 0,15$  и  $R_B/R_H = 0,6 \dots 0,7$  для забезпечення рівномірності зношування накладок досить змістити точку додатку нормального навантаження на пару тертя щодо середини накладки уздовж радіусу диска на відстань не більше 0,1 ширини накладки у бік зовнішнього

радіусу. При гальмуванні сили тертя діють на деякій відстані від осі обертання гальмівного валу, і повністю їм сприймаються, що вимагає застосування валів і підшипникових опор значних розмірів. Для зниження моменту, що вигинає, від сил тертя застосовують діаметрально протилежну установку двох гальм дисккових колодок на один гальмівний диск.

### 3.2. Математична модель температурного поля гальмівної колодки

Енергоємність гальмових механізмів у значній мірі залежить від теплостійкості фрикційних матеріалів. Тому в цьому розділі розглянуті трибологічні властивості застосовуваних у гальмах фрикційних матеріалів.

У зв'язку з підвищенням вимог до гальмівних систем сучасних автомобільних транспортних засобів, що обумовлено зростанням швидкостей руху на часі виявляються тенденції до збільшення гальмівного моменту, що його реалізують гальма. Це супроводжується збільшенням реалізованої теплової потужності, тому теплове навантаження зростає, що обумовлює підвищення температури вузлів тертя. Існуючі матеріали з причин недостатніх трибологічних властивостей не в змозі у повній мірі відповідати сучасним вимогам. Сучасний стан питання гальмування на АТЗ вимагає розробки новітніх матеріалів, що відрізняються зокрема більшою термостійкістю, а також більшою здатністю відводити теплоту від поверхонь тертя. Остання якість має бути досягнута завдяки поліпшенню теплофізичних властивостей фрикційних матеріалів: теплопровідності, теплоємності і густини.

На автобусах закордонних фірм все частіше застосовуються дисккові гальмові механізми, основною перевагою яких є висока ефективність. Тому доцільно провести дослідження температурних режимів роботи відкритих

дискових гальм на автобусах великої місткості із застосуванням сучасних фрикційних матеріалів.

Процес інтенсивного гальмування в більшості сучасних машин продовжується вельми тривалий час, тому для спрощеного розгляду задачі теплопровідності в процесі гальмування можна нехтувати тепловіддачею в навколишнє середовище.

Теплопередача на вільних поверхнях фрикціонів і гальм в звичайних умовах на максимальну температуру поверхні тертя впливає незначним чином і може не враховуватися [27]. Звичайна величина коефіцієнта теплопередачі граничного шару, що передає теплоту, рівна  $\sigma' = 20 \dots 60$  Вт/м<sup>2</sup>·К. У цих умовах зміна числа Біо (Bi) при  $\sigma' = 20 \dots 60$  не робить практично впливу на поверхневу температуру навіть до чисел Фур'є  $F_0 = 10$ . Оскільки більшість швидкодіючих гальмівних пристроїв працюють в таких режимах, що  $F_0 \leq 10$ , то можна при розрахунку температур використовувати граничну умову - відсутність тепловіддачі від вільних поверхонь пари тертя в навколишнє повітряне середовище. Окрім цієї умови, приймаються ще такі умови: тепловий потік лінійний і направлений по нормалі до «середнього горизонту» поверхні тертя, температура навколишнього середовища постійна і дорівнює нулю.

В цьому випадку задача знаходження температур в елементах пари тертя зводиться до вирішення лінійного диференціального рівняння Фур'є з постійними коефіцієнтами:

$$\frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} = \alpha_1 \left( \frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial z_1^2} + \frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial y_1^2} \right). \quad (3.5)$$

З краєвими умовами для даного елемента пари:

при  $z_1 = 0$ :

$$\frac{\partial \vartheta_1}{\partial z_1} = - \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W m.n. \tau_N}{A_{a1} \lambda_1 t_T}; \quad (3.6)$$

$$\text{при } z_1 = b_1: \quad \frac{\partial \vartheta_1}{\partial z_1} = 0; \quad (3.7)$$

$$\text{і для всіх } z_1 \text{ при } t=0: \quad \vartheta_1 = 0,$$

$$\text{при } y = \pm \frac{1}{2} l: \quad \left. \frac{\partial \vartheta_1}{\partial y_1} \right|_{y=\pm \frac{1}{2} l} = 0, \quad (3.8)$$

де  $\alpha_{m.n.}$  - коефіцієнт розподілу теплових потоків між матеріалами елементів пари тертя, який можна визначити по видатним формулам Ф. Шаррона, Х. Хассельгрубера;  $\lambda_1$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу даного елемента;  $\alpha_1 = \lambda_1 / c_1 \gamma_1$  - коефіцієнт температуропроводності;  $c_1$  - питома теплоємність;  $\gamma_1$  - щільність.

Оскільки розв'язок цих рівнянь відноситься до нестационарних контактних теплових задач в областях неklasичної форми при неоднорідних граничних та складних початкових умовах, то вони не мають точного аналітичного розв'язку. З огляду на це у вивченні процесів нагрівання та охолодження вузлів тертя великого значення надають експериментам, які виконують згідно з вимогами теорії подібності. Ця теорія дає змогу отримати узагальнені (критеріальні) рівняння, справедливі для групи подібних явищ. Такі рівняння для теплового розрахунку гальм різного функціонального призначення отримані дослідниками московської та лєнінградської шкіл (М.П. Александров, Н.Ф. Корєнчук, А.Н. Пікушов та ін.), які поряд з позитивним, мають певні недоліки. Вони полягають в тому, що між різними гальмами немає повної геометричної та гідромеханічної подібності. Крім того, вони не враховують реальної енергонавантажєності гальм та її розподілу між гальмовими механізмами різних осей АТЗ.



В наш час для задач, які не мають розв'язку у замкненій аналітичній формі або, коли отримані розв'язки настільки складні, що не можуть бути використані для практичного використання, широко застосовуються методи математичного моделювання. Цей метод успішно застосували дослідники Б.Б. Генбом, Г.Г. Гудз, М.В. Глобчак, П.Г. Єременко, А.М. Туренко для вивчення теплових процесів у барабанних та дискових закритих гальмових механізмах і фрикціонах ГМП на типових режимах випробувань АТЗ та в реальних умовах експлуатації. Взнявши до уваги, що найбільш напруженим режимом гальм вважається тривалий процес гальмування, то актуальним стало питання розроблення математичної моделі для тривалого процесу гальмування.

Температурні поля в елементах пари в загальному випадку залежать від тривалості і часу тертя. На (рис. 3.4 в) дана модель контакту жорстких поверхонь (розглядається номінальна площа тертя  $A_a$ ).

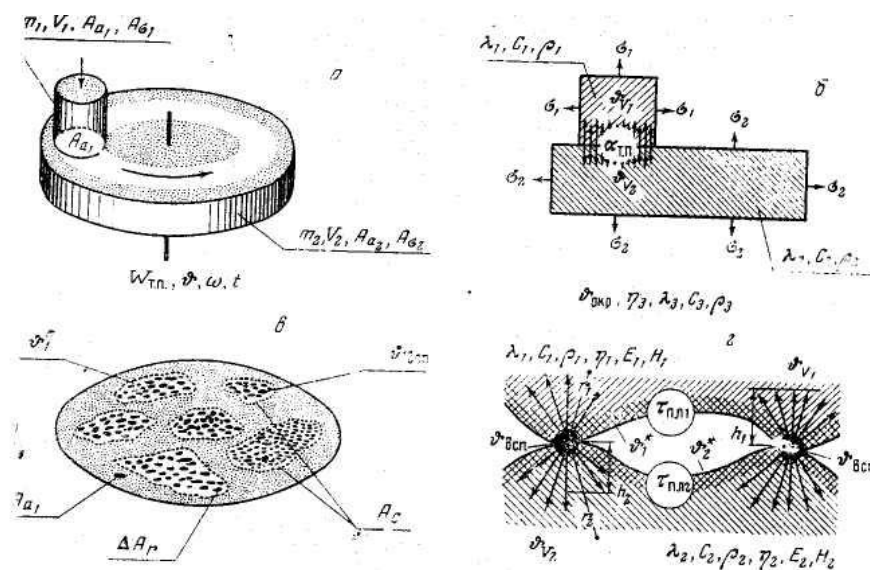


Рис. 3.4. Основні фізичні моделі і параметри що визначають зовнішнє тертя

Як відомо, те, що стосується поверхонь дискретне і при терті необхідно розрізняти три площі:  $A_a$  - номінальну,  $A_c$  - контурну площу торкання і  $A_z$  - фактичну площу як суму елементарних плям торкання. Перша площа є заданою величиною, а останні дві формуються при терті

під навантаженням (з урахуванням температури) залежно від шорсткості поверхні і механічних властивостей, а також хвилястості і неточності виготовлення матеріалів пари. На номінальній поверхні має місце середня температура поверхні тертя, а температура спалаху виникає на фактичній плямі торкання. При зносі контурні зони торкання переміщуються по номінальній поверхні.

На (рис. 3.4 г) представлена модель мікроконтакту. У моделі врахована мікро жорсткість кожного з елементів ( $r_{1,2}$  - радіус одиничної нерівності,  $h_{1,2}$  - висота нерівності). На мікро виступах, що знаходяться в контакті, виникає температура спалаху. На формування контакту при деформаціях тертя роблять вплив поверхневі плівки на кожному з елементів пари, що характеризуються опором руйнуванню цих плівок  $\tau_{n1,2}$ , а також пружні -  $E_{1,2}$  пластичні -  $H_{1,2}$  і вязкостні -  $\eta_{1,2}$  властивості матеріалів (останні зазвичай виявляються при високих температурах). У строгому розумінні контактна область тіл є реалогічеським середовищем.

Ці властивості залежать від температури в кожному з елементів пари (максимальною сумою середньої температури поверхні, що є, - і температури спалаху -  $\vartheta_{всп}$ , а також градієнта температури -  $\partial \vartheta_{1,2} / \partial n_{1,2}$ ). При цьому температурне поле характеризується для кожного з елементів безперервною і єдиною функцією для поверхневого шару і об'єму, що має в кожній точці об'єму похідні.

На тертя і знос у ряді випадків істотний вплив роблять макро- і мікро викривлення елементів пари тертя, що викликаються температурним градієнтом. Тому необхідним виявляється облік термічних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів -  $\alpha_{1,2}$ .

Необхідно підкреслити те, що по фізичній суті явища розмір (наприклад, довжина) тіл при терті і розмір (довжина) шляху тертя порізно впливають на протікання цього процесу. Тому характерний розмір тіл врахований параметром –  $S_{1,2}$ , що має іншу розмірність, чим розмірність шляху тертя, який є відношенням тепловіддаючої поверхні до тепло поглинаючому об'єму кожного з елементів пари.

Як показано в загальній теорії подібності, концентрувати увагу необхідно на визначальних параметрах, які містяться в краєвих умовах завдання і мають вирішальну дію на процес. Інші параметри, які є фактичними следствіями перших, носять найменування не визначальних параметрів. Їх облік не дає нових критерій співвідношень, оскільки кожен не визначальний критерій є однозначною функцією сукупності визначальних критеріїв (вони складаються тільки з визначальних параметрів).

Складемо перелік тих параметрів, які є визначальний (істотними) для процесу тертя: маса –  $m_{1,2}$ , кг; щільність –  $\rho_{1,2,3}$  кг/м<sup>3</sup>; відношення теплоотдающей поверхні до поглинаючого об'єму елементу пари –  $S_{1,2}$ , м<sup>-1</sup>; номінальна площа тертя –  $A_{a1,2}$ , м<sup>2</sup>; радіус одиничної нерівності –  $r_{1,2}$ , м; максимальна висота нерівності шорсткої поверхні –  $h_{1,2}$ , м; навантаження на пару тертя –  $P$ , Н; швидкість –  $v$ , м/с; тривалість гальмування –  $t$ , с; температурна різниця між температурою даного елементу і температурою середовища –  $\vartheta_{1,2}$ , К; коефіцієнт теплопровідності –  $\lambda_{1,2,3}$  Вт/м·К; питома теплоємність –  $C_{1,2,3}$ , Дж/кг·К; коефіцієнт тепловіддачі –  $\sigma_{1,2}$ , Вт/м<sup>2</sup>·К; температурний градієнт –  $\frac{\partial \vartheta_{1,2}}{\partial n_{1,2}}$ , К/м; задана робота тертя –  $W_{т.п.}$ , Дж; коефіцієнт лінійного розширення матеріалів пари тертя –  $\alpha_{1,2}$ , К<sup>-1</sup> (де індекс 1 відноситься до колодки, індекс 2 – до диска, а індекс 3 – до навколишнього середовища).

Припускаючи, що температура будь-якої крапки на осі  $z$ ,  $y$  пропорційна часу гальмування і приріст температури в цій будь-якій крапці дорівнює приросту середньої об'ємної температури, маємо:

$$\frac{\partial \vartheta_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 \vartheta_1}{\partial z_1^2} \cdot C_y = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N}{A_{a1} \gamma_1 c_1 b_1 t_T} = C', \quad (3.9)$$

де  $b_1$  - товщина даного елемента пари тертя,

$C_y$  - коефіцієнт, враховуючий розподіл температури по ширині колодки, знаходиться по результатам обробки експериментів.

Т.е.  $\vartheta_1 = C_y \cdot c't + c''$  і  $C_y \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = c'$ . Доведемо, що ця умова асимптотика наближається до вирішення рівняння (3.5) з крайовими умовами (3.6) - (3.8).

З (3.9), інтегруючи, отримуємо:

$$\frac{\partial \vartheta_1}{\partial z_1} \cdot C_y = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N z_1}{A_{a1} \gamma_1 c_1 b_1 t_T a_1} + \theta'(t) + k_1 = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N z_1}{A_{a1} \lambda_1 b_1 t_T} + \theta'(t) + k_1, \quad (3.10)$$

де  $\theta'(t)$  - довільна функція часу;  $k_1$  - постійна.

З виразу (3.10), враховуючи граничні умови (3.6) і (3.7), отримуємо, що:  $\theta'(t) = 0$  (так как  $\left. \frac{\partial \vartheta_1}{\partial z_1} \right|_{z=0} = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N}{A_{a1} \lambda_1 t_T}$  і  $\left. \frac{\partial \vartheta_1}{\partial z_1} \right|_{z=b_1} = 0$  не залежить від  $t$ ) і

далі:

$$\frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N b_1}{A_{a1} \gamma_1 c_1 b_1 t_T a_1} + k_1 = 0; \quad (3.11)$$

що дає:

$$k_1 = - \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N}{A_{a1} \lambda_1 t_T}. \quad (3.12)$$

Підставляючи (3.12) в (3.11) отримаємо:

$$\frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial z_1} \cdot C_y = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N}{A_{a1} \lambda_1 t_T} \left( \frac{z_1}{b_1} - 1 \right),$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial z_1} \cdot C_y = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N}{A_{a1} \lambda_1 t_T} \left( 1 - \frac{z_1}{b_1} \right), \quad (3.13)$$

що після інтеграції дає:

$$\mathcal{G}_1 = - \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N z_1}{A_{a1} \lambda_1 t_T} \left( 1 - \frac{z_1}{2b_1} \right) C_y + \theta''(t) + k_2, \quad (3.14)$$

де  $\theta''(t)$  - довільна функція часу;  $k_2$  - довільна постійна.

З виразу (3.9) визначаємо, що:

$$\frac{\partial \mathcal{G}_1}{\partial z_1} \cdot C_y = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N z_1}{A_{a1} b_1 c_1 \gamma_1}, \quad (3.15)$$

після інтеграції дає:

$$\theta''(t) = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) \int_0^t W_{m.n.} \tau_N dt'}{A_{a1} \gamma_1 c_1 b_1 t_T} = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_W}{A_{a1} \gamma_1 c_1 b_1}. \quad (3.16)$$

Отримуємо остаточно вирішення рівняння (3.5) у такому вигляді:

$$\mathcal{G}_1 = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.}}{A_{a1}} C_y \left[ - \frac{z_1 \tau_N}{\lambda_1 t_T} \left( 1 - \frac{z_1}{2b_1} \right) + \frac{\tau_W}{\gamma_1 c_1 b_1} + k_2 \right]. \quad (3.17)$$

Це рішення задовольняє граничним умовам (3.6) і (3.7), але не задовольняє початковій умові (3.8). Поставимо додаткову умову теплового балансу, по якому у будь-який момент тертя тепло в даному елементі пропорційно роботі тертя:

$$\gamma_1 c_1 \int_0^{b_1} \mathcal{G} dz = \frac{(1 - \alpha_{m.n.})}{A_{a1}} C_y \int_0^t \frac{W_{m.n.}}{t_T} \tau_N dt' = \frac{C_y (1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_W}{A_{a1}}. \quad (3.18)$$

Підставляючи в (3.18) значення  $\mathcal{G}_1$  з (3.17), отримаємо:

$$\frac{(1-\alpha_{m.n.})W_{m.n.}\gamma_1 c_1}{A_{a1}} \int_0^{b_1} \left[ -\frac{z_1 \tau_N}{\lambda_1 t_T} \left(1 - \frac{z_1}{2b_1}\right) + \frac{\tau_W}{\gamma_1 c_1 b_1} \right] C_y dz + \gamma_1 c_1 k_2 \int_0^{b_1} dz = C_y \frac{(1-\alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_W}{A_{a1}}, \quad (3.19)$$

що дає:

$$k_2 = \frac{(1-\alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N b_1}{3\lambda_1 A_{a1} t_T}. \quad (3.20)$$

Тепер рішення (3.17) переписуться так:

$$\mathcal{G}_1 = \frac{(1-\alpha_{m.n.})W_{m.n.}}{A_{a1}} \left[ -\frac{z_1 \tau_N}{\lambda_1 t_T} \left(1 - \frac{z_1}{2b_1}\right) + \frac{\tau_W}{\gamma_1 c_1 b_1} + \frac{b_1 \tau_N}{3\lambda_1 t_T} \right]. \quad (3.21)$$

Це рішення задовольняє граничним умовам (3.6) і (3.7), але не задовольняє початковій умові (3.8), оскільки при  $t=0$ , якщо  $\tau_N \neq 0$ , маємо:

$$\mathcal{G}_1 = \frac{(1-\alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N}{A_{a1}\lambda_1 t_T} C_y \left[ -z_1 \left(1 - \frac{z_1}{2b_1}\right) + \frac{b_1}{3} \right] \neq 0, \quad (3.22)$$

оскільки при  $t = 0$  часовий чинник  $\tau_W = 0$ .

Використовуючи теорему Дюгомеля, досліджуємо рівняння (3.5) при наступних двох системах граничних і початкових умов:

при  $z_1 = 0$ :

$$\frac{\partial \mathcal{G}'_1}{\partial z_1} \cdot C_y = -\frac{(1-\alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N}{A_{a1}\lambda_1 t_T}, \quad (3.23)$$

при  $z_1 = b_1$ :

$$\frac{\partial \mathcal{G}'_1}{\partial z_1} \cdot C_y = 0,$$

при  $t=0$ :

$$\mathcal{G}'_1 = \frac{(1 - \alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N}{A_{a1}\lambda_1 t_T} C_y \left[ -z_1 \left(1 + \frac{z_1}{2b_1}\right) + \frac{b_1}{3} \right];$$

при  $z_1 = 0$ :

$$\frac{\partial \mathcal{G}''_1}{\partial z_1} \cdot C_y = -\frac{(1 - \alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N}{A_{a1}\lambda_1 t_T}, \quad (3.24)$$

при  $z_1 = b_1$ :

$$\frac{\partial \mathcal{G}''_1}{\partial z_1} \cdot C_y = 0,$$

при  $t = 0$ :

$$\mathcal{G}''_1 = 0.$$

Краєвим умовам (3.23) задовольняє рішення (3.22). Правильне рішення повинне задовольняти (3.24), яке відповідає умовам (3.6) - (3.8). Різниця між рішеннями у рівняння (3.5) з краєвими умовами (3.23) і (3.24):

$$\mathcal{G}'_1(z_1, t) - \mathcal{G}''_1(z_1, t) = \mathcal{G}'''_1(z_1, t),$$

також буде вирішенням рівняння (3.5), але вже за нових краєвих умов, а саме:

при  $z_1 = 0$ :

$$\frac{\partial \mathcal{G}'''_1}{\partial z_1} \cdot C_y = 0;$$

при  $z_1 = b_1$ :

$$\frac{\partial \mathcal{G}'''_1}{\partial z_1} \cdot C_y = 0;$$

при  $t = 0$ :

$$\mathcal{G}'''_1 = \frac{(1 - \alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N}{A_{a1}\lambda_1 t_T} C_y \left[ -z_1 \left(1 - \frac{z_1}{2b_1}\right) + \frac{b_1}{3} \right]. \quad (3.25)$$

Вирішуємо рівняння (3.5) з краєвими умовами (3.25) класичним методом, шукаємо рішення у вигляді:

$$\mathcal{G}'''_1(z_1, t) = C_y Z(z) T(t). \quad (3.26)$$

Підставляючи (3.26) в рівняння (3.5), маємо:

$$\frac{Z''(z)}{Z(z)} = \frac{T'(t)}{a_1 T(t)} = -\nu^2, \quad (3.27)$$

що дає два рівняння:

$$Z''(z) + \nu^2 Z(z) = 0. \quad (3.28)$$

$$T'(t) + a_1 T(t) = 0. \quad (3.29)$$

Рішення (3.28) має вигляд  $Z(z) = C_1 \cos \nu z_1 + C_2 \sin \nu z_1$ , а рішення (3.29)  $T(t) = C_3 e^{-a_1 \nu^2 t}$ , що дає при підстановці в (3.26):

$$\mathcal{G}'''_1(z_1, t) = e^{-a_1 \nu^2 t} (C' \cos \nu z_1 + C'' \sin \nu z_1). \quad (3.30)$$

Визначаємо довільні постійні  $C'$  і  $C''$  з краєвих умов (3.25) при  $z_1 = 0$ :

$$\left[ (-\nu C' \sin \nu z_1 + \nu C'' \cos \nu z_1) e^{-a_1 \nu^2 t}, m.e. C'' = 0 \right];$$

при  $z_1 = b_1$ :  $-\nu C' \sin \nu b_1 = 0,$

що дає:  $\sin \nu b_1 = 0,$

де:  $\nu = \pm \frac{\pi}{b_1}, \frac{2\pi}{b_1} \dots \pm \frac{n\pi}{b_1} \quad (n=0, 1, 2, \dots).$

Повертаючись до рішення (3.32), отримаємо:

$$\mathcal{G}'''_1(z_1, t) = C' e^{-a_1 \nu^2 t} \cos \nu z_1 = C' e^{-a_1 \left(\frac{n\pi}{b_1}\right)^2 t} \cos \frac{n\pi}{b_1} z_1. \quad (3.31)$$



Рішення (3.31) є приватним і сума таких рішень буде загальним рішенням:

$$\mathcal{G}'''_1(z_1, t) = \sum_{n=1}^{\infty} C' e^{-a_1 \left(\frac{\pi}{b_1}\right)^2 t} \cos \frac{\pi n}{b_1} z_1. \quad (3.32)$$

Підставляючи загальне рішення (3.32) в умови (3.25) при  $t=0$ , отримуємо:

$$\mathcal{G}'''_1(z_1, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} C' \cos \frac{\pi n}{b_1} z_1 = \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N}{A_{a1} \lambda_1 t_T} C_y \left[ -z_1 \left(1 - \frac{z_1}{2b_1}\right) + \frac{b_1}{3} \right]. \quad (3.33)$$

Таким чином, функція початкової умови є розкладанням в ряд Фур'є по косинусах, що дозволяє написати:

$$\frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N}{A_{a1} \lambda_1 t_T} C_y \left[ -z_1 \left(1 - \frac{z_1}{2b_1}\right) + \frac{b_1}{3} \right] = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{\pi n}{b_1} z_1. \quad (3.34)$$

$$\text{Як відомо, } a_0 = \frac{2}{b_1} \int_0^{b_1} \mathcal{G}'''_1(z_1, 0) dz = \frac{2}{b_1} \frac{(1 - \alpha_{m.n.}) W_{m.n.} \tau_N}{A_{a1} \lambda_1 t_T} C_y \int_0^{b_1} \left[ -z_1 \left(1 - \frac{z_1}{2b_1}\right) + \frac{b_1}{3} \right] dz. \quad (3.25)$$

$$\text{Таким чином, } a_0 = 0, \quad a_n = \frac{2}{b_1} \int_0^{b_1} \mathcal{G}'''_1(z_1, 0) \cos \frac{\pi n}{b_1} z_1 dz_1.$$

Розглянемо інтеграли:

$$\int_0^{b_1} \cos \frac{\pi n}{b_1} z_1 dz_1 = 0;$$

$$\int_0^{b_1} z_1 \cos \frac{\pi n}{b_1} z_1 dz_1 = \frac{b_1^2}{\pi^2 n^2} [(-1)^n - 1];$$

$$\frac{1}{2b_1} \int_0^{b_1} z_1^2 \cos \frac{\pi n}{b_1} z_1 dz_1 = \frac{b_1^2}{\pi^2 n^2} (-1)^n.$$

Таким чином:

$$a_n = \frac{2(1 - \alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N b_1}{A_{a1}\lambda_1 t_T \pi^2 n^2}, \quad (3.36)$$

функція (3.34) має вигляд:

$$\mathcal{G}'''_1(z, 0) = \frac{2(1 - \alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N b_1}{A_{a1}\lambda_1 t_T \pi^2} C_y \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos \frac{\pi n}{b_1} z_1.$$

Довільна постійна  $C'$  визначається так:

$$C' = \frac{2(1 - \alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N b_1}{A_{a1}\lambda_1 t_T \pi^2}, \quad (3.37)$$

загальне рішення з рівняння (3.5) краєвими умовами (3.25) має вигляд:

$$\mathcal{G}'''_1(z_1, t) = \frac{2(1 - \alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N b_1}{A_{a1}\lambda_1 t_T \pi^2} C_y \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos \frac{\pi n}{b_1} z_1 e^{-a_1 \left(\frac{\pi n}{b_1}\right)^2 t}. \quad (3.38)$$

Температура  $\mathcal{G}'''_1(z_1, t)$ , коли  $t$  збільшується, швидко зменшується і прагне до нуля. Різниця:

$$\mathcal{G}'_1(z_1, t) - \mathcal{G}''(z_1, t) = \mathcal{G}'''_1(z_1, t), \quad (3.39)$$

також прагне до нуля. Отже, вирішення (3.21) рівняння (3.5) з краєвими умовами (3.23), з якого визначається температура  $\mathcal{G}'_1(z_1, t)$ , асимптотика наближається до температури  $\mathcal{G}'_1(z_1, t)$ , що є правильним або дійсним вирішенням того ж рівняння (3.24) з дійсними (заданими) краєвими умовами (3.25) або умовами (3.6) - (3.8).

Таким чином, остаточно маємо:

$$\mathcal{G}_1 = \frac{(1 - \alpha_{m.n.})W_{m.n.}}{A_{a1}} C_y \left[ \frac{z_1}{\lambda_1} \left( 1 - \frac{z_1}{2b_1} \right) \frac{\tau_N}{t_T} + \frac{\tau_N}{\gamma_1 c_1 b_1} + \frac{b_1 \tau_N}{3\lambda_1 t_T} \right] - \frac{2(1 - \alpha_{m.n.})W_{m.n.}\tau_N b_1}{A_{a1}\lambda_1 t_T \pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos \frac{\pi n}{b_1} z_1 e^{-a_1 \left(\frac{\pi n}{b_1}\right)^2 t}.$$

Враховуючи, що:

$$\frac{a_1 t_T}{b_1^2} = F_{01}, \quad (3.40)$$

$$\tau = \frac{t}{t_T}, \quad (3.41)$$

$$\xi_1 = \frac{z_1}{b_1}, \quad (3.42)$$

отримуємо:

$$\begin{aligned} \vartheta_1(\xi_1, \tau) = \frac{(1-\alpha_{m.n.}) W_{m.n.} b_1}{A_{a1} \lambda_1 t_T} C_y \left[ -\xi_1 \left( 1 - \frac{\xi_1}{2} \right) \tau_N + \frac{\tau_N}{3} + \tau_W F_{01} \right] - \\ - \tau_N \frac{2}{\pi^2} \sum \frac{1}{n^2} \cos \pi n \xi_1 e^{-(\pi n)^2 F_{01} \tau}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

З умов (3.24) ясно, що  $\left. \frac{\partial \vartheta_1''}{\partial z_1} \right|_{z_1=b} = 0$ , тому з (3.42) отримуємо:

$$\frac{(1-\alpha_{m.n.}) W_{m.n.} b_1}{A_{a1} \lambda_1 t_T} \left[ -(1+\xi_1) \tau_N + \frac{2\tau_N}{\pi} \sum \frac{1}{n} \sin \pi n \xi_1 e^{-(\pi n)^2 F_{01} \tau} \right] = 0,$$

Звідки:  $\sum \frac{1}{n} \sin \pi n \xi_1 e^{-(\pi n)^2 F_{01} \tau} = 0$ . Далі маємо  $n = 1, 3, 5; n \neq 0$ , так как

$$\lim \frac{\sin \pi n}{n} = 1.$$

Із зростанням часу, тобто із зростанням  $\tau$ , член, представлений сумою ряду, прагне до нуля.

Формула (3.43) дає можливість розраховувати середню температуру поверхні тертя для таких замкнених фрикційних пар, коли номінальний розмір ширини макроконтaktu однаковий у обох елементів пари тертя.

На рис. 3.5 показані дискові гальма з малим перекриттям. З малюнка видно, що номінальна ширина доріжки тертя менше номінального розміру першого елемента  $l_2 \leq (R_{1нар} - R_{1вн})$ . За період  $t_T$  ефективна глибина шарів в першому і другому елементах визначатиметься з виразу (3.35).

Визначимо ефективний об'єм:

фрикційних шайб:

$$V_{2эф} = A_{a2} b_{2эф} = \pi l_2^2 b_{2эф}, \quad (3.44)$$

де  $l$  - число шайб;

диска:

$$V_{1эф} = A_{a1} b_{1эф} + \pi^2 R_{mp} b^2_{1эф} = \pi R_{mp} b_{1эф} (2l_2 + \pi b_{1эф}). \quad (3.45)$$

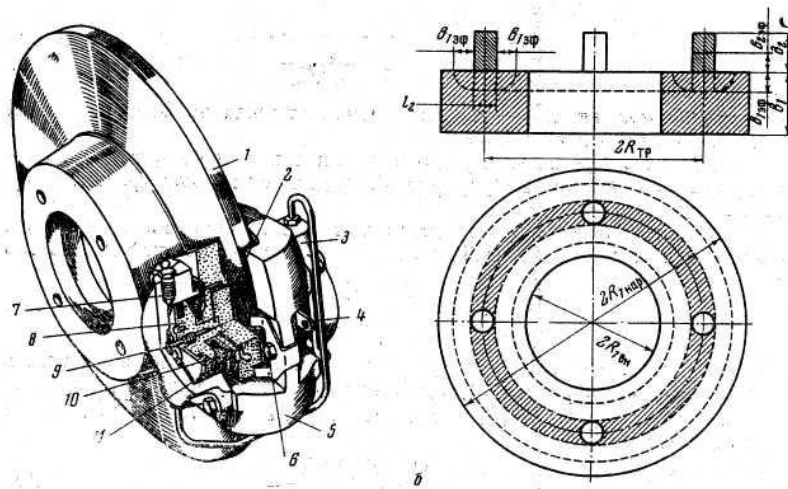


Рис. 3.5. Схеми дискових гальм з малим коефіцієнтом взаємного перекриття: а - схема конструкції; б - схема обліку ефективних теплопоглощаючих об'ємів; 1 - диск; 2 - фрикційна накладка; 3 - блок циліндра; 4 - наконечник видалення; 5 - кронциркуль; 6 - відпускний болт колодки; 7 - пускаючий гвинт; 8 - поршень; 9 - штифт витяжного механізму; 10 - ущільнюоче кільце; 11 - пилепредохранитель

У формулу для визначення температури в даному елементі пари тертя (3.43) необхідно внести поправочний коефіцієнт, який враховуватиме ефективний об'єм і ефективну товщину елемента пари:

$$\vartheta_1(\xi, \tau) = C_y \frac{(1 - \alpha''_{T.Пi}) \psi_{v1} W_{T.П} b_1}{\lambda_i t_T A_{a1}} \left[ -\xi_1 \left( 1 - \frac{\xi_1}{2} \right) \tau_N + \frac{1}{3} \tau_N + F_{oi} \tau_w - 0,202 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-\pi^2 n^2 F_{oi} \tau) \cos \pi n \xi_1 \right]$$

де для схеми контакту на рис. 3.5:

$$\psi_{v1} = \frac{2l_2}{2l_2 + \pi b_{1эф}}. \quad (3.46)$$

З урахуванням впливу охолодження пари тертя з відкритої вентиляваної поверхні на температуру використовуючи множник  $\frac{1 - e^{-10kt_{ох1}}}{1 - e^{-kt_{ох1}}}$  отримаємо остаточну формулу для визначення температури в плямі контакту при тривалому гальмуванні для ДТМ:

$$\theta_{CP}(\xi, \tau) = C_y \frac{\alpha_{T.Пi} \psi_{vi} W_{T.П} b_i}{\lambda_i t_T A_{a1}} \left[ -\xi_i \left( 1 - \frac{\xi_i}{2} \right) \tau_N + \frac{1}{3} \tau_N + F_{oi} \tau_w - \frac{2\tau_N}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-\pi^2 n^2 F_{oi} \tau) \right] + \frac{\alpha_{T.Пi} \psi_{vi} W_{T.П}}{m_i c_i} \left[ \frac{\exp(-k_i t_{ох1}) - \exp(-n_2 k_i t_{ох1})}{1 - \exp(-k_i t_{ох1})} \right]. \quad (3.47)$$

Для цього була розроблена математична модель розподілу температурних полів в ДТМ для тривалого режиму гальмування для автобусу ЛіАЗ-5256. Згідно з Правилами 13 ЄЕК ООН імітувався 12-хвилинний режим гальмування автобуса зі швидкістю руху 60 км/год. При цьому прийняті такі початкові дані: повна маса автобуса  $G=9600$  кг; повна робота тертя  $W=374668$  Дж; коефіцієнт розподілу питомої гальмівної сили  $\beta_g=0,5$ ; коефіцієнт тепловіддачі  $\sigma=36$  Вт/м<sup>2</sup> град; коефіцієнт теплопровідності матеріалу диска (Чавун ЧНМХ):  $\lambda_d=51,0$  Вт/м град; коефіцієнт температуропровідності  $a_d = 14 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с згідно з даними експериментальних випробувань [1]. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу колодки

(металокераміка М-106):  $\lambda_k = 28,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ ; коефіцієнт температуропровідності  $a_k = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; коефіцієнт теплопровідності матеріалу колодки (вуглець УТ-4):  $\lambda_k = 41 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ ; коефіцієнт температуропровідності  $a_k = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Крок змін параметрів за часом  $\Delta\tau$  при проведенні випробувань II був прийнятий 1 хв. У математичному модулі використана прямокутна система координат. Номінальна товщина диска становила 0,02 м, з діаметром 0,42 м. Він рівномірно нагрівався з обидвох боків двома накладками. На рис. 2.5. приведений загальний вигляд встановленого на інерційному стенді дискового гальмового механізму.

Досвід експлуатації гальмівних систем, особливо при значному збільшенні швидкості руху і застосуванні ефективніших фрикційних матеріалів, показує, що теплова напруженість процесів гальмування є одним з основних чинників, які визначають довговічність і пошкодженість фрикційних вузлів, перш за все виконавських елементів гальмівних пристроїв.

Правильне проектування перспективних гальмівних пристроїв, вибір сучасних фрикційних матеріалів, що мають раціональні триботехнічних характеристики, неможливі без теоретичної оцінки теплових процесів, що виникають в процесі гальмування.

Для процесів нагрівання накладок дискових гальм числа Фурье обчислюються за формулою [20]:

$$F_{oi} = \frac{a_i t_r}{b_i^2}, \quad (3.48)$$

де  $a_i$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^6$ , (індекс  $i = 1, 2$ , причому 1 – відноситься до металевого контртіла, 2 – до фрикційної накладки);

$t_r$  – тривалість гальмування, с;

$b_i$  – товщина елементу пари тертя.

Ефективна товщина елементів пари тертя  $b_{i\text{ЭЭ}} = 1,73\sqrt{a_i t_T}$ . Якщо  $b_{i\text{ЭЭ}} > b_{i\phi}$  (де  $b_{i\phi}$  – фактична товщина фрикційного елементу пари тертя по ГОСТ 1786—80 і ГОСТ 15853-70), то  $b_i = b_{i\phi}$ . При  $b_{i\text{ЭЭ}} < b_{i\phi}$  приймають  $b_i = b_{i\text{ЭЭ}}$ .

Основний вплив на характеристики фрикційного зносу фрикційної пари гальма роблять температурні параметри тертя. Найбільш надійні результати їх розрахунку можна отримати з використанням системи рівнянь теплової динаміки тертя [20].

Середня температура поверхні тертя при одноразовому гальмуванні:

$$\theta_{CP}(\tau) = \frac{\alpha_{T.лi} \psi_{vi} W_{T.л} b_i}{\lambda_i t_T A_{al}} \left[ \frac{1}{3} \tau_N + F_{oi} \tau_w - \frac{2\tau_N}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-\pi^2 n^2 F_{oi} \tau) \right]. \quad (3.49)$$

Температура на будь-якій відстані від поверхні тертя елементу пари тертя при довготривалому режимі гальмування, коли тепловіддачею за час тертя можна нехтувати (число Фур'є  $F_o \leq 10$ ):

$$\theta_{CP}(\xi, \tau) = C_y \frac{\alpha_{T.лi} \psi_{vi} W_{T.л} b_i}{\lambda_i t_T A_{al}} \left[ -\xi_i \left( 1 - \frac{\xi_i}{2} \right) \tau_N + \frac{1}{3} \tau_N + F_{oi} \tau_w - \frac{2\tau_N}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-\pi^2 n^2 F_{oi} \tau) \right] + \frac{\alpha_{T.лi} \psi_{vi} W_{T.л}}{m_i c_i} \left[ \frac{\exp(-k_i t_{охл}) - \exp(-n_2 k_i t_{охл})}{1 - \exp(-k_i t_{охл})} \right], \quad (3.50)$$

де  $W_{T.л}$  – повна робота тертя, Дж;

$\alpha_{T.лi}$  – коефіцієнт розподілу теплового потоку;

$\psi_{vi}$  – коефіцієнт, що враховує ефективний об'єм, що бере участь в поглинанні тепла;

$$\tau_N = \frac{N_t t_T}{W_{T.П}} - \text{тимчасовий чинник потужності тертя (тут } N_t - \text{ функціональна}$$

залежність зміни потужності тертя);

$$\tau_w = \frac{W_T t_T}{W_{T.П}} - \text{часовий чинник роботи тертя (тут } W_T - \text{ функціональна}$$

залежність зміни роботи тертя);

$$\tau = \frac{t}{t_T} - \text{відносний час;}$$

$A_a$  – номінальна площа тертя;

$\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності;

$$\xi_i = \frac{z_i}{b_i} - \text{відносна відстань від поверхні тертя;}$$

$$k_i = \frac{\sigma_i A_{BEH_i}}{m_i c_i}, \text{ (тут } \sigma_i - \text{ коефіцієнт тепловіддачі;}$$

$A_{BEH_i}$  – площа поверхні тепловіддачі;  $m_i$  – маса теплопоглощаючого елемента;  $c_i$  – питома теплоємність);

$t_{охл}$  – тривалість охолодження;

$n_1$  – число послідовних гальмувань.

При розрахунку рекомендується користуватися середнеефективним коефіцієнтом розподілу теплових потоків, який для одного з елементів пари тертя [20]:



$$\alpha_{T.П2} = \left\{ 1 + C_o \left\{ \frac{F_{o2}}{F_{o1}} - \frac{F_{o1} - F_{o2}}{3F_{o1}^2 A} \left[ \frac{1}{3} \ln \frac{\left(\frac{1}{3} - A\right) \left(\frac{1}{3} - F_{o1} + A\right)}{\left(\frac{1}{3} + A\right) \left(\frac{1}{3} - F_{o1} - A\right)} - A \ln \frac{3}{2} F_{o1} \right] \right\} \right\}^{-1}, \quad (3.51)$$

$$\text{де } A = \sqrt{F_{o1}^2 + \frac{1}{9}}; \quad C_o = \frac{\psi_{v_2} b_2 \lambda_1}{\psi_{v_1} b_1 \lambda_2}.$$

Значення  $\alpha_{m2}$  можна визначити залежно від  $F_{o1}$  і  $F_{o2}$  і коефіцієнта  $\alpha'$  (рис. 3.6) або по формулі:

$$\alpha_{m2} = \left[ \frac{1 + C_o(1 - \alpha')}{\alpha'} \right]^{-1}. \quad (3.52)$$

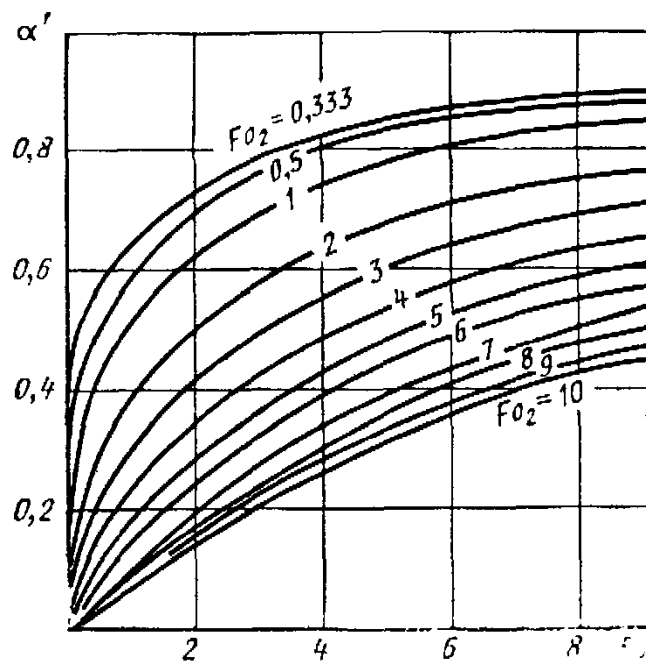


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнта  $\alpha'$  від  $F_{o1}$  і  $F_{o2}$

Для іншого елемента пари тертя:

$$\alpha_{m1} = 1 - \alpha_{m2}. \quad (3.53)$$

Коефіцієнти  $\psi_{vi}$  враховують пониження температури за рахунок розповсюдження тепла в сторони від доріжки або контурного майданчика тертя:

$$\psi_{vi} = \frac{m_{i\partial\phi} c_i}{m_{i\partial\phi} c_i + \frac{\sum m_{iD} c_i}{2}}, \quad (3.54)$$

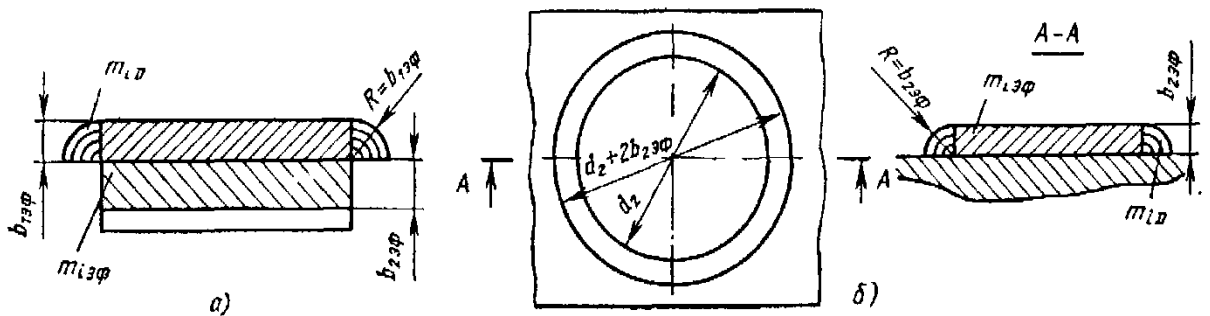


Рис. 3.7. Розрахункові схеми *лая* визначення  $\psi_{vi}$  при контакті накладки:

*a* – по барабану; *б* – по диску

де  $m_{i\partial\phi}$  – маса ефективного теплопоглощающего об'єму;

$m_{iD}$  – маса умовного ефективного додаткового об'єму, що враховує збільшення теплопоглощающего об'єму за рахунок проникнення тепла в сторони від доріжки тертя (рис. 3.7).

У виразах для розрахунку температур пари тертя враховують реальні закони зміни потужності і роботи тертя.

Характер зміни функцій  $\tau_N$  і  $\tau_w$  при різних значеннях  $n$  (де  $n$  – будь-яке раціональне число) приведений на (рис. 3.8). Для конкретного завдання величин  $\tau_N$  і  $\tau_w$  необхідно знати реальний закон зміни потужності і роботи тертя при гальмуванні. При експериментальному визначенні закону зміни потужності тертя досить визначити  $\tau_m = \frac{t_m}{t_T}$ , де  $t_m$  – момент часу, коли

потужність тертя досягає максимуму. Тоді значення  $n$  знаходять по формулах

$$\frac{n}{1+n} = \tau_m \quad \text{і} \quad \frac{1}{n+1} = \tau_m.$$

Характер зміни швидкості тертя в процесі гальмування залежить від виду функцій  $\tau_N$  і  $\tau_w$  і визначається виразом:

$$v_t = v_0 (1 - \tau_w)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.55)$$

При лінійному законі зміни  $\tau_N$  і  $\tau_w$ :

$$v_t = v_0 (1 - \tau). \quad (3.56)$$

Діаметр середньої плями фактичного контакту для випадку пластичного контакту, який має місце при інтенсивному тепловиділенні і характерний для вузлів тертя гальмівних пристроїв:

$$d_r = \left( \frac{8r_1 h_{1M}}{v_1} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{p_t}{HB_{2t} b_{01}} \right)^{\frac{1}{2v_1}}, \quad (3.57)$$

сумарна фактична площа контакту:

$$A_r = \frac{p_t A_k}{HB_{2t}}, \quad (3.58)$$

де  $r_1$  і  $h_{1M}$  – радіус і максимальна висота нерівності металевого елемента пари тертя;

$v_1$  і  $b_{01}$  – параметри кривої опорної поверхні жорсткого елемента;

$HB_{2t}$  – поточна твердість м'якого елемента, що деформується (накладки).

Коефіцієнт тепловіддачі при відомій сталій температурі перед  $n$ -гальмуванням при повторно-короткочасному режимі гальмування і при  $t_{охл} = const$ :

$$\sigma' = \frac{m_i c_i}{A_{ВЕН} t_{охл}} \ln \left( \frac{\alpha_{ПІІ} W_{ПІІ}}{\theta''_{ОБ.У} m_i c_i} + 1 \right). \quad (3.59)$$

Масу теплопоглощаючого об'єму  $m_i$  визначають для елемента, що робить основний вплив на зростання об'ємної температури. Для гальма колодки при  $K_{B3} < 1$  з асбофрікційними накладками масу  $m_i$  визначають для металевого контртіла (барабана).

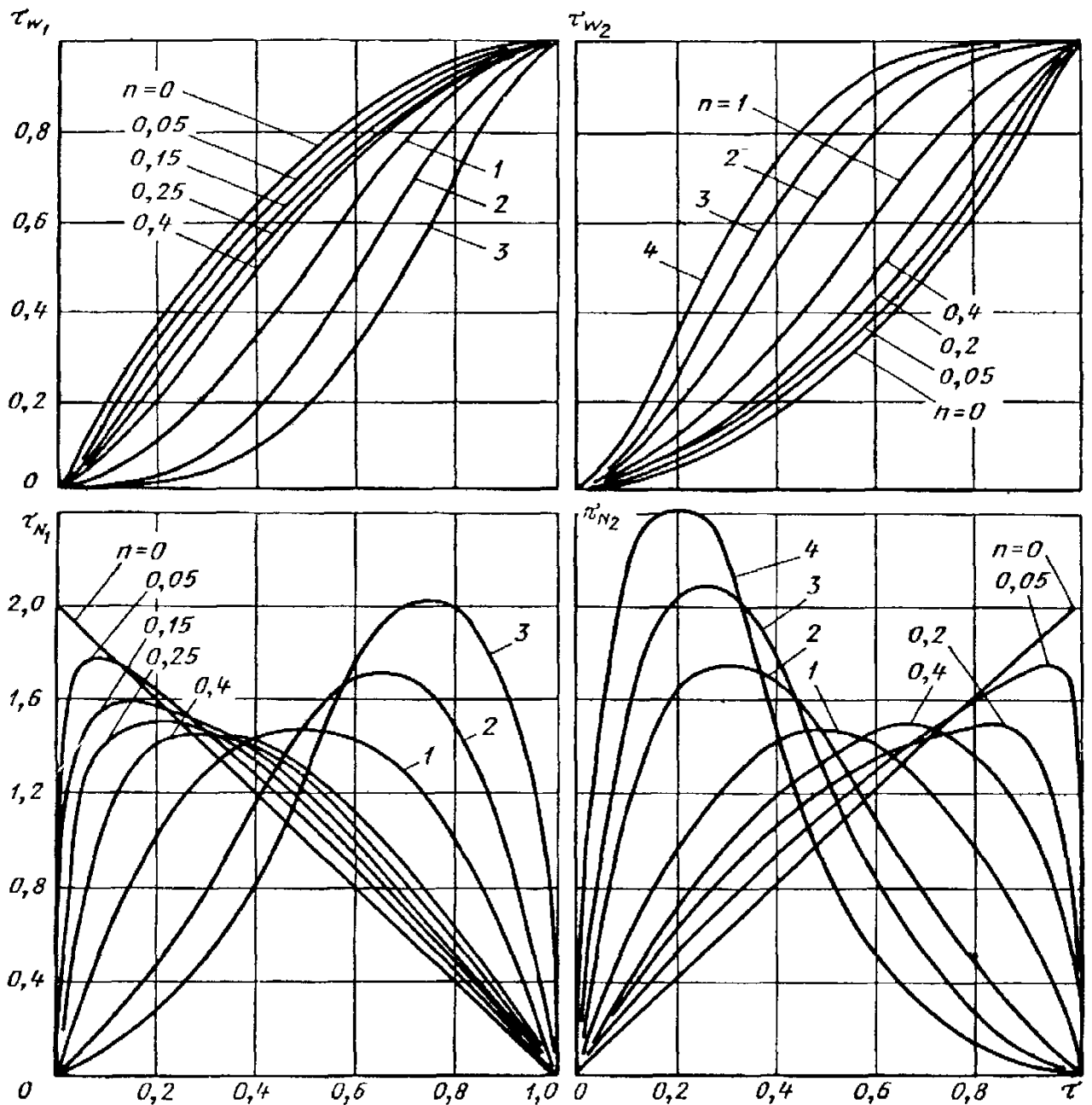


Рис. 3.8. Залежності  $\tau_N$  і  $\tau_w$  від відносного часу  $\tau$

Поверхня тепловіддачі (площею  $A_{BEH}$ ) є всією вільною поверхнею теплопоглощаючого об'єму, з якою відбувається теплоотвод в навколишнє середовище при розімкненому гальмі.

На основі розрахунку температур можна з'ясувати працездатність фрикційного матеріалу в діапазоні допустимих температур і орієнтовний знос матеріалу.

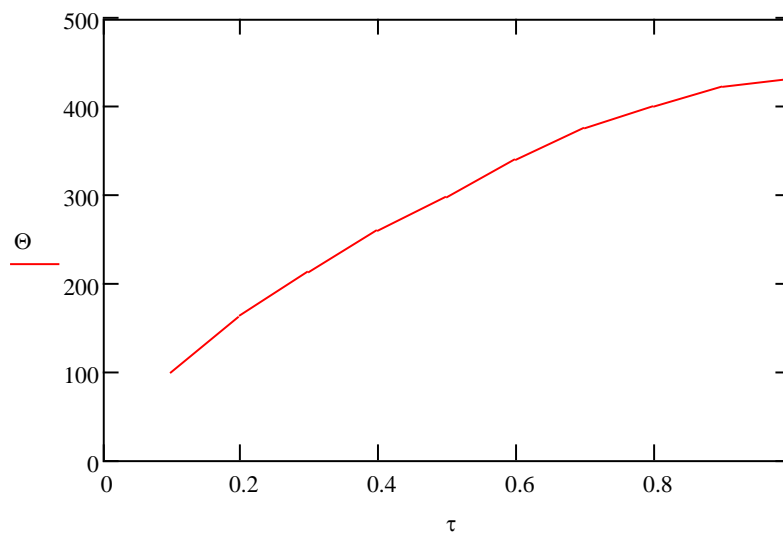
Якщо розрахункові значення температур вище допустимих, то необхідно збільшити площу тертя, товщину елемента пари тертя (якщо вона менша  $b_{эф}$ ), застосувати більш тепломісткі і теплопровідні матеріали або конструктивні заходи примусового охолодження фрикційної пари гальма [3].

Після математичного розрахунку були здобуті залежності температури від відносного часу для автобуса масою 9600 кг при тривалому режимі гальмування. На рис. 3.9. наведені графіки залежностей для трьох видів матеріалів.

При дослідженні аналізувався одночасний вплив фізико-хімічних властивостей різних матеріалів. Важливою характеристикою, яка справляє суттєвий вплив на тепловий режим деталей пари тертя гальмового механізму, є коефіцієнт розподілу теплових потоків  $\alpha$  за формулою (3.51) припускається, що для даного матеріалу він постійний. В той же час практика показує, що даний коефіцієнт залежить від часу та режиму гальмування, розмірів та конфігурації контртіл, умов тепловіддачі тощо.

В даний час відповідних аналітичних залежностей не існує, а їх визначення експериментальним шляхом пов'язане з великими труднощами і похибками. Тому, в даній ситуації математичне моделювання є практично

єдиним  
засобом  
числової  
що



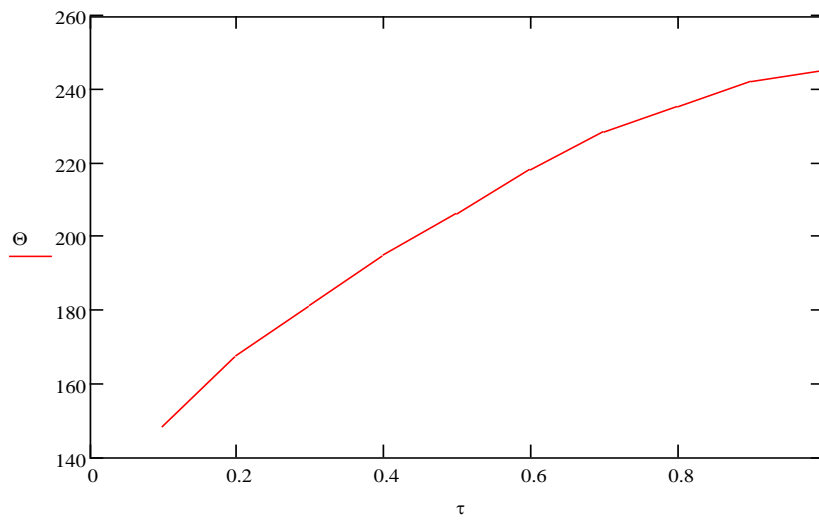
ефективним  
одержання  
інформації,  
характеризує

досліджуваний процес.

Для подальшого розрахунку за допомогою графічного методу з графіку експериментальних випробувань (табл. 3.2) були встановлені поточні значення температур на поверхні вздовж ширини колодки ( $y$ ).

При моделюванні розподілу температурних полів, завданих вищенаведеними табличними даними за допомогою методу апроксимацій були одержані рівняння регресії, які при використанні натуральних змінних записуються так:

Чавун-асбополімер 6КФ-58



Чавун-  
металокераміка

M-106

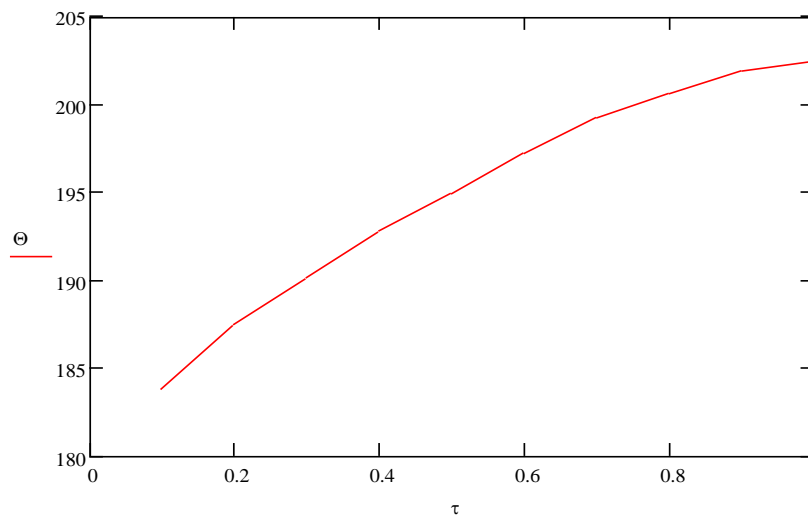


Рис. 3.9. Залежності температури від відносного часу для трьох видів матеріалів

$$T_{\tau,l} = \theta_i \cdot \left[ a_j + b_j \cdot l + c_j \cdot l^3 \right], \quad (3.60)$$

де  $C_y = (a_j + b_j \cdot l + c_j \cdot l^3)$ ,

де  $a(\tau)_j$ ,  $b(\tau)_j$ ,  $c(\tau)_j$  - коефіцієнти залежні від часу;

$l$  - відносна довжина колодки (0...1).

$$a_j = \frac{0,204 + 0,192 \cdot \tau \cdot l}{1 + 0,186 \cdot \tau \cdot l}, \quad (3.61)$$

$$b_j = \frac{1}{0,725 + 0,035 \cdot \tau \cdot l \cdot \ln(\tau \cdot l) + \frac{-0,106}{(\tau \cdot l)^2}}, \quad (3.62)$$

$$c_j = \frac{1}{-0,717 + (-0,036) \cdot \tau \cdot l \cdot \ln(\tau \cdot l) + (-0,302) \cdot (\tau \cdot l)^{-1} \cdot \ln(\tau \cdot l)}, \quad (3.63)$$

де  $j$  – хвилина гальмування (1...12),

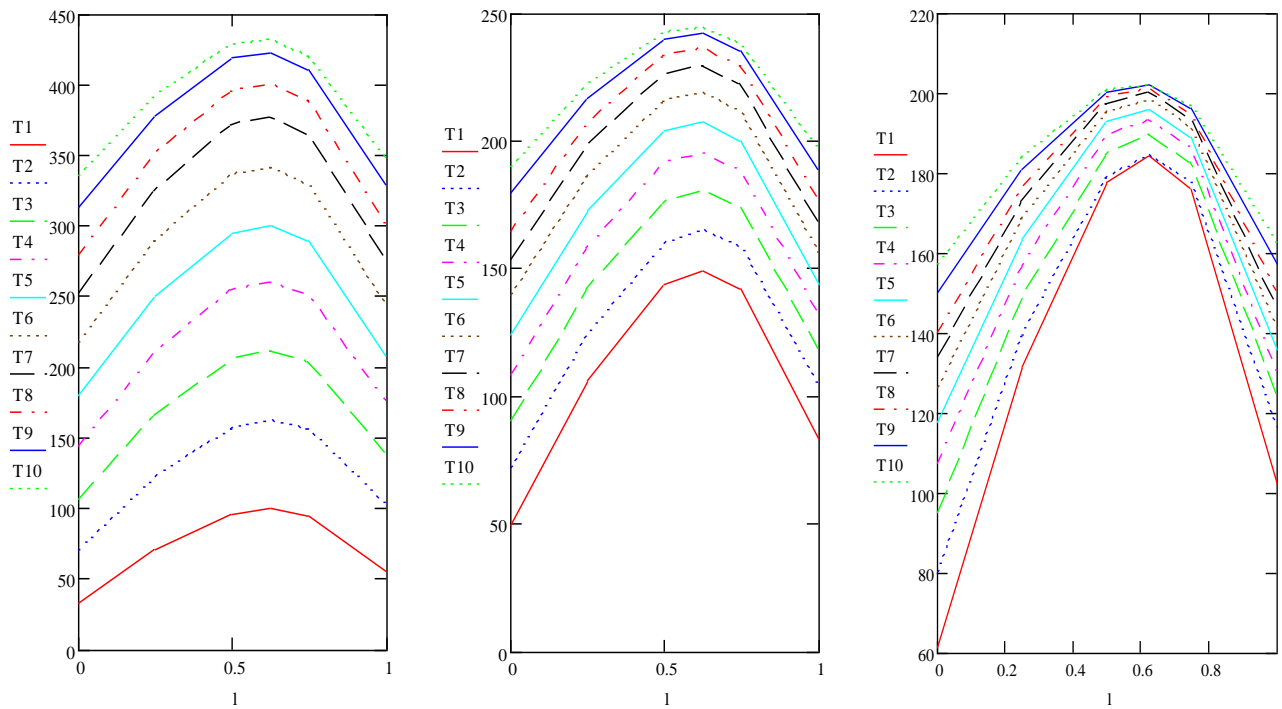
$\tau = n \cdot j$  - відносний час гальмування,

$n = (1...12)$  - число хвилин, по закінченні яких фіксувався поточний розподіл температур.

Таблиця 3.2

Розподіл максимальних температур по поверхні колодки





Час/ лінії	1 (0)	2 (0,25)	3 (0,5)	4 (0,75)	5 (1)
1	32,5	75	100	95	57,5
2	70	120	152,5	148,5	100
3	102	160	207,5	200	137,5
4	142,5	207,5	250	245	167,5
5	180	252,5	292,5	287,5	212,5
6	217,5	292,5	332,5	327,5	240
7	250	325	367,5	362,5	270
8	275	347,5	390	385	290
10	317,5	372,5	412,5	415	325
12	340	393,8	430	435	350

За допомогою програми MatCad з використанням формул були отримані графіки розподілу температурного поля по поверхні колодки при тривалому режимі гальмування рис. 3.10. для трьох матеріалів.

Рис. 3.10. Розподіл температурних полів по поверхні колодки: а - чавун – асбололімер, б – чавун – металокераміка, в – чавун – вуглець

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок, що запропонована модель адекватно описує процес, оскільки екстремальна розбіжність між експериментальними та теоретичними даними не перевищує 5%.

В результаті розрахунків встановлено, що: асбopolімерна колодка досягла температуру в 431 °C на 12 хв. гальмування, металокерамічна колодка – 244,5 °C, а вуглецева – 202 °C. Середня температура на 7 хвилині гальмування по ширині колодки склала: 328 °C ; 200 °C ; 173 °C відповідно. На графіках також видно, що з ростом часу гальмування екстремум температури змістився від центру колодки до зовнішнього кола диску.

По цим показникам асбopolімерні та металокерамічні матеріали показали більшу термонапряжність, що обуславлює більший знос чавунного диску та призводить до залишкових змін у чавуні, а це в свою чергу призводить до зниження коефіцієнту тертя. На рис. 2.7 і 2.8. показано експериментальні данні. Повний алгоритм розрахунку температурного поля в дискових гальмах по всій поверхні колодки представлений у *додатку*.

Таким чином, застосування комп'ютерного моделювання дозволяє конструкторам значно скоротити обсяг високовартісних експериментальних випробувань та поповнити банк даних для теплового розрахунку дискових гальм АТЗ.

### 3.3. Залишкові зміни в матеріалах при визначенні температури гальмування

Для елементів пар тертя, що працюють в режимі рідко повторюваних гальмувань (подальше гальмування виконується після охолодження гальма), структура і властивості робочого шару визначаються комплексом поточних

змін, що реалізуються в процесі виконання одноразового гальмування, і накопиченням залишкових і необоротних змін при подальших взаємодіях фрикційних елементів.

Зміна структури і обумовлені цим зміни механічних і теплофізичних властивостей контактуючих матеріалів можуть привести у ряді випадків до зміни температури при терті при постійних початкових параметрах гальмування (швидкість, навантаження, робота гальмування).

Аналіз впливу поточних змін в контактуючих матеріалах, зокрема, деяких механічних і теплофізичних характеристик на температуру тертя фрикційних елементів виконаний у ряді робіт [6-8,10]. Так, наприклад, в [6] розглянуті питання аналітичного визначення температури тертя при різній залежності теплофізичних властивостей ( $\alpha$ ,  $a$ ,  $c$ ) від температури і показано, що розбіжність з результатами розрахунку температури, виконаного при постійних початкових значеннях властивостей матеріалів, може складати 20...25%. Аналогічні дані наводяться в [7]. У [8, 10] показана можливість використання усереднених за цикл (гальмування) теплофізичних властивостей матеріалів при розрахунку температурного режиму гальма.

Справжня робота має на меті проаналізувати вплив характеру залишкових змін в матеріалах фрикційних елементів, що накопичуються в процесі повторних гальмувань, на результати розрахунку; температури поверхні тертя.

Дослідження проводилися на прикладі серійною фрикційною париметалокераміка ФМК-11 - чавун 4НМХ, використовуваною в тяжелонагруджених гальмівних пристроях.

Розрахунок температури поверхні тертя проводився згідно[5]:

$$v_{\max} = v' + v_{\text{ВСП}}, \quad (3.64)$$

$$v' = \frac{\left. \begin{matrix} 1-\alpha_{ra} \\ \alpha_{mn} \end{matrix} \right\} \cdot W_{III} \cdot b_{1,2} \left[ \tau_N \cdot \left( \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \cdot \sum \frac{1}{n^2} \cdot e^{-(\pi n)^2 FO_{1,2} \tau} \right) + FO_{1,2} \cdot \tau_W \right]}{\lambda_{1,2} \cdot A_{K1,2} \cdot t_m}, \quad (3.65)$$

$$v_{BCII} = \frac{1,73 a_2^{\frac{1}{2}} f_t p_t v_t A_k d_r}{A_r \left[ 4 \lambda_1 a_2^{\frac{1}{2}} + \lambda_2 (\pi d_r v_t)^{\frac{1}{2}} \right]}, \quad (3.66)$$

де  $\mathcal{G}'$  — середня температура поверхні;

$\mathcal{G}_{BCII}$  — температура на фактичних плямах контакту - температурний спалах.

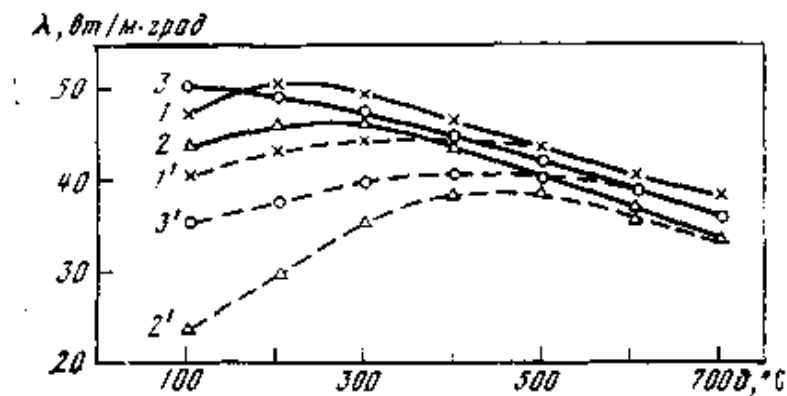


Рис. 3.11. Зміна теплопровідності що відпалюють і загартованих сталей і чавуну при нагріві (1,1'—сталь 45; 2,2'—сталь У8; 3,3' — чавун; 1', 2', 3' — загартований стан)

Для даних матеріалів при роботі в важелонагружених гальмівних пристроях характерне протікання фазового перетворення з утворенням залишкових (вторинних) структур аустеніто-мартенситного типу при початковій перлитовій. Ці структури на різних етапах випробувань і роботи гальма мають різний ступінь дисперсності, причому із збільшенням числа гальмувань, як правило, спостерігається необоротне укрупнення структури унаслідок багатократних нагрівів.

Вторинні структури аустеніто-мартенситного типу характеризуються підвищеною в порівнянні з початковою твердістю і зниженою тепло- і

температуропроводністю. Слід зазначити, що змінюється також характер температурної залежності цих властивостей в порівнянні з початковим станом матеріалів. Якщо для перлитових структур, що відпалюють, характерне зменшення тепло- і температуропроводності у міру збільшення температури нагріву, то для структур гарту (мартенсіт, аустеніт) при нагріві відбувається збільшення  $\lambda$  і  $\alpha$ . На рис. 3.11. показані ці залежності для деяких матеріалів в станах, що відпалюють. При температурі 500-700°C (залежно від змісту зв'язаного вуглецю) спостерігається вирівнювання властивостей.

Окрім зміни теплофізичних властивостей матеріалів унаслідок фазових перетворень, відоме явище поступового пониження теплопровідності при укрупненні структури сталей і чавунів, викликаному тривалими багатократними нагріваними при температурі теплового старіння [9]. Температура теплового старіння складає для різних мазкий сталей і чавунів 400-700 °C, що відповідає об'ємній температурі фрикційних елементів гальм, що працюють при важких теплових режимах.

Таким чином, зміна теплофізичних властивостей матеріалів при утворенні вторинних структур гартівного типу і тепловому старінні може виявитися вельми істотною і вносити помітну погрішність до розрахунків температури для тих режимів гальмування, де об'ємна температура фрикційних елементів нижче за температуру вирівнювання теплофізичних властивостей матеріалів в початковому і працюючому стані.

Збільшення твердості вторинних структур в порівнянні з початковою також може зробити істотний вплив на температуру поверхні тертя фрикційних елементів унаслідок зміни площі фактичного контакту ( $A_r = P/HB$ ).

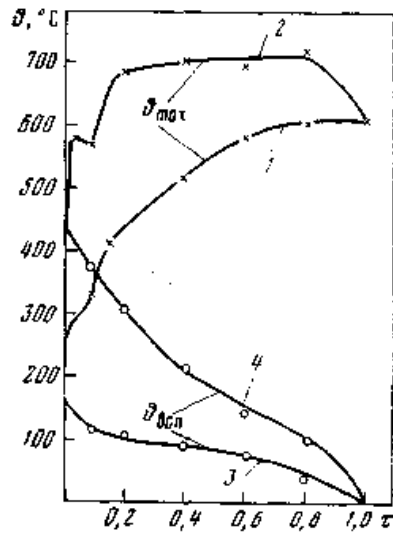


Рис. 3.12. Зміна температури поверхні тертя пари ФМК-11+ЧНМХ в процесі гальмування (1,3-розрахунок  $T_{BCП}$  і  $T_{MAX}$  на початкові властивості матеріалів; 2,4-розрахунок  $T_{BCП}$  і  $T_{MAX}$  з урахуванням залишкових змін в структурі)

При аналізі впливу залишкової (вторинною) твердості на результати розрахункового визначення температури спалаху на фактичній плямі контакту необхідно зупинитися на наступній обставині.

Працюючі фрикційні елементи характеризуються значним перепадом твердості по товщині унаслідок неоднорідності структури, викликаної перепадом температури. Наявність перепаду твердості приводить до того, що залежно від вживаного методу визначення твердості поверхні (розмір індентора, навантаження, глибина впровадження індентора) результати вимірів істотно розрізняються.

У табл. 3.3 представлені результати вимірів твердості поверхні зразка ФМК-11 після 50 гальмувань і розрахункові значення температурного спалаху  $T_{BCП}$ . Можна бачити істотну відмінність в значеннях температурного спалаху, прорахованих для різних умов вимірів твердості.

Результати вимірів твердості поверхні зразка ФМК-11 після 50  
гальмувань

Індентор	Навантаження Р, кг	Глибина впровадження h, мкм	Твердість	$\tau_{BCП}, ^\circ\text{C}$
Сталева кулька діаметром, мм:				
2,5	187,5	185	НВ130	198
1,588	100	80	HRB90(НВ187)	286
Діамантова піраміда	5	25	HV358(НВ352)	436

Визначення оптимальної товщини шару матеріалу або глибини впровадження індентора h при вимірі твердості, необхідної для розрахунку фактичної площі контакту, пов'язано з необхідністю обліку ефективної товщини поверхневого шару. Властивості останнього визначають характер взаємодії контактуючих поверхонь і, відповідно, генерування тепла в процесі гальмування.

Вважаючи, що цей шар має дорівнювати глибині розповсюдження максимальної пластичної деформації (тепогенеруючий шар), проведемо орієнтовну оцінку глибини розповсюдження максимальної пластичної деформації  $h_s$ , згідно [10]:

$$h_s = \sqrt{10rh}, \quad (3.67)$$

де r- радіус закруглення мікронерівності; h - глибина впровадження.

Для досліджуваних матеріалів і режимів гальмування  $r = 75\text{-}200$  мк,  $h_{\max} = 2\text{-}4,1$  мк. Приймаючи глибину впровадження нерівності  $h = 0,1 h_{\max}$ , набуваємо значень  $h_s = 15\text{—}30$  мк.

На рис. 3.12 приведені розрахункові значення температури поверхні тертя при гальмуванні, отримані з урахуванням залишкових змін в матеріалах пари. Розрахунок проводився для режиму гальмування,  $W_{\text{тп}} = 420 \text{ кгм/см}^2$ ,  $p_a = 7,5 \text{ кг/см}^2$ ,  $v_0 = 20 \text{ м/сек}$  за умови рівномірного розподіленого теплового потоку.

Зіставлення цих значень з результатами розрахунку температури поверхні фрикційних елементів при початкових властивостях матеріалів показує, що температура поверхні істотно збільшується при повторних гальмуваннях, головним чином в результаті збільшення температури спалаху, який зростає при збільшенні твердості поверхневих шарів контактуючих матеріалів.

Приведені розрахунки виконані при максимальних значеннях твердості, отриманих після випробувань фрикційних елементів. Враховуючи реальну неоднорідність структури і властивостей по поверхні тертя при виконанні одноразового гальмування і від гальмування до гальмування унаслідок нерівномірного контакту фрикційних елементів і нерівномірного розподілу температури по поверхні тертя [6], ці результати слід розглядати як граничні для оцінки максимального рівня температур, що досягаються при гальмуванні.

#### 3.4. Дорожні випробування нових дискових гальмових механізмів

Мета дорожніх випробувань дискових гальмових механізмів полягала у підтвердженні їх основних характеристик, одержаних при випробуваннях на інерційному стенді, з'ясуванні можливості їх сумісного використання з барабанными гальмами, оцінці часу спрацювання контурів приводу та впливу дискових гальм на стійкість руху автобуса при гальмуванні. Крім цього вирішувалася важлива задача з оцінки можливості компоновки



спроєктованих дискових гальм в просторі, відведеному для барабанних гальм, з дотриманням умови щодо створення гальмівного моменту необхідного рівня. Аналізувалися також на практичному рівні питання простоти технічного обслуговування і, перш за все, заміни фрикційних накладок.

#### 3.4.1. Дисковий гальмовий механізм з клиново - роликовим

перетворювачем, розташованим перпендикулярно до гальмового диску

Для проведення дорожніх випробувань вказані гальмові механізми були змонтовані на передній осі автобуса ЛАЗ-4202 (рис. 3.13). Цим самим було підтверджено, що спроектований дисковий гальмовий механізм разом з гальмовою камерою компактно вписується в простір, відведений для гальмового механізму.

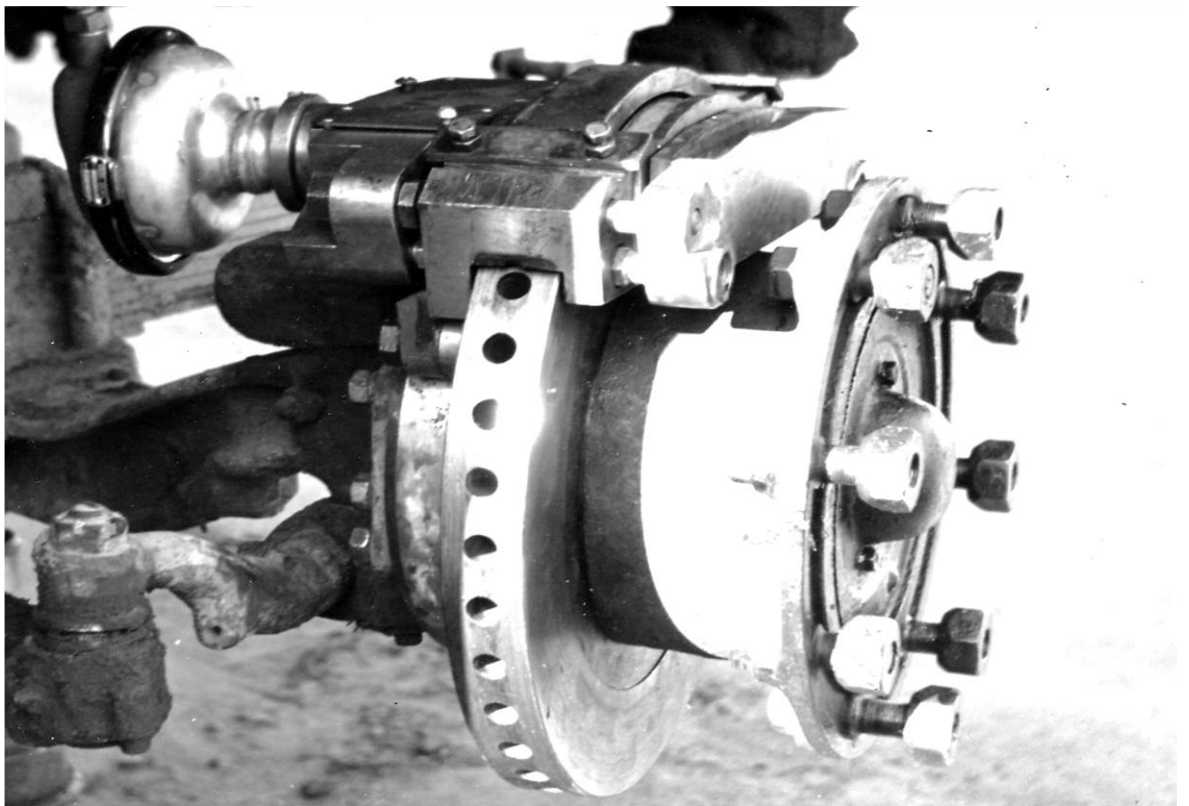
Після проведення випробувань гальмової системи автобуса з передніми дисковими гальмами за програмою типових випробувань 0 і II встановлено, що робоча гальмова система автобуса задовольняє вимогам випробувань 0. В кінці попереднього етапу випробувань II середнє значення температури поверхні тертя було на 9% нижче від тих значень, які одержані при лабораторних дослідженнях, а залишкова ефективність при цих випробуваннях склала 81% від ефективності холодних гальм. Час спрацювання передньої вітки приводу не перевищував 0,4с.

Проведені дослідження показали, що розроблений дисковий гальмовий механізм є працездатним, має достатню ефективність та високу стабільність характеристик, що забезпечило курсову стійкість автобуса при

гальмуваннях. Відзначена простота монтажу гальмового механізму на автобус та мала трудомісткість заміни фрикційних накладок.

#### 3.4.2. Дисковий гальмовий механізм з гідравлічним приводом

Для проведення дорожніх випробувань дослідні зразки дискових гальм встановлювалися на передні колеса автобуса середнього класу ЛАЗ-4202 (рис. 3.14). Дослідженнями в дорожніх умовах (рис. 3.15) встановлено, що гальмівний момент, досягнутий дисковими гальмами, на 25% перевищив момент, який створювався передніми барабанними гальмами, що позитивно відбилося на загальній ефективності гальмової системи автобуса. Час спрацьовування передньої вітки приводу склав 0,4 с, а задньої – 0,6 с.



а



Випробовування 0 і II, проведені в дорожніх умовах, в цілому підтвердили результати стендових випробувань. При гальмуванні зі швидкості 16,7 м/с гальмовий шлях склав 29,5 м при випробовуваннях 0 і 39,9 м при випробовуваннях II (при регламентованих значеннях відповідно 36,7 м та 45,8 м). В процесі випробувань не спостерігалось порушення



курсової стійкості автобуса, що пояснюється випереджуючим блокуванням передніх коліс, а також високою стабільністю характеристик передніх дискових гальм.

Таким чином, методом лабораторних та дорожніх досліджень доведена можливість ефективного використання на автобусах дискових гальмових механізмів з гідравлічним приводом.

### 3.5. Висновок до розділу

1. Розроблена математична модель визначення розподілу температурних полів в дискових гальмах при тривалому режимі гальмування з урахуванням теплофізичних властивостей фрикційних матеріалів.

2. В результаті аналізу дорожніх досліджень встановлено, що на автобусах середнього та великого класів можна успішно застосовувати дискові гальмові механізми з гідравлічним приводом, конструкція силових скоб яких в автомобілебудуванні відпрацьована і не вимагає додаткових механічних перетворювачів, причому силовий привод гальма пропонується виконувати у вигляді однієї скоби.

3. Досліджено розподіл температур колодки по всій ширині. Виявлено, що тільки на 3-й хвилині випробувань помітний прогрів колодки поза зоною тертя за рахунок кондуктивного теплообміну.

4. Математична модель адекватно відобразила розподіл температурних полів експериментальних випробувань ДТМ для автобуса ЛіАЗ-5256.

У результаті аналітичних досліджень обгрунтован вибір раціонального фрикційного матеріалу для колодок ДТМ автобуса ЛіАЗ-5256.

5. Застосування комп'ютерного та математичного моделювання експериментів дають змогу значно скоротити обсяги високовартісних натурних випробувань гальмових механізмів для отримання бази даних з метою їх концептуального проектування.

## РОЗДІЛ 4. НОВІ ФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ДИСКОВИХ ГАЛЬМ ТРАНСПОРТНИХ МАШИН

### 4.1. Фрикційні гальмівні матеріали для гальм транспортних машин

Стійка тенденція зростання об'ємів вантажних і пасажирських перевезень на автомобільному транспорті вимагає постійного підвищення безпеки і надійності цих перевезень. Перш за все, цьому сприяє підвищення надійності гальмівних систем.

У механічних гальмівних системах застосовуються різні фрикційні матеріали: чавун (сірий, перлитовий, фосфорний, титановий - і модифікації); композиційні (азбестові і безазбестові, з різноманітними компонентами) і металокерамічні [33-39]. Аналіз експериментальних досліджень указує на істотну залежність основного вихідного параметра фрикційного сполучення - коефіцієнта

тертя, що реалізовується, - як миттєвих, так і середніх його значень, від питомого тиску і швидкості ковзання, які визначають роботу сил тертя на контакті.

Температура поверхні фрикційного сполучення пропорційна роботі сил тертя на контакті і є інтегральним чинником, в основному і що визначає триботехнічні показники пари тертя.

Вплив температури контактної поверхні фрикційного сполучення, що виникає унаслідок роботи сил тертя при різних поєднаннях питомого тиску і швидкості ковзання, на характер зміни коефіцієнта тертя вивчено недостатньо.

За умовами температурної напруженості фрикційного сполучення гальмівні пристрої колодок рухомого складу відповідають середньому (до 600°C), а при тривалому гальмуванні і на спусках, важкому режимам роботи (до 1000°C).

Випробування натурних гальмівних колодок з чавуну в діапазоні до 250 км/год показали, що на поверхні катання коліс при початковій швидкості гальмування 120 км/год і вище утворюються поперечні термічні тріщини. Тривале або екстрене гальмування з початкових швидкостей 120-140 км/год приводило до місцевого перегріву контактних поверхонь коліс і колодок із-за високих локальних температур на фрикційному контакті. При цьому відбувалися необоротні структурні утворення мартенситу в колісній сталі, а на поверхні катання коліс при подальших гальмуваннях утворювалися задираки і термотрещини [39]. Відмічені також випадки спалаху колодок зменшеної довжини з фосфорного чавуну при зупинному гальмуванні з швидкості 140 км/год [43].

Триботехнічні властивості чавунних гальмівних колодок будь-якого типу зумовили експлуатаційні межі їх застосування до швидкості 140 км/год при осьовому навантаженні 210 кН і гальмівній потужності на осі не більше 450 кВт.

Композиційні гальмівні колодки Ярославського ОАО «ФРІТЕКС» на тому, що каучуковому пов'язує (азбестові і безазбестові) типу ТІІР-300, 303, 308 і 2110 не надають такої негативної дії на поверхні катання коліс як чавунні. Навіть при підвищеній швидкості почала гальмування вони мають стабільніший коефіцієнт тертя, підвищений ресурс і кращі показники по рівню шуму при гальмуванні. Приблизно такі ж характеристики мають композиційні колодки з матеріалу V-BKS типів LL, L, K і K-hoch [32, 47]. На коефіцієнт тертя роблять вплив вологість і висока температура.

Низька теплопровідність композиційних матеріалів  $\lambda = 0,8...3,3$  Вт/(м·К), порівняно з чавунними  $\lambda = 21...50$  Вт/(м·К), при тривалому або екстремому гальмуванні сприяє локальному перегріву на контакті і може викликати необоротні структурні перетворення того, що пов'язує колодок (смоли або каучуку).

Композиційні гальмівні колодки зазвичай застосовуються при швидкостях руху до 160 км/год.

Приведений аналіз показує, що експлуатаційні межі застосування простих і економічних гальмівних пристроїв з чавунними, композиційними або металокерамічними колодками обумовлені руйнівною термічною дією на контактні поверхні коліс і гальмівних колодок.

Застосування на високошвидкісному рухомому складі механічних дискових гальмівних пристроїв, унаслідок вищого теплообміну і інтенсивного відведення тепла, дозволило підвищити енергію гальмування на колесах до 60 МДж і забезпечити гальмівну потужність на осі в діапазоні 530...800 кВт [42]. У таких пристроях гальмівні диски виготовлені з чавуну (сірого або з кулястим графітом), легованої сталі або алюмінію, армованого карбідом кремнію SiC, а гальмівні накладки - металокерамічні на основі заліза, бронзи або міді (металломатрічні композити).



При максимальній розрахунковій температурі 600°C фактична температура в зоні плям пріжога диска і накладки фрикційного сполучення дискових гальм досягає 800...1000°C [43].

До перспективних дискових гальм на сприйняття енергії гальмування на одній колісній парі до 100 МДж і гальмівній потужності до 1100 кВт пред'являється ряд вимог: початкова швидкість гальмування 300...350 км/год, стабільний коефіцієнт тертя в діапазоні 0,32...0,44, високі термостійкість, теплопровідність і зносостійкість. Такі високі вимоги можуть бути виконані тільки при використанні принципово нових фрикційних матеріалів на основі графітових волокон і кремнієвої кераміки. Відомо, що такі дослідження ведуться достатньо інтенсивно [35, 43].

#### 4.2. Нові вуглець - вуглецеві фрикційні матеріали

Проблема гальмування стає особливо актуальною у зв'язку з розвитком і вдосконаленням транспортних, транспортуючих, вантажопідйомних і інших машин і механізмів, що нерозривно пов'язане з постійним зростанням їх потужності і швидкості руху. Ефективність гальмування, визначувана енергоємністю гальмівних пристроїв, часом гальмування і величиною гальмівного шляху, залежить, перш за все, від тертя, що реалізовується у фрикційній парі коефіцієнта, на величину якого робить вплив безліч чинників детермінованого і випадкового характеру. До ведучих з них, як показує практика, слід віднести навантаження, матеріали фрикційної пари, швидкість ковзання і температурний режим в зоні контакту.

Як гальмівні колодки для роботи по ковкому залізу, чавуну або сталі (гальмівні барабани і шківи, ходові колеса гальмівних осей рейкових екіпажів) використовувалися в різний час різні матеріали: дерево (дуб, липа - вздовж і поперек волокон), шкіра, ковке залізо, сталь, чавун (різні

модифікації), сталева стрічка, асбофрікційні (наприклад - ЕМ-2, 6КФ-58 і ін.), композиційні металокерамічні і так далі.

Останніми роками в автомобільному і залізничному транспорті широкого і обґрунтованого поширення із-за високої енергоємності набули дискові гальмівні пристрої, в яких гальмівні диски виготовлені з чавуну (сірого або з кулястим графітом), легованої сталі або алюмінію, армованого карбідом кремнію SiC, а гальмівні накладки - з фрикційного металокерамічного матеріалу на основі заліза, бронзи або міді. Вже досягнута енергоємність одного гальмівного диска в 15...22 МДж, випробовуються пристрою на поглинання енергії в 28...40 МДж і більш. У авіації і в гоночних автомобілях «Формули-1» використовуються дискові гальма з новою вуглець-вуглецевою парою тертя, що працює на максимальній швидкості 500 км/год і граничною температурою орієнтування 1200°C, відмічені недоліки - окислення і чутливість до низьких температур [40].

Питанням дослідження гальмівних пристроїв і їх температурними напруженості присвячені роботи: Александрова М.П., Чудакова Е.А., Чичинадзе А.В., Іноземцева В.Г., Дау Т.А., Лінга Ф.Ф., Чиковані М.Г., Федосєєва В.Н., Іванова Л. Е., Вольченко А. І., і ін. [20 - 27].

Аналіз показує, що в сучасних умовах фрикційні матеріали, що серійно випускаються, вживані в гальмівних пристроях, не повною мірою забезпечують стабільність роботи і необхідний рівень надійності. Наприклад, асбофрікційний матеріал типу ЕМ-2 (ГОСТ 15960-70) [41] має середні показники по коефіцієнту тертя, проте величина останнього значно зменшується із зростанням температури в контактній зоні в процесі гальмування. Так, при нагріві до 350°C середня величина коефіцієнта тертя цього матеріалу зменшується більш ніж в два рази, що свідчить про істотну залежність від температури і недостатньої стабільності робочих якостей.

Широко використовувані в даний час композиційні гальмівні накладки складаються з органічної терпкої основи (синтетичні смоли, каучук) і різних наповнювачів (волокно, металева крихта і так далі), термічне зміцнення матеріалу виконується після заливки цієї суміші в спеціальну форму. Аналіз працездатності показав істотну залежність фрикційних властивостей таких матеріалів від температури, при цьому спостерігається зниження коефіцієнта тертя з руйнуванням матеріалу і виділенням газу, покриття поверхонь, що труться, склоподібним шаром після охолодження, зміна структури органічної основи і навіть обвуглювання після тривалого перегріву, істотний вплив надає і темп наростання температури  $dt/dt$  °C/c.

Разом з тим, Національним науковим центром Харківський фізико-технічний інститут (ННЦ ХФТІ) спільно із Запорізьким підприємством «Углекомполіт» розроблена і успішно освоєна на виробництві спеціальна технологія виготовлення нових фрикційних матеріалів на основі вуглецевої матриці зміцненої вуглецевим волокном, що мають стабільний коефіцієнт тертя і низький рівень зносу при високих температурах в зоні контакту поверхонь, що труться. Університетом, за угодою сторін, проводяться всесторонні фізико-механічні випробування нових матеріалів.

Враховуючи приведені, метою роботи є встановлення закономірностей зміни коефіцієнта тертя залежно від температурного режиму в процесі гальмування і визначення зносостійкості серійних і нових фрикційних матеріалів для гальмівних пристроїв на підставі результатів натурних порівняльних експериментальних досліджень.

Випробування проводилися на спеціально обладнаній експериментальній установці інерційного типу, на якій були встановлені гальмівні колодки з накладками із звичайного фрикційного матеріалу EM-2, а потім, в наступній серії дослідів, з нового вуглерод-композиційного матеріалу під умовним

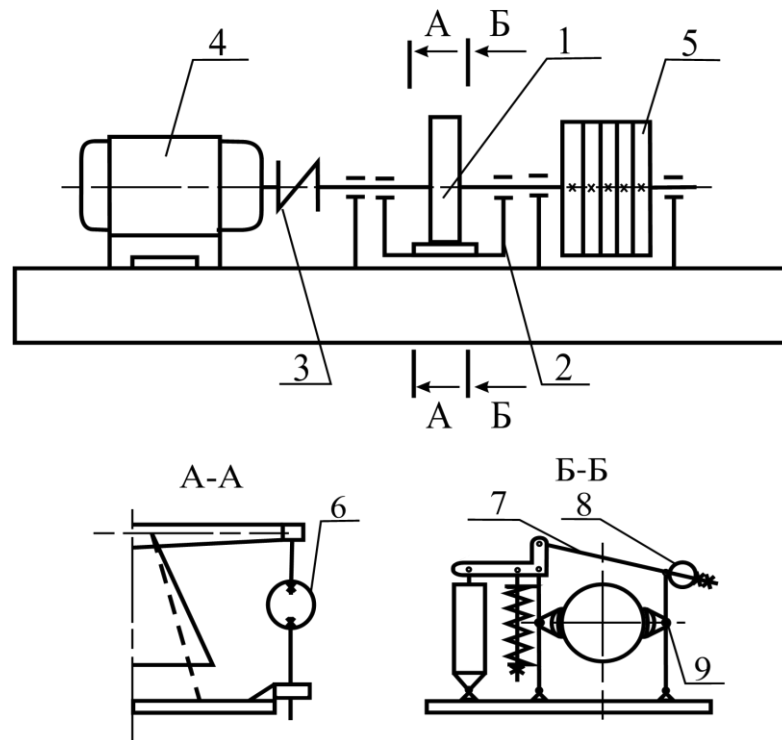
найменуванням СК-07.04, решта всіх параметрів і установок була абсолютно ідентичними [30].

Експериментальна установка (рис.4.1) складається з серійного гальмівного пристрою колодки типу ТКТГ-200, позиція 1, встановленого на рамі, що коливається, 2, пружної муфти 3, що зв'язує електродвигун 4 з гальмівним шківом і інерційною маховою масою 5, складається з шести набірних тарованих чавунних дисків. В процесі випробувань в широких межах можуть змінюватися момент інерції (від 8 до 60 кг·м<sup>2</sup>), частота обертання валу двигуна (до 1500 об/хв), нормальна сила притиснення колодок до гальмівного шківа, тривалість роботи приводу і температура на контактній поверхні (до 600°C).

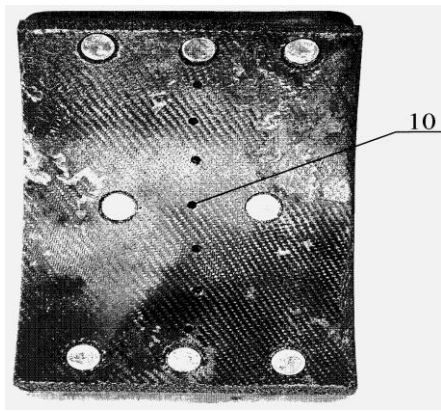
Для реєстрації прийняті наступні вихідні параметри: гальмівний момент, зусилля в замикаючій тязі, час розмикання гальма і розгону приводу, час спрацьовування і гальмування, частота обертання приводу і температура в контактній зоні поверхонь, що труться.

Гальмівний момент вимірювався за допомогою динамометричних кілець (рис. 4.1, А-А), симетрично розташованих на рамі, що коливається, 2 установки по обидві сторони гальма, і на яких розміщені тензорезистори 6, сполучені по напівмостовій схемі. Зусилля в замикаючій тязі 7, пропорційне гальмівному моменту, вимірювалося за допомогою тензодатчиків 8, а зусилля зчеплення фрикційного матеріалу колодки з шківом - тензодатчиками 9, встановленими під пальцем гальмівної колодки.

Для перевірки достовірності вимірювань сила зчеплення додатково визначалася за допомогою датчиків 6, розбіжність отриманих результатів



склало не більше 5 %. Температура контактної зони фрикційних поверхонь вимірювалася сім'ю термопарами 10 (рис. 4.2), встановленими в тілі гальмівної накладки симетрично по її довжині і на відстані 0,1 мм від поверхні тертя гальмівного шківа. Електричні сигнали з датчиків реєструвалися на ПЕВМ зі встроєною платою Sdi-adc14-32f [36]. Типова осцилограма записів вимірювань показана на рис. 4.3, де по осі ординат вказаний відповідний вихідним параметрам електричний еквівалент, а по осі абсцис - реальна відмітка часу в секундах, при цьому прийняті наступні позначення: 1 – швидкість обертання гальмівного шківа  $n$ , об/хв; 2 – гальмівний момент  $M_T$ , Н·м; 3 – зусилля в замикаючій тязі  $F$ , Н; 4 – зусилля зчеплення фрикційних поверхонь  $F_{сц}$ , Н; 5 – 11 – температура поверхні тертя гальмівної накладки по її довжині для матеріалу СК-07.04.



Час гальмування вимірювався від моменту того, що стосується гальмівних колодок поверхні шківа до моменту повної зупинки приводу.

Випробування проводилися в температурному діапазоні від 15 до

Рис. 4.2. Схеми розташування тензодатчиків

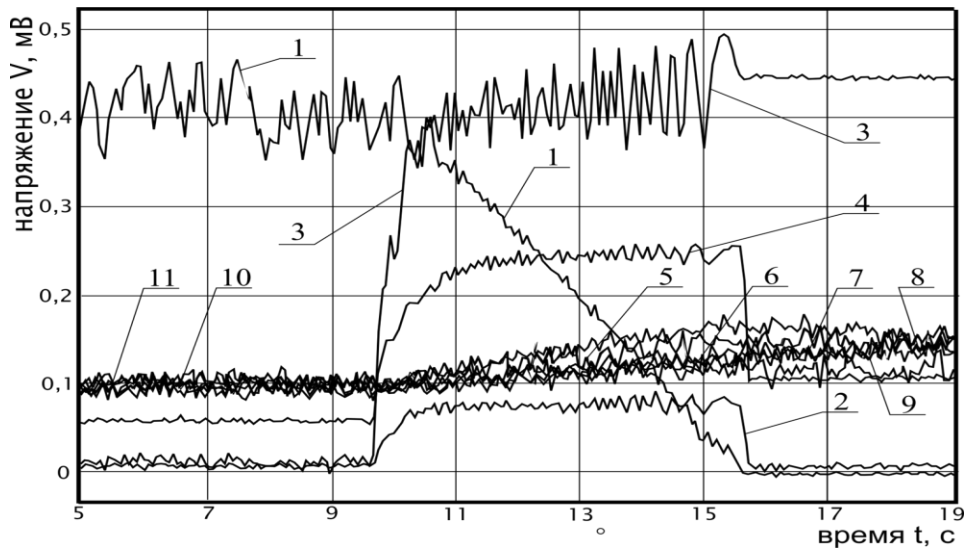


Рис. 4.3. Характерна ліянка осцилограми процесу гальмування з вуглепол-325°C який є характерним для роботи гальмівних пристроїв легкої і середньої групи температурної навантаженості, із зусиллям притиснення однієї колодки рівним 1580 Н, що відповідає гальмівному моменту 200 Н·м. На жаль, провести випробування при вищих температурах не дозволили технічні можливості експериментальної установки, у зв'язку з місцевим температурним перегрівом тензодатчиків 9 і можливим спотворенням їх свідчень, і потім унаслідок натурального займання асбофрікційного матеріалу EM-2 при температурі 315°C. Новий фрикційний матеріал СК-07.04 в серії дослідів при максимальній, за умовами випробувань, температурі 350°C працював абсолютно задовільно і без зауважень, проте, у зв'язку з можливим спотворенням свідчень тензодатчиків 9, ці дані не включені в

інформаційну вибірку для подальшої обробки методами математичної статистики і теорії вірогідності.

Результати випробувань у вигляді фактичних даних (+ і ·) і апроксимуючих залежностей після статистичної обробки приведені на рис. 4.4.

Коефіцієнт тертя є основним параметром стохастичного нестационарного процесу гальмування, тому його залежність від температури представлена у вигляді поля вірогідних значень (рис. 4.4), що включає між верхніми (криві 3 і 6) і нижніми (криві 2 і 5) граничними кривими 99,9% фактичних даних за наслідками випробувань, при цьому залежності середніх значень, що є апроксимуючими кривими 1 і 4, можуть бути прийняті як апроксимація по математичних очікуваннях приватних розподілів випадкової величини коефіцієнта тертя при фіксованих значеннях температури у вузькому діапазоні значень (5-10 °С), оскільки результати окремої серії дослідів свідчать про те, що розподіл значень коефіцієнта тертя при фіксованій температурі слідує нормальному закону розподілу випадкової величини при задовільному значенні критерію згоди Пірсона  $P(\chi^2) = 0,68$ . Криві 1,2 і 3 показують поле вірогідних значень нового матеріалу СК-07.04, а криві 4,5 і 6 - серійного матеріалу ЕМ-2. Для порівняння там же приведена крива 7, що показує залежність коефіцієнта тертя від температури

для фрикційного матеріалу 6КФ-58 за даними М.П. Александрова [20].

Аналіз результатів випробувань показав, що фрикційні властивості серійних (ЕМ-2) і нових вуглець-композиційних

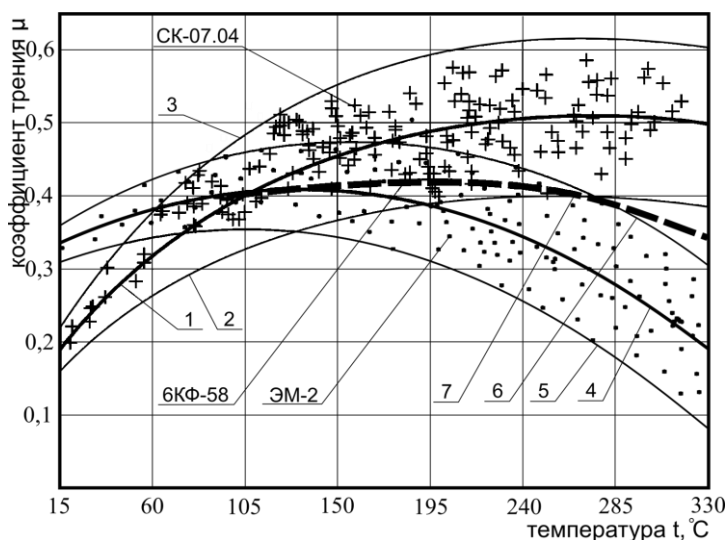


Рис. 4.4. Залежність коефіцієнта тертя від температури в зоні контакту поверхонь, що тереться одна по другій по розмірній послідовності N=1580

гальмівних накладок (СК-07.04) істотно відрізняються.

У серійного матеріалу при нагріві до 105°C спостерігається незначне зростання коефіцієнта тертя з 0,34 до 0,4, а потім різке зниження до величини 0,2 при  $t = 325^{\circ}\text{C}$ , при цьому практично відсутній період стабілізації. У вуглець-композиційного матеріалу спостерігається постійне зростання коефіцієнта тертя з 0,2 до 0,5 при нагріванні зони контакту від 15 до 200°C, після чого слідує період стабілізації до 325°C і потім, можливо, повільне зниження. Очевидно, що новий матеріал значно перевершує серійні (ЕМ-2 і БКФ-58), як по величині коефіцієнта тертя, що реалізовується, так і по термостійкості.

Висока стійкість нового матеріалу до дії температури в контактній зоні і збереження при цьому високого коефіцієнта тертя (близько 0,5 в діапазоні температур 200...350°C), дозволяє рекомендувати його використання в машинах і механізмах з важкими режимами експлуатації, особливо в транспортних машинах (автомобілі, локомотиви і вагони) при тривалих і частих гальмуваннях. Крім того, використання нового матеріалу дозволяє підвищити безпеку руху у випадках екстреного (аварійного) гальмування.

Слід зазначити і загальні властивості для згаданих фрикційних матеріалів (ЕМ-2, СК-07.04, БКФ-58): при підвищенні температури в контактній зоні поверхонь, що труться, коефіцієнт тертя збільшується і проходить через максимум, а потім по-різному для кожного з них, - але убуває, при цьому, чим вище температура почала зниження коефіцієнта тертя, тим більше термостійкість матеріалу.

Зносостійкість серійного і нового матеріалів визначалася ваговим методом, випробування проводилися для кожного матеріалу в перебігу одного робочого тижня при восьмигодинному робочому дні поодиноці і тому ж графіку навантаження. В результаті встановлено, що вуглець-композиційний



матеріал СК-07.04 має значно вищу зносостійкість порівняно з асбофрикційним матеріалом ЕМ-2, знос першого склав небагато чим більше 7% від такого ж показника серійного матеріалу.

Для продовження експериментальних досліджень і уточнення результатів виконується модернізація експериментальної установки, яка повинна забезпечити проведення випробувань при температурі до 600°C і вище, а також при низьких температурах.

Новий фрикційний вуглець-композиційний матеріал СК-07.04 на основі вуглецевої матриці, зміцненої вуглецевим волокном, істотно перевершує серійні матеріали, як по величині коефіцієнта тертя, що реалізовується, так і по термостійкості. При температурі в контактній зоні поверхонь, що труться, від 200 до 350°C коефіцієнт тертя стабілізується на рівні 0,5, а потім наголошується тенденція до повільного зниження.

Новий матеріал СК-07.04 має значно вищу зносостійкість, що підтверджується тривалими випробуваннями на знос по ваговому методу, порівняно з серійним матеріалом знос склав небагато чим більше 7%.

На підставі результатів експериментальних досліджень новий матеріал СК-07.04 може бути рекомендований для використання на досвідченій партії транспортних машин (автомобілі, локомотиви і вагони), особливо для важких умов експлуатації з тривалим і частим гальмуванням.

Підвищення ефективності гальмування шляхом застосування нового фрикційного матеріалу дозволяє не тільки підвищити безпеку руху, але і забезпечити мінімізацію гальмівного шляху і часу гальмування.

Впродовж ряду років авторами проводяться досвідчені і експериментальні дослідження фрикційних матеріалів для гальмівних пристроїв у вигляді вуглець-вуглецевих (С-С) композиційних матеріалів, які можуть бути використані для виготовлення гальмівних колодок, дисків і накладок до них. Подібні фрикційні матеріали застосовуються в дискових гальмах спортивних автомобілів і в авіації.

Однією з основних переваг вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (В-ВКМ) є здатність зберігати достатньо високі пружні і прочностні характеристики при роботі в умовах дуже високих температур.

Для виготовлення фрикційних В-ВКМ розроблена нова спеціальна технологія з використанням термоградієнтних газофазних методів ущільнення піроуглеродом пористих середовищ [37-39]. Основою нових матеріалів є вуглецева матриця з різними зміцнюючими каркасами з вуглецевих волокон і модифікуючими наповнювачами. Механічними, термічними і фізичними властивостями В-ВКМ можна управляти зміною параметрів армуючого каркаса (орієнтація і об'ємний зміст волокон по напрямках, щільність, тип нитки і вид волокон), вибором типу матриці і способом її отримання, використанням різних наповнювачів (оксид алюмінію –  $Al_2O_3$ , карбід бору –  $B_4C$ , аморфний бор, карбід кремнію -  $SiC$  і так далі).

Технологічний процес виготовлення фрикційних В-ВКМ відпрацьований до промислового застосування сумісними дослідженнями Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля і Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» за участю Холдингової компанії «Луганськтепловоз».

Зразкова технологічна схема виготовлення досвідчених накладок для гальмівних колодок з внутрішнім радіусом 100 мм, завдовжки по дузі 130 мм, шириною 90 мм і завтовшки 10...20 мм полягає в наступному. З

промислового графіту була виготовлені облямовування-нагрівателі багатократного використання у вигляді кілець діаметром 180x200мм, довжина яких приймалася кратній ширині готового виробу з допуском на механічну обробку. На облямовування-нагрівателі намотували і щільно укочували відповідної ширини стрічки з вуглецевої тканини УРАЛ ТМ-4, які заздалегідь замочувалися у воді з додаванням клеївши ПВА (~ 2% об'єму) протягом 24 години. Щільність намотування складала приблизно 0,57 г/см<sup>3</sup>, що відповідає питомому вмісту вуглецевих волокон (ниток) в кінцевому матеріалі після ущільнення піроуглеродом.

Далі заготовки поміщалися в установку піролізу АГАТ- 3,2 і в потоці природного газу облямовування-нагрівателі резистивно нагрівалися до температури 1000 °С.

Ущільнення піроуглеродом проводилося методом радіально рухомої зони піролізу, загальна тривалість процесу - 54 години. Після охолодження заготовки витягувалися з установки піролізу, знімалися з облямовувань-нагрівателів і проходили механічну обробку до розмірів кінцевого виробу.

По другій технологічній схемі, для підвищення ізотропних і прочностних властивостей кінцевого матеріалу, що армує каркас може виготовлятися укладанням необхідної кількості шарів вуглецевої тканини типу УРАЛ Т-22 у взаємно перпендикулярних напрямках (12...17 шарів) з подальшим підпресуванням і прошивкою вуглецевою ниткою Урал НШ в два складання з кроком 15 мм. Такі заготовки (препреги) також встановлювалися на облямовування-нагрівателі і ущільнювалися піроуглеродом.

Матеріали, виготовлені по приведених технологічних схемах із зміцнюючими каркасами двонаправленої структури, - 2d, по своїй технологічності вже зараз можуть широко використовуватися в різних гальмівних пристроях, у тому числі і на рухомому складі. Слід зазначити, що по таких же

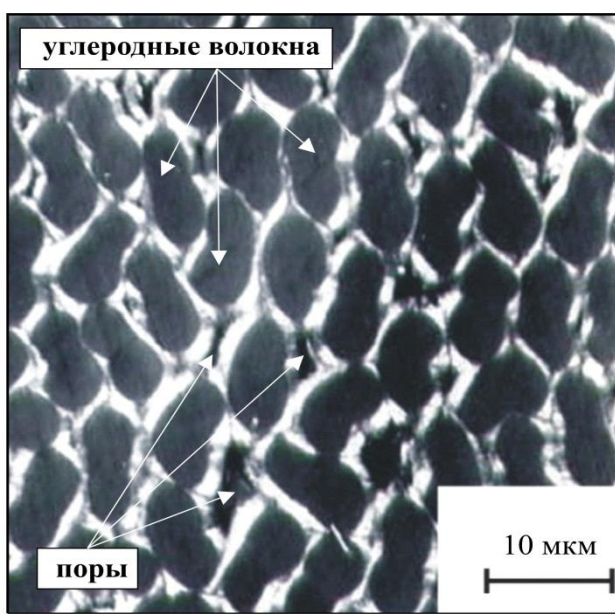
схемах можуть бути виготовлені гальмівні диски і фрикційні накладки для дискових гальм.

Значно вищі прочностні і триботехнічні властивості мають багатонаправлені В-ВКМ з використанням високомодульних вуглецевих волокон на основі поліакрілнітріла і оптимізованої просторової структури армування - 3d, 4d., nd. Проте технологія виготовлення таких матеріалів досить складна і поки що дорога.

Модифіковані В-ВКМ були отримані на основі матеріалів другої технологічної схеми армування структури 2d шляхом введення у вуглецеву матрицю твердих дрібнозернистих наповнювачів типу карбиду бору, бору аморфного і ін.

Випробування проводилися на інерційній машині тертя [30, 40], що реалізовує схему шків, що «обертається, - гальмівні колодки». Дослідні зразки були закріплені на чавунній підкладці до стійки машини тертя, пов'язаної із замикаючою тягою. Шорсткість поверхні гальмівного шківа з колісної сталі діаметром 200 мм мала відхилення нерівностей профілю порядку –  $R_a = 0,3...0,7$  мкм і відновлювалася до початкової після кожної серії дослідів. Перед записом процесу виконувалося прироблення контактної поверхні фрикційного сполучення, при цьому поверхня тертя гальмівної накладки складала не менше 80% номінальної площі контакту.

Як вихідні параметри при записі процесів гальмування були прийняті: гальмівний момент –  $M_T$ , Н·м; швидкість обертання гальмівного шківа -  $n$ , об/хв; зусилля в замикаючій тязі –  $F_z$ , Н; зусилля зчеплення фрикційних поверхонь –  $F_{ст}$ , Н; температура контактної поверхні по довжині колодки –  $t_{ki}$ , °С.



Термопары встановлювалися симетрично по подовжній осі колодки в крізних спеціальних отворах на відстані  $\sim 1$  мм від контактної поверхні. Електричні сигнали від тензодатчиків і

термопар реєструвалися на магнітному диску ПЕВМ з подальшою автоматичною обробкою результатів випробувань. Характер зміни вихідних параметрів від моменту початку гальмування до повної зупинки в реальному масштабі часу реєструвався на осцилограмах [40, 41].

Дослідні зразки (рис. 4.7) для випробувань були виготовлені з наступних матеріалів :

Рис. 4.5. Мікроструктура В-ВКМ

- вуглець-вуглецеві композитні матеріали (типу УТ4-1,2,3) (рис. 4.7,а), структури армування 2-d з вуглецевої тканини УРАЛ ТМ-4 на основі віскозних волокон, ущільнені піроуглеродом; щільність, що здається,  $1,38 \pm 0,02$  г/см<sup>3</sup>; відкрита пористість  $10 \pm 2\%$ ; пікнометрична щільність  $1,55 \pm 0,02$  г/см<sup>3</sup>; питомий зміст вуглецевого волокна  $0,57$  г/см<sup>3</sup>; піроуглерода  $0,81$  г/см<sup>3</sup>; межа міцності при стискуванні перпендикулярно шарам тканини (поверхні тертя) 160...200 МПа. Мікроструктура таких матеріалів в плоскості тертя представлена на рис. 4.5;

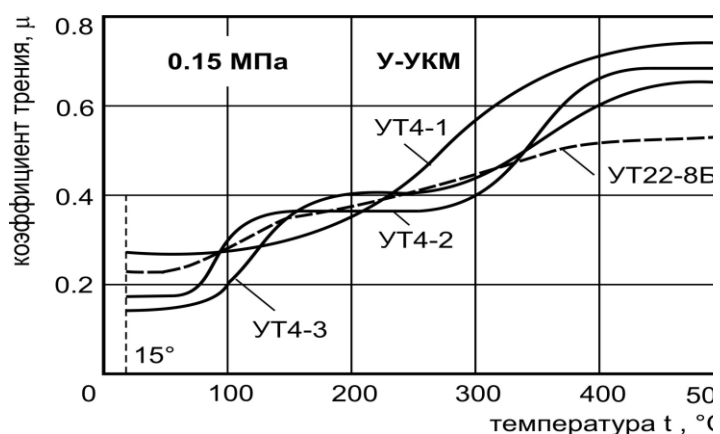
- В-ВКМ (тип УТ22-86) (рис. 4.7,б), структура армування 2-d, взаємно перпендикулярне пошарове укладання з вуглецевої тканини УРАЛ Т-22 і мідного дроту діаметром 0,15 мм, подпресован і прошитий, ущільнений піроуглеродом; щільність  $2,14$  г/см<sup>3</sup>, що здається; відкрита пористість 22,62%; пікнометрична щільність  $2,77$  г/см<sup>3</sup>;

- модифікований В-ВКМ (тип УТ22-36) (рис. 4.7,в), структура армування 2-d з вуглецевої тканини УРАЛ Т-22 по другій технологічній схемі, ущільнений піроуглеродом; щільність  $1,65$  г/см<sup>3</sup>, що здається; відкрита пористість 9,81%; пікнометрична щільність  $1,83$  г/см<sup>3</sup>; у вуглецеву матрицю введений карбід бору В<sub>4</sub>С, певній дисперсності і % зміст;

- модифікований В-ВКМ (тип УТ22-46) (рис. 4.7,г), структура армування аналогічна попередньому матеріалу, ущільнений піроуглеродом; щільність

1,56 г/см<sup>3</sup>, що здається; відкрита пористість 11,67%; пікнометрическа щільність 1,77 г/см<sup>3</sup>; відрізняється дисперсністю В<sub>4</sub>С в матриці;

- модифікований В-ВКМ (тип УТ22-106) (рис. 4.7,д), структура армування аналогічна попереднім матеріалам, подпресован і прошитий; щільність 1,50



г/см<sup>3</sup>, що здається; відкрита пористість 10,23%; пікнометрична щільність 1,67 г/см<sup>3</sup>; у матрицю пошарово введений бор аморфний.

Модифіковані В-ВКМ порівняно з «чистими» композитами мають такі ж

Рис. 4.6. Результати випробувань гальмівних

показники по питомому змісту вуглецевого волокна і піроуглерода, але володіють вищими пружними і прочностними характеристиками унаслідок заповнення пір матеріалу наповнювачем.

Випробування проводилися як порівняльні за ідентичних умов, причому питомий тиск і швидкість почала гальмування у всіх дослідях були постійними і відповідно складала – 0,15 МПа і 12,6 м/с. Попереднє розігрівання поверхні тертя з погрішністю ± 5°C виконувався багатократним пригальмовуванням, в кожній серії випробувань при встановленій постійній температурі проводилося не менше 50 вимірів.

Характер зміни коефіцієнта тертя залежно від температури в контактній зоні фрикційного сполучення для В-ВКМ матеріалів типу УТ4 і УТ22-8Б показаний на рис. 4.6.

У всіх серіях дослідів з фрикційними В-ВКМ при температурній напруженості до 500°C не відмічено яких-небудь руйнувань або пошкоджень як гальмівних накладок, так і поверхні контртіла - шківа з колісної сталі.

Аналіз результатів випробувань (рис. 4.6) показав, що коефіцієнт тертя фрикційного сполучення колісна сталь - В-ВКМ має стійку тенденцію зростання із збільшенням температури контактної поверхні.

При цьому зростання коефіцієнта тертя починалося при температурі 80...100°C і досягало свого стабільного значення  $\mu = 0,5 \dots 0,7$  після нагрівання зони контакту до температури 400°C. При малих температурах фрикційного сполучення (до 50°C) величина коефіцієнта тертя змінювалася в межах від 0,15 до 0,28.

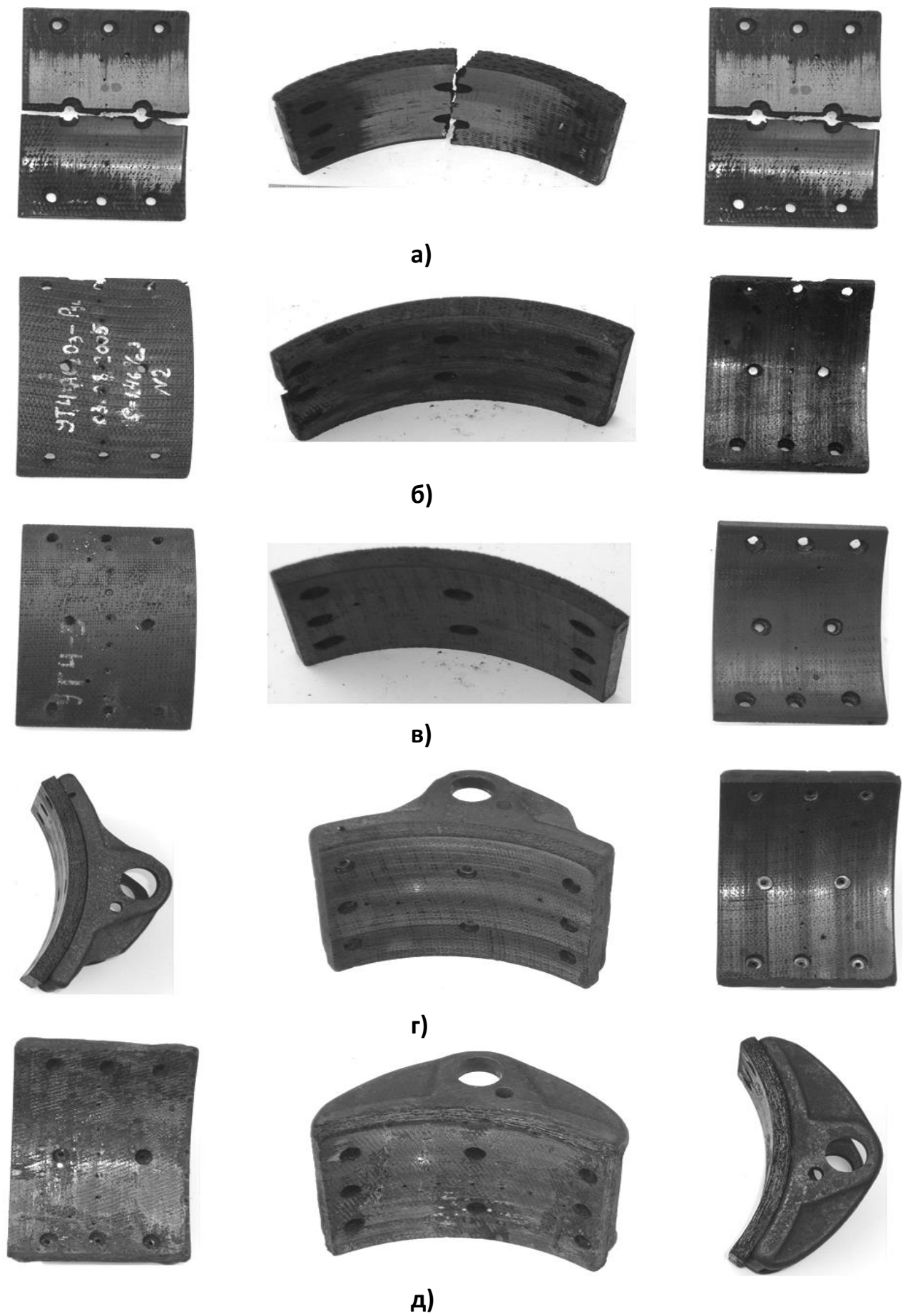


Рис. 4.7 Гальмівних накладок виконані з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів: а) УТ4-1,2,3; б) УТ22-8Б; в) УТ22-3Б; г) УТ22-4Б; д) УТ22-10Б.



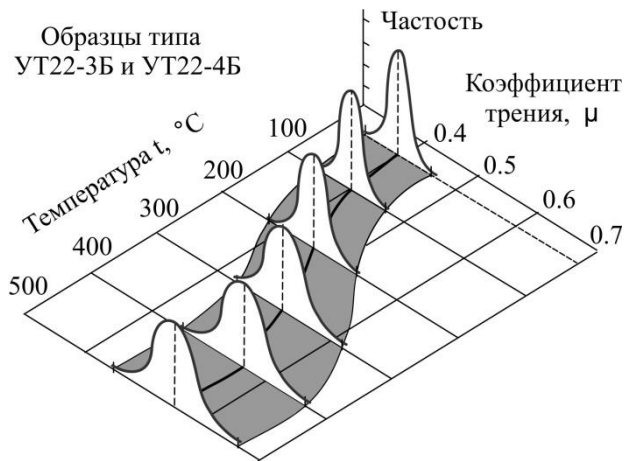


Рис. 4.8. Залежність зміни коефіцієнта тертя від температури в зоні контакту, питомий тиск 0.15 МПа

З метою підвищення і стабілізації коефіцієнта тертя в широкому діапазоні зміни температури контактній поверхні запропоновано модифікувати вуглецеву матрицю з нізкомодульними волокнами введенням твердих дрібнозернистих матеріалів типу карбиду бору і аморфного бору.

Результати випробувань модифікованих зразків В-ВКМ (УТ22-3Б, УТ22-4Б і УТ22-10Б) приведені на рис. 4.8 і 4.9.

Стійкість триботехнічних характеристик В-ВКМ підтверджується результатами випробувань дослідних зразків з різних партій виготовлення по єдиній технологічній схемі.

Зносостійкість дослідних зразків визначалася по ваговому методу - до і після випробувань, а також за спеціальною ресурсною програмою навантаження, при цьому встановлено, що нові матеріали значно перевершують серійні.

Величина зносу нових В-ВКМ складає не більше 15-20% від аналогічних показників серійних матеріалів. Механізми зносу нових В-ВКМ фрикційних матеріалів представлені на рис. 4.10.

Випробуваннями також встановлено, що теплопровідність нових матеріалів істотно вища, ніж композиційних типу V-BKS або ТІР. За оцінкою фактичної різниці температур на контакті і з тильного боку накладок з В-ВКМ,

враховуючи теплофізичні властивості вуглецевих волокон армуючого каркаса, коефіцієнт теплопровідності склав 11...70 Вт/(м·К). Для графіту цей показник при 0°С дорівнює 174, а при 100°С - 158 Вт/(м·К) [41].

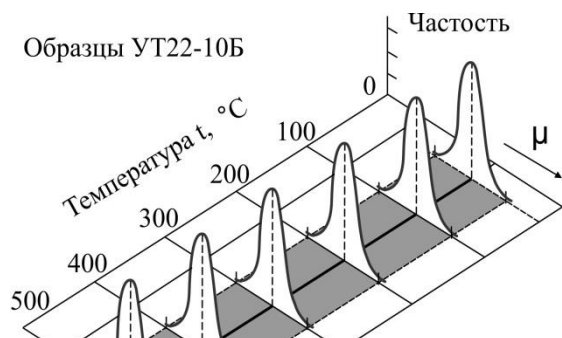


Рис. 4.9. Залежність зміни коефіцієнта тертя  $\mu$  від температури

800...1000°С.

Отримані на машині тертя результати випробувань дослідних зразків з В-ВКМ слід вважати за попередніх. Для уточнення технічних властивостей і трибологічних характеристик фрикційних В-ВКМ необхідно провести натурні випробування на сертифікованому МСЖД інерційному стенді.

Зниження температурної напруженості на контактній поверхні і поліпшення теплообміну істотно зменшують можливість пошкодження гальмівних колодок і поверхонь катання гальмівних коліс.

Особливо перспективним представляється використання модифікованих В-ВКМ з високим і стабільним коефіцієнтом тертя як гальмівні накладки дискових гальм високошвидкісного рухомого складу, у яких температура на контакті досягає

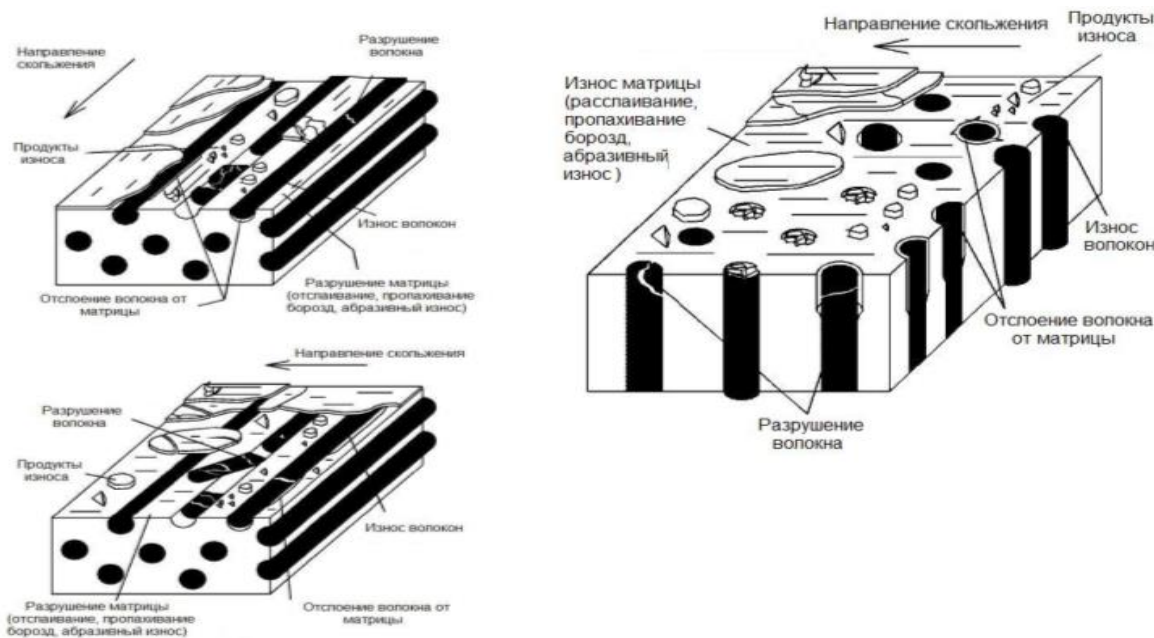


Рис. 4.10. Механізми зносу нових В-ВКМ фрикційних матеріалів

Слід зазначити широкі можливості вдосконалення фрикційних вуглець - композитних матеріалів для конкретних умов використання.

#### 4.4 . Висновок до розділу

1. Нові В-ВКМ на основі вуглецевої матриці з армуючим каркасом з вуглецевих волокон структури 2-d, ущільнені піроуглеродом до щільності 1,36-1,38 г/см<sup>3</sup>, можуть бути використані як фрикційні матеріали.

2. Випробування на машині тертя підтвердили достатньо високі механічні, теплофізичні і тріботехнічні властивості нових фрикційних матеріалів. Випробування показали, що модифіковані В-ВКМ з наповнювачем з аморфного бору (тип УТ22-10Б) мають практично стабільний коефіцієнт тертя на рівні 0,45...0,55 в температурному діапазоні 15...500°C.

3. Перспективними є фрикційні В-ВКМ з армуючим каркасом з високомодульних вуглецевих волокон структури 3d, 4d ., nd, модифіковані введенням в матрицю аморфного бору, карбїду бору, карбїду кремнію і ін.

4. У загальному випадку, зміною структури композиту і виду наповнювачів (або їх поєднанням) представляється можливим створення фрикційних вуглець - композитних матеріалів із заданими властивостями.

## РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ЯКОСТІ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ НА БЕЗПЕКУ РУХУ ТРАНСПОРТУ

**Аналіз стану питання.** У структурі травматизму дорожньо-транспортні події займають одне з перших місць. Численні дослідження [48] показують, що число нещасних випадків на вулицях і інших автотранспортних магістралях в темний час доби може бути понижене на 40% при устаткуванні стаціонарного освітлення, відповідного міжнародним або національним стандартам.

В даний час в Україні близько 90% зовнішнього освітлення не відповідає нормативним вимогам [49]. Основними причинами такого

положення є дефіцит ефективних джерел світла і освітлювальних приладів, застосування фізично застарілих виробів, а також низька культура експлуатації установок вуличного освітлення. Крім того, більшість вітчизняних аналогів по своєму технічному рівню ще поступаються виробам передових зарубіжних фірм.

**Постановка завдання.** Відмітними особливостями зорової роботи водіїв транспорту є порівняно великі кутові розміри об'єктів спостереження (пішоходи, рухомі автомобілі, тролейбуси і так далі) і обмежений час виявлення об'єкту спостережень ( $t \leq 1$  сек). Кутовий розмір об'єкту спостереження, що знаходиться на відстані, що забезпечує необхідну дистанцію гальмування, при швидкості руху 50...60 км/год рівний 50...60'. Обмеження часу спостереження водіїв визначається необхідністю обліку психомоторної реакції і довжини шляху гальмування. Для вирішення завдання оптимізації характеристик вуличного освітлення необхідно провести аналіз всіх чинників, що ускладнюють умови зорової роботи водіїв і намітити шляхи вирішення даної проблеми з урахуванням цих чинників.

**Матеріали і результати дослідження.** Порогові умови, при яких можливе виявлення об'єктів, що представляють небезпеку при русі автомобіля в темний час доби залежать від ряду чинників, до яких належать:

- яскравість дорожнього покриття;
- різниця яркостей об'єкту і фону;
- кутові розміри об'єкту виявлення;
- час експозиції;
- вік водія
- швидкість реакції і стан зорового апарату;
- швидкість руху автомобіля;

- тип світорозподілу світильників.

Яскравість дорожнього покриття повинна вибиратися з умов, що забезпечують своєчасне виявлення водієм перешкод. Для виконання цієї умови фактичний контраст об'єкту з фоном має бути рівний або більше критичного контрасту, величина якого визначає межу упевненого виявлення водієм перешкод.

В умовах штучного освітлення вулиць яскравість дорожнього покриття невелика, також як і рівень яскравості перешкод. У таких умовах об'єкт спостереження, як правило, сприймається силуетом на тлі освітленого дорожнього покриття. Значення критичних контрастів залежать від яскравості дорожнього покриття, швидкості руху машин і кількості перешкод, що одночасно знаходяться у полі зору водія і визначають інтенсивність міського руху.

У нормах СНіП II-4-79, що діють в Україні рівень освітлення проїжджої частини вулиць, доріг і площ регламентується величиною середньої горизонтальної освітленості, яка для вулиць доріг і площ має бути в межах 2...6 лк, залежно від категорії вулиці або дороги. Відношення максимальної яскравості покриття проїжджої частини до мінімальної не повинна перевищувати 3:1 при нормі середньої яскравості більше 0,6 кд/м<sup>2</sup> і 5:1 - при нормі середньої яскравості 0,6 кд/м<sup>2</sup> і менш.

У [50] встановлено, що мінімально допустимим для виявлення об'єкту є його контраст з фоном, рівний 50%. При такому значенні контрасту при швидкості 60 км/год необхідна яскравість дорожнього покриття 1 кд/м<sup>2</sup>, при 85 км/год - 2 кд/м<sup>2</sup>. Для безпеки руху рівень видимості має бути в межах 10...20. На рис. 5.1 приведений графік залежності вірогідності розрізнення об'єкту від величини контрасту з урахуванням інтенсивності руху транспорту.

Залежність рівня нормованої яскравості від кількості об'єктів спостереження, розташованих у полі зору водія одночасно, підтверджується дослідженнями [51]. З приведених на рис. 5.2 графіків залежності часу розрізнення від кількості перешкод, що знаходяться одночасно у полі зору водія витікає, що збільшення кількості таких об'єктів в полі зору з 1 до 6 вимагає збільшення яскравості з 0,2 до 1 кд/м<sup>2</sup> для забезпечення часу розрізнення  $t = 0,52$  сек.

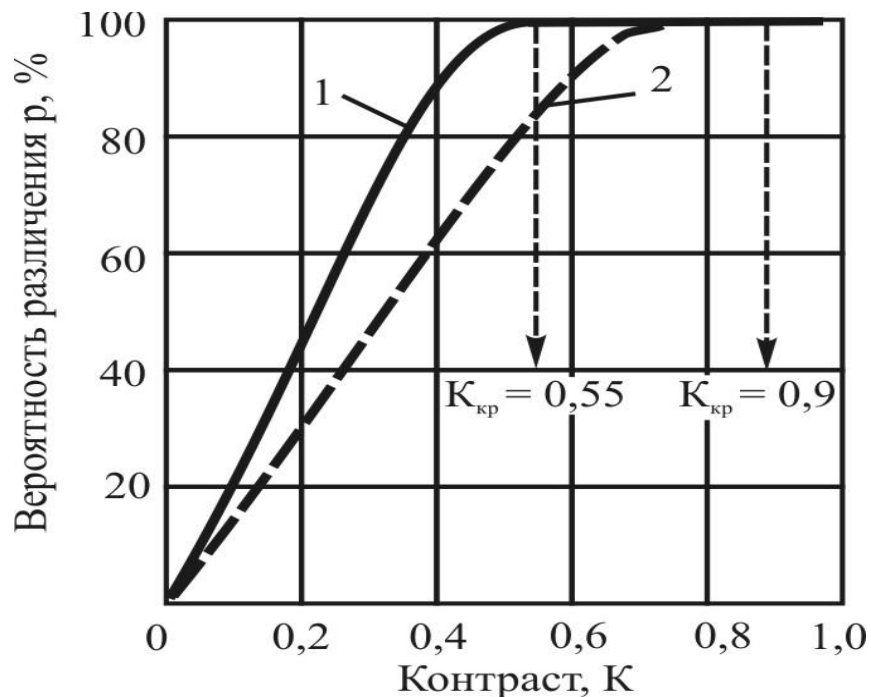
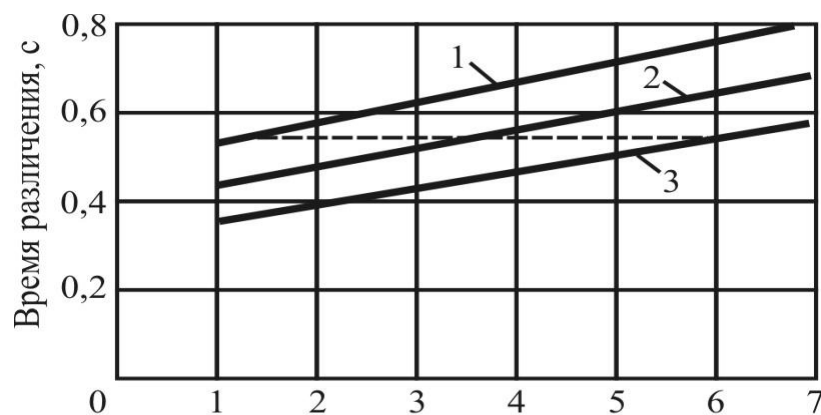


Рис. 5.1. Залежність вірогідності розрізнення об'єкту від величини контрасту при яскравості фону 0,2 кд/м<sup>2</sup>: 1 - для вулиць з малою інтенсивністю руху транспорту; 2- для вулиць з інтенсивним рухом транспорту



## Количество объектов

Рис. 5.2. Залежність часу розрізнення від кількості об'єктів у полі зору водія при яскравості фону: 1 - 0,2 кд/м<sup>2</sup>; 2 - 0,6 кд/м<sup>2</sup>, 3 - 1,0 кд/м<sup>2</sup>

При управлінні транспортним засобом важливу роль грає стереоскопічний зір. Бінокулярне сприйняття глибини досягається за рахунок горизонтальної відмінності в положенні зображень предметів на сітківках правого і лівого очей і подальшою обробкою зображення центральною нервовою системою. Дослідження [52] показали, що гострота стереоскопічного зору різко знижується при низьких рівнях яскравості дорожнього покриття, трохи знижується при дуже високих рівнях яскравості, практично не змінюється під впливом фар ближнього світла, але повністю втрачається при засліпленні спостерігача фарами дальнього світла.

На рис. 5.3, 5.4 показана залежність гостроти стереоскопічного зору від яскравості поля зору і вплив на цю залежність наявності блескських джерел світла.

При нічному русі зоровий апарат водіїв піддається постійною переадаптації. У полі зору, адаптованого на відносно низький рівень яскравості дорожнього покриття, потрапляють джерела підвищеної яскравості - вуличні світильники, фари автомобілів, світлові дорожні покажчики і рекламні щити, що мають значну площість поверхні, що світить.

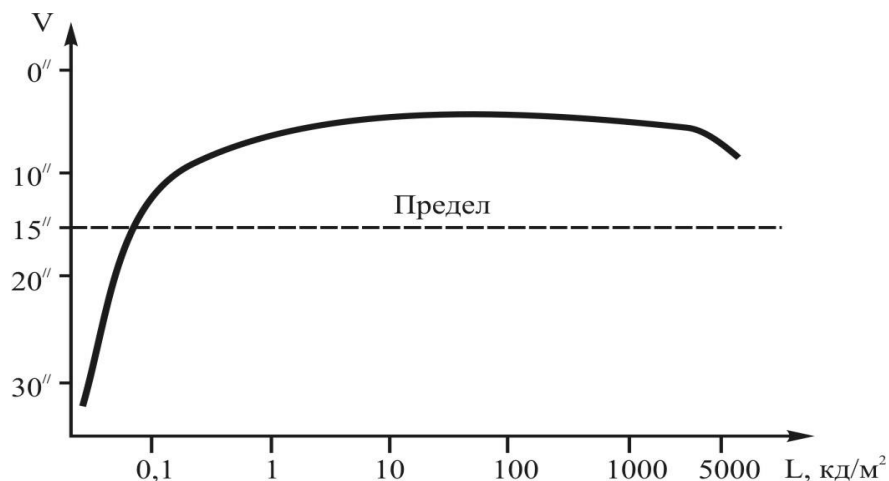


Рис. 5.3. Залежність гостроти стереоскопічного зору (стереоугла  $V$ ) від яскравості поля зору  $L$

Коли водій переводить погляд з дорожнього покриття на дані об'єкти, фіксує інформацію протягом 1...3 сек, і потім повертає зорові осі на дорогу, то проходить декілька секунд (час реадаптації), перш ніж відновиться колишній рівень адаптації і водій зможе розрізнити можливу перешкоду.

Дослідження [53] показали, що значення часу реадаптації повинне обов'язково враховуватися при визначенні часу реакції водія. На вулицях і автомагістралях з освітленістю дорожнього покриття 2...3 кд/м<sup>2</sup> значення часу реадаптації не надає дії, що заважає, на зоровий апарат водіїв, якщо яскравість сліпучих об'єктів не перевищує 300 кд/м<sup>2</sup>. На слабо освітлених вулицях (0,3 кд/м<sup>2</sup>) значення часу реадаптації може досягати 3...5 сек, тому на таких вулицях не рекомендується застосування рекламних щитів і світлових дорожніх показників, в яких немає крайньої необхідності.

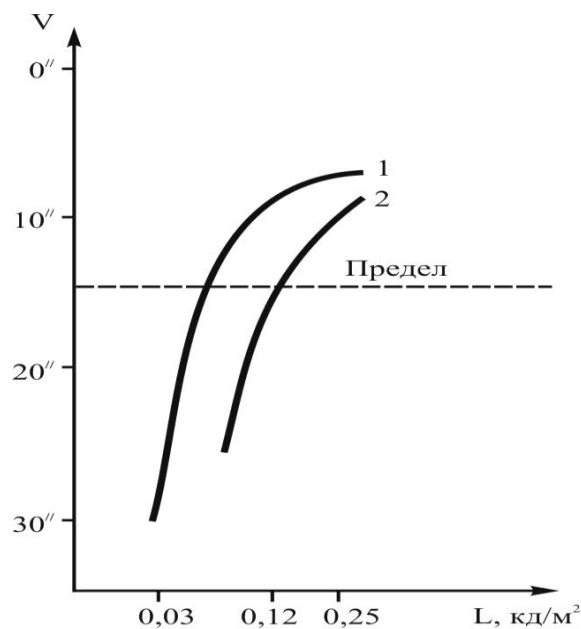


Рис. 5.4. Вплив блескового джерела світла на залежність гостроти стереоскопічного зору (стереоугла  $V$ ) від яскравості поля зору  $L$ :  
1 - без блескового джерела; 2 - з блесковим джерелом



Великий вплив на яскравість дорожнього покриття надає його склад і фотометричні властивості. При додаванні в асфальтові покриття 30...40% штучного мінерального освітлювача можна досягти 2-кратного підвищення відбивних характеристик, що дозволяє значно підвищити яскравість і заощадити на електроенергії в освітлювальних установках [54].

**Висновки.** Якість освітлення вулиць і автомагістралей надає значний вплив на безпеку руху транспортних засобів. Велике значення мають такі характеристики, як: освітленість проїжджої частини; слепімість джерел світла, рекламних щитів, світлових показників; фотометричні характеристики дорожнього покриття.

В Україні стан зовнішнього освітлення незадовільний, основними причинами чого є використання малоефективних і фізично зношених освітлювальних приладів. Вирішення цих проблем можливе шляхом вдосконалення засобів вуличного освітлення за рахунок застосування прогресивних ІС і впровадження нових принципів проектування і експлуатації освітлювальних установок, поліпшення експлуатації установок вуличного освітлення, застосування дорожніх покриттів з покращуваними фотометричними характеристиками.

**ВИСНОВОК**

У магістерській роботі вирішена актуальна науково-технічна задача у дослідженнях теплових процесів в гальмових пристроях автомобілів з перспективними фрикційними матеріалами.

За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки.

1. У роботі проведений статистичний аналіз тенденцій розвитку гальмівних систем АТС, методів виробництва нових В-ВКМ і ККМ і перспектив застосування різних видів дискових гальм на автобусах малого і середнього класів.

Досліджені концепції отримання нових В-ВКМ і ККМ газофазним, жідкофазним і твердофазним методами з економічно вигідними технологічними процесами. Розглянуті дорожні випробування різних варіантів дискових гальмівних механізмів для автобусів середнього і великого класів. Проведений аналіз працездатності дискового гальмівного механізму з новим клиновим - роликівим перетворювачем, розташованим перпендикулярно до гальмівного диску. Були виявлені наступні переваги: простота заміни фрикційних накладок; металоемність гальма на 30% менше барабанного гальма аналогічного призначення.

2. Розроблена математична модель визначення розподілу температурних полів в дискових гальмах при тривалому режимі гальмування з урахуванням теплофізичних властивостей фрикційних матеріалів. За підсумками математичного моделювання встановлено значний вплив триботехнічних характеристик застосованого фрикційного матеріалу на розподіл температурних полів в ДТМ, а саме використання В-ВКМ знижує теплонавантаженість ДТМ на 20 % ніж використання металокерамічного матеріалу.

3. Визначений рівень температур на поверхні колодки в ДТМ для існуючих фрикційних матеріалів і для В-ВКМ. Доказано перевагу запропонованого нового

вуглець-вуглецевого композитного фрикційного матеріалу по термонавантаженості вузлів тертя.

Математична модель адекватно відобразила розподіл температурних полів експериментальних випробувань ДТМ для автобуса ЛіАЗ-5256. У результаті аналітичних досліджень обґрунтован вибір раціонального фрикційного матеріалу для колодок ДТМ автобуса ЛіАЗ-5256.

4. Підтверджено, що зміна теплофізичних властивостей матеріалів при утворенні вторинних структур гартівного типу і тепловому старінні може виявитися вельми істотною і вносити помітну погрішність до розрахунків температури для тих режимів гальмування, де об'ємна температура фрикційних елементів нижче за температуру вирівнювання теплофізичних властивостей матеріалів в початковому і працюючому стані.

Збільшення твердості вторинних структур в порівнянні з початковою також може зробити істотний вплив на температуру поверхні тертя фрикційних елементів унаслідок зміни площі фактичного контакту.

5. Нові В-ВКМ на основі вуглецевої матриці з армуючим каркасом з вуглецевих волокон структури 2-d, ущільнені піроуглеродом до щільності 1,36-1,38 г/см<sup>3</sup>, можуть бути використані як фрикційні матеріали. Випробування на машині тертя підтвердили достатньо високі механічні, теплофізичні і тріботехнічні властивості нових фрикційних матеріалів.

Випробування показали, що модифіковані В-ВКМ з наповнювачем з аморфного бору (тип УТ22-10Б) мають практично стабільний коефіцієнт тертя на рівні 0,45 – 0,55 в температурному діапазоні 15 – 500°С. Перспективними є фрикційні В-ВКМ з армуючим каркасом з високомодульних вуглецевих волокон структури 3d, 4d ., nd, модифіковані введенням в матрицю аморфного бору, карбиду бору, карбиду кремнію і ін.

6. Новий фрикційний вуглерод-композиційний матеріал СК-07.04 на основі вуглецевої матриці, зміцненої вуглецевим волокном, істотно перевершує серійні матеріали, як по величині коефіцієнта тертя, що реалізовується, так і по термостійкості. При температурі в контактній зоні поверхонь, що труться, від 200 до 350°C коефіцієнт тертя стабілізується на рівні 0,5, а потім наголошується тенденція до повільного зниження. Новий матеріал СК-07.04 має значно вищу зносостійкість, що підтверджується тривалими випробуваннями на знос по ваговому методу, порівняно з серійним матеріалом знос склав небагато чим більше 7%. На підставі результатів експериментальних досліджень новий матеріал СК-07.04 може бути рекомендований для використання на досвідченій партії транспортних машин (автомобілі, локомотиви і вагони), особливо для важких умов експлуатації з тривалим і частим гальмуванням.

Підвищення ефективності гальмування шляхом застосування нового фрикційного матеріалу дозволяє не тільки підвищити безпеку руху, але і забезпечити мінімізацію гальмівного шляху і часу гальмування.

7. У розділі «Вплив якості вуличного освітлення на безпеку руху транспорту» розглянутий вплив вуличного освітлення на безпеку дорожнього руху. Встановлено, що велике значення мають такі характеристики, як: освітленість проїжджої частини; слепіть джерел світла, рекламних щитів, світлових покажчиків; фотометричні характеристики дорожнього покриття. Проте в Україні стан зовнішнього освітлення незадовільний, основними причинами чого є використання малоефективних і фізично зношених освітлювальних приладів.

Вирішення цих проблем можливе шляхом вдосконалення засобів вуличного освітлення за рахунок застосування прогресивних ІС і впровадження нових принципів проектування і експлуатації освітлювальних установок, поліпшення експлуатації установок вуличного освітлення,

застосування дорожніх покриттів з покращуваними фотометричними характеристиками.

### Список використаної літератури

1. Акопян Р.А., Демьянюк В.А., Миськив Т.Г. Експериментальні дослідження ефективності застосування дискових гальм на вантажних автомобілях і автобусах// Тези доповідей Всесоюзної науково-технічної конф. "Підвищення ефективності використання автомобільного транспорту і автомобільних доріг в умовах жаркого клімату і високогірних районів". -Ташкент. - 1985. - С. 46 - 47.
2. Будько І.І. Дослідження динамічних характеристик гальмівних механізмів легкових автомобілів: Дис. канд. техн. наук: 05.05.03. - Харків, 1980. - 153 с.
3. Булавкин А.С. Особливості сумісного використання дискових і барабанних гальмівних механізмів на легкових автомобілях: Дис. канд. техн. наук: 05. 05. 03. - Харків, 1984. - 214 с.
4. Владіміров Н.Л. Підвищення ефективності дискового гальма автомобіля зниженням його термонагруженості: Дис.канд. техн. наук: 05.05.03. - М., 1987. - 174 с.
5. Генбом Б.Б., Гудз Г.С., Демьянюк В.А. и др. Питання динаміки гальмування і теорії робочих процесів гальмівних систем автомобілей - Львів: Віща школа. 1974. - 234 с.

6. Городецкий С.Н. Вибір геометричних параметрів дискового гальма з метою поліпшення його температурних і силових характеристик: Дис. канд. техн. наук: 05.05.03. - М.,1983. - 133 с.
7. Гредеськул А.Б., Решетников Е.Б. Вплив коефіцієнта взаємного перекриття на теплову напруженість дискового гальма при одиничних гальмуваннях// Автомобільний транспорт. - Вип. 11. - К.: Техніка. - 1974. - С. 154 - 157.
8. Гудз Г.С. Температурні режими фрикційних вузлів автотранспортних засобів. - Харків: РІО ХГАДТУ, 1997. - 139 с.
9. **Акопян Р.А., Демьянюк В.А., Король Б.А., Шишкіна Т.П., Меламуд Р.А. Гальмо дискової колодки: 846874 СРСР, МКИ F 16 D 55/20/ (СРСР).-№ 2710161/25-27; Заявка 03.01.79; Опубл. 15.07.81, Бюл. № 26.-4 с.**
10. Доля В.К. Дослідження термоміцності автомобільних гальмівних дисків: Дис. канд. техн. наук: 05. 05. 03. - Харків, 1980. - 124 с.
11. Кан С.Н. Будівельна механіка оболонок. - М.: Машинобудування, 1966. - 508 с.
12. Коляса О.Л. Обґрунтування теплової моделі дискових гальмівних механізмів автомобільних коліс: Дис. канд. техн. наук: 05.22.02. - Львів, 2002. - 132 с.
13. Кушов В.Я. Експериментальне дослідження нагріву гальмівного диска// Автомобільний транспорт. - Вип. 17. - К.: Техніка. - 1980. - С. 84 - 85.
14. Оржевський І.С. Дискові гальма легкових автомобілів. - М.: НІНавтопром, 1977. - 63 с.
15. Решетников Е.Б. Дослідження теплового режиму гальм вантажних автомобілів на ЕВМ// Автомобільний транспорт. - Вип. 8. - К.: Техніка. - 1971. - С. 60 - 69.
16. Решетников Е.Б. Теплова напруженість автомобільного дискового гальма в режимі тривалого гальмування// Автомобільна промисловість. - 1972. - № 12. - С. 18 - 20.

17. Решетников Е.Б. Дослідження автомобільних дискових гальм: Дис. канд. техн. наук: 05.05.03. - Харків, 1973. - 150 с.
18. Решетников Е.Б., Доля В.К. Дослідження деформації гальмівного диска // Автомобільний транспорт. - Вип. 13. - К.: Техніка. - 1976. - С. 140 - 144.
19. Решетников Е.Б., Доля В.К., Кушов В.Я. Дослідження нагріву і міцності різних конструкцій гальмівних дисків// Автомобільний транспорт. Вип. 18. - К.: Техніка. - 1981. - С. 103 - 106.
20. Гальмівні пристрої: Справочник/ Під ред. М.П. Александрова. - М.: Машинобудування, 1985. - 312 с.
21. Туренко О.Н. Дослідження закритих дискових гальм для важких вантажних автомобілів: Дис. канд. техн. наук: 05.05.03. - Харків, 1973. - 158 с.
22. Експериментальне дослідження дослідних зразків дискових гальмівних механізмів і пневматичного гальмівного приводу автобуса, проектування дискового гальмівного механізму з пневматичним приводом: Звіт про НДР (частина 2)/ Львів. політехн. ін-т; № ГР 78009266. - Львів, 1980. - 129 с.
23. Яворський Я.П. Вдосконалення методу теплового розрахунку автомобільних дискових гальм при тривалих гальмуваннях на основі комп'ютерного моделювання: Дис. канд. техн. наук: 05.22.02. - Львів, 2004. - 146 с.
24. Syta Stanislaw. Hamulce tarczowe w samochodach cie, nzarowych i autobusach. – Technika motoryzacyjna, 1981, 31, № 3, s. 17 – 21.
25. Bauer H. Glasers Annalen, 1999, №11/12, S. 472-475.
26. Александров М. П. Дослідження теплових режимів гальм кранів. Дис. канд. техн. наук, - М., 1953.
27. Чичинадзе А.В. Розрахунок і дослідження зовнішнього тертя при гальмуванні. М.: Наука, 1967.
28. Іноземцев В.Г. Гальма залізничного рухомого складу. М.: Транспорт, 1979, - 424с.
29. Іванов Л. Е. Дослідження гальм колодок кранів із збільшеним конвективним теплообміном з метою підвищення довговічності їх фрикційних елементів. Дис. канд. техн. наук, - Харків, 1969.

30. Шевченко С. І., Старченко В. М., Белоус В. В. Про можливість застосування аналого-цифрових перетворювачів при експериментальних дослідженнях. Вісник Східноукраїнського Державного університету №6(28) 2000//вид-во ВУГУ. Луганськ. 2000. - с. 36-40.
31. Лабренц Ф. Порівняння концепцій високошвидкісних поїздів Європи. Залізниця миру, 2004 №9.
32. Schlosser W., Aurich S. Die modernen Bremssysteme. Glasers Annalen, 2001, №8. S. 273-277.
33. Zander C.-P. Metal-ceramic braking clamps on powerful locomotives. Glasers Annalen, 2001, №4. P. 157-165.
34. Ehlers H.-R. et.al. Potential and limits of opportunities of the block brake. Glasers Annalen, 2002, №6/7. P. 290-300.
35. Vukolov L.A., Voronchikhin A.I. Neu Solutions in choose of material end design of Brake shoes required by Railroad applications. Proceedings of World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA. Extended Abstracts in electronic form CD-ROM of the papers.
36. Bauer H. Die Reibungsmaterialien fur die Bremsen. Glasers Annalen, 1999, №11/12. S. 472-475.
37. Гурін В.А., Зеленський В.Ф. Газофазні методи отримання вуглецевих і вуглерод-вуглеродних матеріалів. ВАНТ. Серія ФРП, вип. 4/76/, Харків, 1999. - С. 13-31.
38. Гурін В.А., Гурін І.В., Фурсов Ц.Р. Дослідження газофазного ущільнення піроуглеродом пористих середовищ методом радіально рухомої зони піролізу. ВАНТ. Серія ФРП, вип. 4/76/, Харків, 1999. - С. 32-45.
39. Reserch on the development of gasphase methods for carbon-carbon items manufacturing. V.A. Gurin, I.V. Gurin.V.V. Kolosenko, Yu.E. Murin. 24<sup>th</sup> Biennial Conference on Carbon 11-16 July 1999. Carbon`99, vol. II. P.662-663.
40. Старченко В.М., Полупан Є.В., Шевченко С.І. Підвищення ефективності гальмування використанням нових вуглерод-композиційних матеріалів. Вісник СНУ ім. В.Даля, 2004, №7 (77), (Частина 1). – С. 137-142.



41. Старченко В.М., Гурін В.А., Полупан Є.В., Гурін І.В. Тріботехнічні характеристики нових фрикційних матеріалів для гальмівних механізмів транспортних машин. Вісник СНУ ім. В.Даля, 2005, №8 (90), (Частина 1). – С. 121-126.
42. Беляєв Н.М. Основи теплопередачі. Підручник. - К.: Вища шк. Головне вид-во, 1989. - 343 с.
43. Ігнат'єва В.І. Дослідження формування структури фрикційного контакту стосовно вузлів тертя, що працюють при нестационарному тепловому режимі.- Сб. «Оптимальне використання фрикційних матеріалів у вузлах тертя машин». М., вид-во «Наука», 1973.
44. Гинзбург А.Г. Теоретичні і експериментальні основи застосування рівнянь теплової динаміки тертя.- Сб. «Оптимальне використання фрикційних матеріалів у вузлах тертя машин». М, - вид-во «Наука», 1973.
45. Ликов А.В. Теорія теплопровідності. М., видавництво «Вища школа», 1971.
46. Германчук Ф.К. Довговічність і ефективність гальмівних пристроїв - М.: 1973.
47. Карпінос Д.М., Тучинський Л.І. Композиційні матеріали в техніці. - К.: Техніка, 1985.-152с.
48. Phillips Derek. City lights // Light. J. – 1991. – №1. – P.18-20.
49. Піліпчук Р.В. Проблеми енергозбереження в освітлювальних установках // Енергозбереження. - 2003. - №5. - С. 2-9.
50. Huculak P. A visibility assessment of detection experimentation in automobile headlighting // Light Res. and Technol. – 1983. – №2. – P. 105-114.
51. Зільберблат Я.Б., Федоров Б.Ф. Обґрунтування норм вуличного освітлення. - М.: Енергоіздат, 1968. - 188 с.

52. Линднер Х., Шрейнер Х., Тичински Т. Влияние яркости поля зору и освещенности від блеского джерела на стереоскопичне зір // Светотехника. – 1994. – №6. – С. 5-8.
53. Roddewig W. Bedeutung der Readaptionszeit für den nächtlichen Straßenverkehr // Licht. - 1983. №10. – P.540-542.
54. Range H. Helle bituminöse Fahrbandeckschichten // Licht. – 1986. – №3. – P. 224-229.

## ДОДАТОК

Моделювання теплових полів в дисковому гальмівному механізмі при тривалому режимі гальмування для різних видів матеріалів. Проведемо аналіз і оцінку розподілу температурних полів по ширині колодки при використанні різних матеріалів.

Для розгляду процесів нагрівання гальмових механізмів потрібно розв'язати рівняння, які описують процеси нагрівання у ДТМ при тривалому режимі гальмування :

$$\theta_{CP}(\xi, \tau) = \frac{\alpha_{T.Пi} \psi_{vi} W_{T.П} b_i}{\lambda_i t_T A_{a1}} \left[ -\xi_i \left( 1 - \frac{\xi_i}{2} \right) \tau_N + \frac{1}{3} \tau_N + F_{oi} \tau_w - \frac{2\tau_N}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-\pi^2 n^2 F_{oi} \tau) \right] +$$

$$+ \frac{\alpha_{T.Пi} \psi_{vi} W_{T.П}}{m_i c_i} \left[ \frac{\exp(-k_i t_{OХЛ}) - \exp(-n_2 k_i t_{OХЛ})}{1 - \exp(-k_i t_{OХЛ})} \right],$$

T

$$\tau_{,l} = \theta_i \cdot [a_j + b_j \cdot l + c_j \cdot l^3],$$

$$i := 0, 1..9 \quad \rho d := 7100 \quad \rho k := 2200 \quad Cd := 500 \quad Ck := 1050 \quad \underline{W} := 374668$$

$$\alpha d := 14 \cdot 10^{-6} \quad \alpha k := 0.178 \cdot 10^{-6} \quad \sigma := 36 \quad Vkd := 0.000088 \quad \lambda d := 510$$

$$tohl := 60 \quad bd := 0.02 \quad bk := 0.02 \quad Vdd := 0.00095 \quad \lambda k := 0.41$$

$$t := 720 \quad Vd := 0.0029 \quad Vk := 0.000224 \quad \underline{A} := 0.0112 \quad \alpha 2 := 0.92$$

$$F02 := \frac{\alpha k \cdot t}{bk^2} \quad F01 := \frac{\alpha d \cdot t}{bd^2} \quad F02 = 0.32 \quad F01 = 25.2 \quad n1 := 20$$

$$mkaf := \rho k \cdot Vk \quad mdaf := \rho d \cdot Vd \quad mkaf = 0.493 \quad mdaf = 20.59 \quad n2 := 3$$

$$mkd := \rho k \cdot Vkd \quad mdd := \rho d \cdot Vdd \quad \text{де } a_j, b_j, c_j - \quad \xi_0 := 0$$

коефіцієнти залежні від часу;

l - відносна довжина колодки (0...1).

$$a_j = \frac{0,204 + 0,192 \cdot \tau \cdot l}{1 + 0,186 \cdot \tau \cdot l},$$

$$b_j = \frac{1}{0,725 + 0,035 \cdot \tau \cdot l \cdot \ln(\tau \cdot l) + \frac{-0,106}{(\tau \cdot l)^2}},$$

$$c_j = \frac{1}{-0,717 + (-0,036) \cdot \tau \cdot l \cdot \ln(\tau \cdot l) + (-0,302) \cdot (\tau \cdot l)^{-1} \cdot \ln(\tau \cdot l)},$$

де j – година гальмування (1...12),

$\tau$  - відносний час гальмування.

Математична модель для трьох видів фракційного матеріалу приведена  
нижче:

Математична модель для гальмового диску (чавун ЧНМХ) та колодки (асбополімер БКФ-58):

$$m_{kd} = 0.194$$

$$m_{dd} = 6.745$$

$$\psi_k := \frac{m_{kaf} \cdot C_k}{m_{kaf} \cdot C_k + \frac{C_k \cdot (m_{kd} + m_{dd})}{2}}$$

$$\psi_d := \frac{m_{daf} \cdot C_d}{m_{daf} \cdot C_d + \frac{C_d \cdot (m_{dd} + m_{kd})}{2}}$$

$$\psi_k = 0.124$$

$$\psi_d = 0.856$$

$$A_0 := \sqrt{F_0 l^2 + \frac{1}{9}}$$

$$C_0 := \frac{\psi_k \cdot b_k \cdot \lambda_d}{\psi_d \cdot b_d \cdot \lambda_k}$$

$$A_0 = 25.202$$

$$C_0 = 180.783$$

$$\alpha := \left[ \frac{1 + C_0 \cdot (1 - \alpha^2)}{\alpha^2} \right]^{-1}$$

$$\alpha = 0.059$$

$$k_k := \frac{\sigma \cdot A}{m_{kaf} \cdot C_k}$$

$$k_k = 7.792 \times 10^{-4}$$

$$\tau := 0, 0.1.. 1$$

$$\tau := \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix}$$

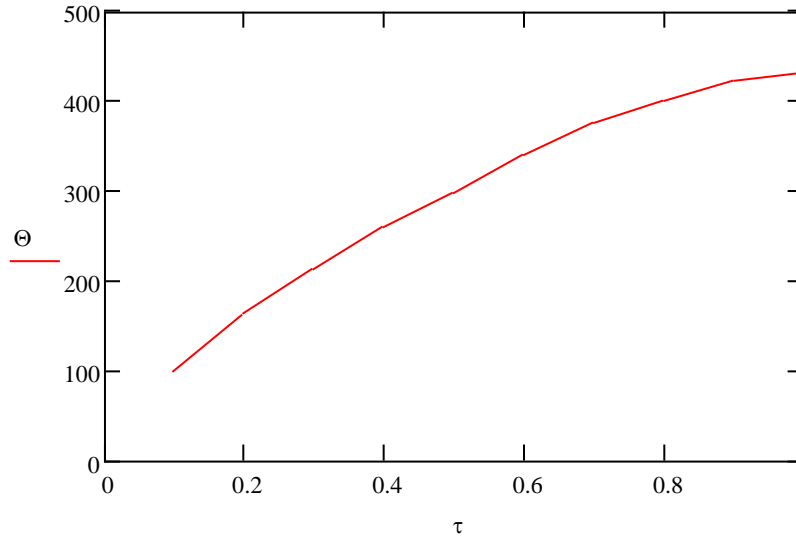
$$\tau_n := \begin{pmatrix} 1.62 \\ 2.02 \\ 2.2 \\ 1.58 \\ 0.90 \\ 0.75 \\ 0.36 \\ 0.18 \\ 0.4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\tau_w := \begin{pmatrix} 0.19 \\ 0.34 \\ 0.45 \\ 0.57 \\ 0.67 \\ 0.77 \\ 0.86 \\ 0.92 \\ 0.97 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\Theta_i := \left[ \frac{\alpha \psi k W b k}{\lambda k t A} \cdot \left[ -\xi_0 \cdot \left( 1 - \frac{\xi_0}{2} \right) \cdot \tau_i + \frac{1}{3} \cdot \tau_i + F01 \cdot \tau_i - \frac{2 \cdot \tau_i}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{20} \left( \frac{1}{n^2} \cdot e^{-\pi^2 \cdot n^2 \cdot F01 \cdot \tau_i} \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \xi_0) \right) \right] + \frac{\alpha \psi k W}{m k a f \cdot C k} \cdot \left( \frac{e^{-k k \cdot t o h l} - e^{-n 2 \cdot k k \cdot t o h l}}{1 - e^{-k k \cdot t o h l}} \right) \right]$$

$$\Theta =$$

	0
0	99.356
1	164.992
2	212.491
3	259.744
4	298.208
5	339.635
6	375.494
7	399.848
8	422.211
9	432.654



$$\tau 1 := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 10 \\ 12 \end{pmatrix}$$

$j := 0, 1..9$

Рис. Д1. Графік залежності температури від часу

$$a_j := \frac{0.204 + 0.192 \cdot \tau 1_j}{1 + 0.186 \cdot \tau 1_j}$$

$$b_j := \frac{1}{0.725 + 0.035 \cdot \tau 1_j \cdot \ln(\tau 1_j) + \frac{-0.106}{(\tau 1_j)^2}}$$

$$c_j := \frac{1}{-0.717 + (-0.036) \cdot \tau 1_j \cdot \ln(\tau 1_j) + (-0.302) \cdot (\tau 1_j)^{-1} \cdot \ln(\tau 1_j)}$$

$a_j =$

0.334
0.429
0.501
0.557
0.603
0.641
0.672
0.699
0.743
0.776

$b_j =$

1.616
1.339
1.207
1.096
0.998
0.91
0.834
0.766
0.654
0.566

$c_j =$

-1.395
-1.147
-1.057
-0.979
-0.906
-0.837
-0.774
-0.717
-0.619
-0.54

$$l_j = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.25 \\ 0.5 \\ 0.625 \\ 0.75 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$K1_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_0 + c_j \cdot (l_0)^3]$$

$$K4_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_3 + c_j \cdot (l_3)^3]$$

$$K2_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_1 + c_j \cdot (l_1)^3]$$

$$K5_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_4 + c_j \cdot (l_4)^3]$$

$$K3_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_2 + c_j \cdot (l_2)^3]$$

$$K6_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_5 + c_j \cdot (l_5)^3]$$

K1 =

33.175
70.711
106.382
144.765
179.852
217.649
252.504
279.636
313.558
335.735

K2 =

71.137
122.969
166.986
211.957
250.004
290.513
326.216
351.72
378.47
393.268

K3 =

	0
0	96.108
1	157.481
2	206.538
3	255.306
4	294.83
5	336.714
6	372.667
7	396.921
8	418.88
9	428.912

K4 =

99.663
162.535
211.84
260.588
299.832
341.484
377.15
401.039
422.24
431.685

K5 =

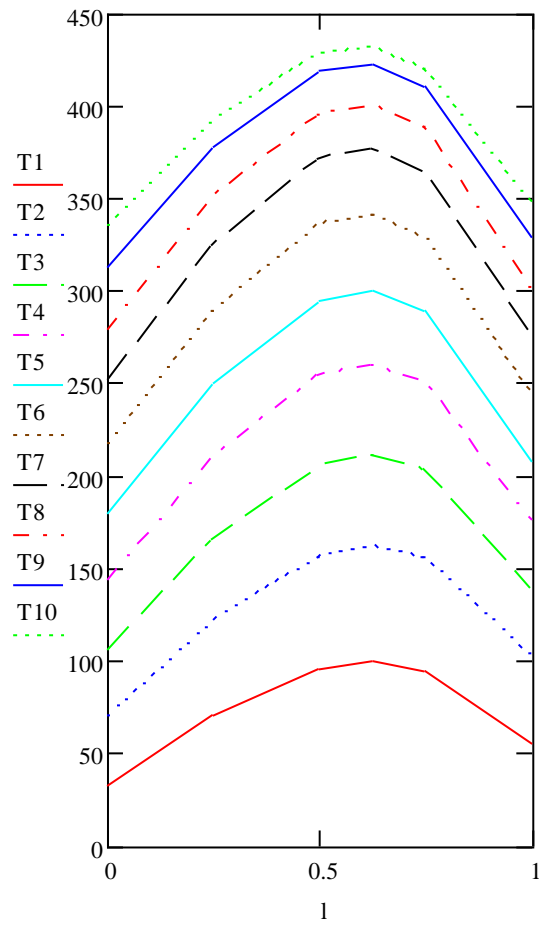
95.098
156.498
203.984
250.969
289.005
329.589
364.596
388.355
410.286
420.777

K6 =

55.113
102.273
138.272
175.101
207.204
242.477
274.742
299.138
328.186
346.973

$$T1 := \begin{pmatrix} K1_0 \\ K2_0 \\ K3_0 \\ K4_0 \\ K5_0 \\ K6_0 \end{pmatrix} \quad T2 := \begin{pmatrix} K1_1 \\ K2_1 \\ K3_1 \\ K4_1 \\ K5_1 \\ K6_1 \end{pmatrix} \quad T3 := \begin{pmatrix} K1_2 \\ K2_2 \\ K3_2 \\ K4_2 \\ K5_2 \\ K6_2 \end{pmatrix} \quad T4 := \begin{pmatrix} K1_3 \\ K2_3 \\ K3_3 \\ K4_3 \\ K5_3 \\ K6_3 \end{pmatrix} \quad T5 := \begin{pmatrix} K1_4 \\ K2_4 \\ K3_4 \\ K4_4 \\ K5_4 \\ K6_4 \end{pmatrix}$$

$$T6 := \begin{pmatrix} K1_5 \\ K2_5 \\ K3_5 \\ K4_5 \\ K5_5 \\ K6_5 \end{pmatrix} \quad T7 := \begin{pmatrix} K1_6 \\ K2_6 \\ K3_6 \\ K4_6 \\ K5_6 \\ K6_6 \end{pmatrix} \quad T8 := \begin{pmatrix} K1_7 \\ K2_7 \\ K3_7 \\ K4_7 \\ K5_7 \\ K6_7 \end{pmatrix} \quad T9 := \begin{pmatrix} K1_8 \\ K2_8 \\ K3_8 \\ K4_8 \\ K5_8 \\ K6_8 \end{pmatrix} \quad T10 := \begin{pmatrix} K1_9 \\ K2_9 \\ K3_9 \\ K4_9 \\ K5_9 \\ K6_9 \end{pmatrix}$$



$i := 0, 1..9$	$\rho_d := 7100$	$\rho_k := 6100$	$C_d := 500$	$C_k := 638$	$W := 374668$
$\alpha_d := 14 \cdot 10^{-6}$	$\alpha_k := 0.4 \cdot 10^{-6}$	$\sigma := 36$	$V_{kd} := 0.000088$	$\lambda_d := 510$	
$tohl := 60$	$b_d := 0.02$	$b_k := 0.02$	$V_{dd} := 0.00095$	$\lambda_k := 28.4$	
$t := 720$	$V_d := 0.0029$	$V_k := 0.000224$	$A := 0.0112$	$\alpha_2 := 0.89$	
$F_{02} := \frac{\alpha_k \cdot t}{b_k^2}$	$F_{01} := \frac{\alpha_d \cdot t}{b_d^2}$	$F_{02} = 0.72$	$F_{01} = 25.2$	$n_1 := 20$	
$m_{kaf} := \rho_k \cdot V_k$	$m_{daf} := \rho_d \cdot V_d$	$m_{kaf} = 1.366$	$m_{daf} = 20.59$	$n_2 := 3$	
$m_{kd} := \rho_k \cdot V_{kd}$	$m_{dd} := \rho_d \cdot V_{dd}$	$m_{kd} = 0.537$	$m_{dd} = 6.745$	$\xi_0 := 0$	
$\psi_k := \frac{m_{kaf} \cdot C_k}{m_{kaf} \cdot C_k + \frac{C_k \cdot (m_{kd} + m_{dd})}{2}}$	$\psi_d := \frac{m_{daf} \cdot C_d}{m_{daf} \cdot C_d + \frac{C_d \cdot (m_{dd} + m_{kd})}{2}}$			$\psi_k = 0.273$	
				$\psi_d = 0.85$	
$A_0 := \sqrt{F_{01}^2 + \frac{1}{9}}$	$C_0 := \frac{\psi_k \cdot b_k \cdot \lambda_d}{\psi_d \cdot b_d \cdot \lambda_k}$	$A_0 = 25.202$	$C_0 = 5.767$		
$\alpha := \left[ \frac{1 + C_0 \cdot (1 - \alpha_2)}{\alpha_2} \right]^{-1}$		$\alpha = 0.545$			

Рис. Д2. Графік розподілу температурного поля по ширині колодки



Математична модель для гальмового диску (чавун ЧНМХ) та колодки (кераміка М106):

$$\tau := 0, 0.1.. 1$$

$$kk := \frac{\sigma \cdot A}{mkaf \cdot Ck}$$

$$kk = 4.625 \times 10^{-4}$$

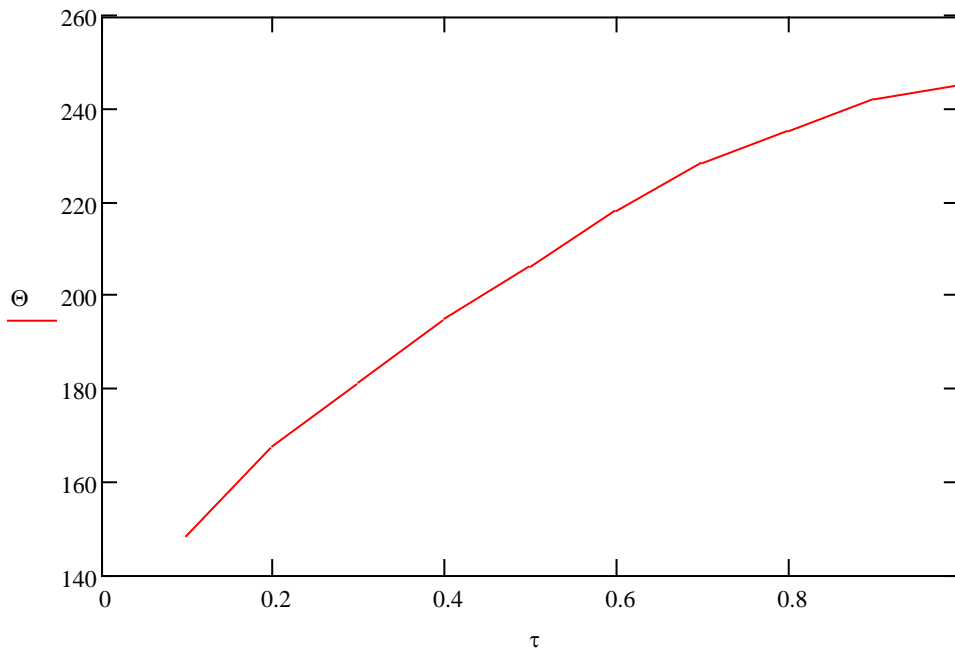
$$\tau := \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\tau_n := \begin{pmatrix} 1.62 \\ 2.02 \\ 2.2 \\ 1.58 \\ 0.90 \\ 0.75 \\ 0.36 \\ 0.18 \\ 0.4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\tau_w := \begin{pmatrix} 0.19 \\ 0.34 \\ 0.45 \\ 0.57 \\ 0.67 \\ 0.77 \\ 0.86 \\ 0.92 \\ 0.97 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\Theta_i := \left[ \frac{\alpha \psi k W b k}{\lambda k t A} \left[ -\xi_0 \left( 1 - \frac{\xi_0}{2} \right) \cdot \tau_i + \frac{1}{3} \cdot \tau_i + F01 \cdot \tau_i - \frac{2 \cdot \tau_i}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{20} \left( \frac{1}{n^2} e^{-\pi^2 \cdot n^2 \cdot F01 \cdot \tau_i} \cdot \cos(\pi \cdot n \cdot \xi_0) \right) \right] \right] + \frac{\alpha \psi k W}{m k a f \cdot C k} \cdot \left( \frac{e^{-k k \cdot t o h l} - e^{-n 2 \cdot k k \cdot t o h l}}{1 - e^{-k k \cdot t o h l}} \right)$$

	0
0	148.44
1	167.467
2	181.237
3	194.935
4	206.086
5	218.095
6	228.49
7	235.55
8	242.033
9	245.06



τ1 :=  $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 10 \\ 12 \end{pmatrix}$

j := 0, 1.. 9

Рис. ДЗ. Графік залежності температури від часу



$$a_j := \frac{0.204 + 0.192 \cdot \tau_{1j}}{1 + 0.186 \cdot \tau_{1j}} \quad b_j := \frac{1}{0.725 + 0.035 \cdot \tau_{1j} \cdot \ln(\tau_{1j}) + \frac{-0.106}{(\tau_{1j})^2}}$$

$$c_j := \frac{1}{-0.717 + (-0.036) \cdot \tau_{1j} \cdot \ln(\tau_{1j}) + (-0.302) \cdot (\tau_{1j})^{-1} \cdot \ln(\tau_{1j})}$$

$a_j =$

0.334
0.429
0.501
0.557
0.603
0.641
0.672
0.699
0.743
0.776

$b_j =$

1.616
1.339
1.207
1.096
0.998
0.91
0.834
0.766
0.654
0.566

$c_j =$

-1.395
-1.147
-1.057
-0.979
-0.906
-0.837
-0.774
-0.717
-0.619
-0.54

$$l_j := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.25 \\ 0.5 \\ 0.625 \\ 0.75 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$K1_j := \Theta_j \left[ a_j + b_j \cdot l_{j0} + c_j \cdot (l_{j0})^3 \right]$$

$$K4_j := \Theta_j \left[ a_j + b_j \cdot l_{j3} + c_j \cdot (l_{j3})^3 \right]$$

$$K2_j := \Theta_j \left[ a_j + b_j \cdot l_{j1} + c_j \cdot (l_{j1})^3 \right]$$

$$K5_j := \Theta_j \left[ a_j + b_j \cdot l_{j4} + c_j \cdot (l_{j4})^3 \right]$$

$$K3_j := \Theta_j \left[ a_j + b_j \cdot l_{j2} + c_j \cdot (l_{j2})^3 \right]$$

$$K6_j := \Theta_j \left[ a_j + b_j \cdot l_{j5} + c_j \cdot (l_{j5})^3 \right]$$

K1 =

49.564
71.772
90.735
108.645
124.292
139.762
153.65
164.734
179.748
190.164

K2 =

106.28
124.815
142.425
159.072
172.773
186.551
198.504
207.198
216.958
222.752

K3 =

	0
0	143.588
1	159.844
2	176.16
3	191.605
4	203.751
5	216.219
6	226.77
7	233.826
8	240.123
9	242.941

K4 =

148.898
164.974
180.682
195.569
207.208
219.282
229.498
236.252
242.05
244.511

K5 =

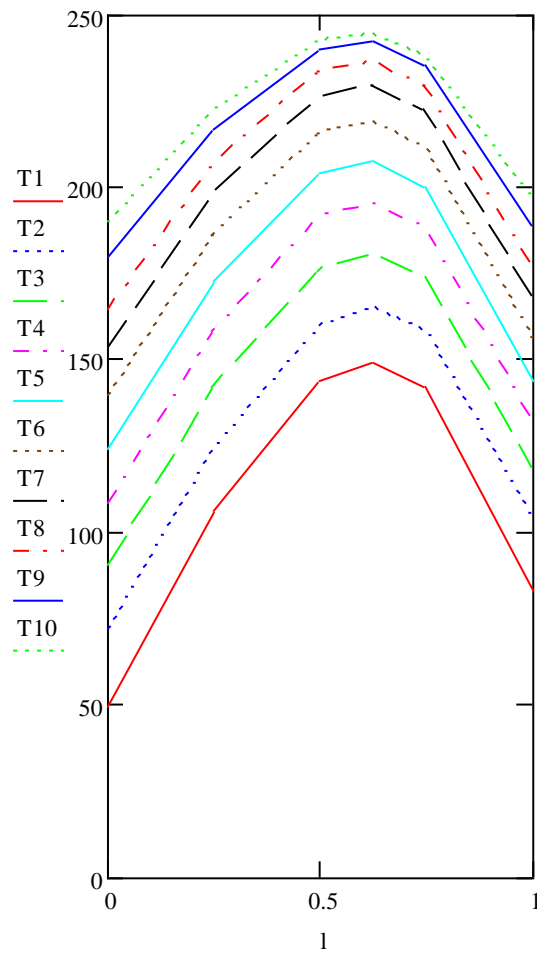
142.078
158.846
173.981
188.35
199.726
211.644
221.858
228.78
235.197
238.333

K6 =

82.34
103.808
117.935
131.412
143.195
155.705
167.182
176.222
188.133
196.53

$$T1 := \begin{pmatrix} K1_0 \\ K2_0 \\ K3_0 \\ K4_0 \\ K5_0 \\ K6_0 \end{pmatrix} \quad T2 := \begin{pmatrix} K1_1 \\ K2_1 \\ K3_1 \\ K4_1 \\ K5_1 \\ K6_1 \end{pmatrix} \quad T3 := \begin{pmatrix} K1_2 \\ K2_2 \\ K3_2 \\ K4_2 \\ K5_2 \\ K6_2 \end{pmatrix} \quad T4 := \begin{pmatrix} K1_3 \\ K2_3 \\ K3_3 \\ K4_3 \\ K5_3 \\ K6_3 \end{pmatrix} \quad T5 := \begin{pmatrix} K1_4 \\ K2_4 \\ K3_4 \\ K4_4 \\ K5_4 \\ K6_4 \end{pmatrix}$$

$$T6 := \begin{pmatrix} K1_5 \\ K2_5 \\ K3_5 \\ K4_5 \\ K5_5 \\ K6_5 \end{pmatrix} \quad T7 := \begin{pmatrix} K1_6 \\ K2_6 \\ K3_6 \\ K4_6 \\ K5_6 \\ K6_6 \end{pmatrix} \quad T8 := \begin{pmatrix} K1_7 \\ K2_7 \\ K3_7 \\ K4_7 \\ K5_7 \\ K6_7 \end{pmatrix} \quad T9 := \begin{pmatrix} K1_8 \\ K2_8 \\ K3_8 \\ K4_8 \\ K5_8 \\ K6_8 \end{pmatrix} \quad T10 := \begin{pmatrix} K1_9 \\ K2_9 \\ K3_9 \\ K4_9 \\ K5_9 \\ K6_9 \end{pmatrix}$$



$i := 0, 1..9$	$\rho_d := 7100$	$\rho_k := 1750$	$C_d := 500$	$C_k := 530$	$W_{\text{max}} := 374668$
$\alpha_d := 14 \cdot 10^{-6}$	$\alpha_k := 2.5 \cdot 10^{-6}$	$\sigma := 36$	$V_{kd} := 0.000088$	$\lambda_d := 510$	
$t_{ohl} := 60$	$b_d := 0.02$	$b_k := 0.02$	$V_{dd} := 0.00095$	$\lambda_k := 41$	
$t := 720$	$V_d := 0.0029$	$V_k := 0.000224$	$A_{\text{max}} := 0.0112$	$\alpha_2 := 0.63$	
$F_{02} := \frac{\alpha_k \cdot t}{b_k^2}$	$F_{01} := \frac{\alpha_d \cdot t}{b_d^2}$	$F_{02} = 4.5$	$F_{01} = 25.2$	$n_1 := 20$	
$m_{kaf} := \rho_k \cdot V_k$	$m_{daf} := \rho_d \cdot V_d$	$m_{kaf} = 0.392$	$m_{daf} = 20.59$	$n_2 := 4$	
$m_{kd} := \rho_k \cdot V_{kd}$	$m_{dd} := \rho_d \cdot V_{dd}$	$m_{kd} = 0.154$	$m_{dd} = 6.745$	$\xi_0 := 0$	
$\psi_k := \frac{m_{kaf} \cdot C_k}{m_{kaf} \cdot C_k + \frac{C_k \cdot (m_{kd} + m_{dd})}{2}}$	$\psi_d := \frac{m_{daf} \cdot C_d}{m_{daf} \cdot C_d + \frac{C_d \cdot (m_{dd} + m_{kd})}{2}}$	$\psi_k = 0.102$	$\psi_d = 0.857$		
$A_0 := \sqrt{F_{01}^2 + \frac{1}{9}}$	$C_0 := \frac{\psi_k \cdot b_k \cdot \lambda_d}{\psi_d \cdot b_d \cdot \lambda_k}$	$A_0 = 25.202$			

Рис. Д4. Графік розподілу температурного поля по ширині колодки

Математична модель для гальмового диску (чавун ЧНМХ) та колодки (В-ВКМ УТ-

$$C0 = 1.482$$

$$\alpha := \left[ \frac{1 + C0 \cdot (1 - \alpha^2)}{\alpha^2} \right]^{-1}$$

$$\alpha = 0.407$$

$$\tau := 0, 0.1..1$$

$$kk := \frac{\sigma \cdot A}{mkaf \cdot Ck}$$

$$kk = 1.941 \times 10^{-3}$$

$$\tau := \begin{pmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 0.5 \\ 0.6 \\ 0.7 \\ 0.8 \\ 0.9 \\ 1 \end{pmatrix}$$

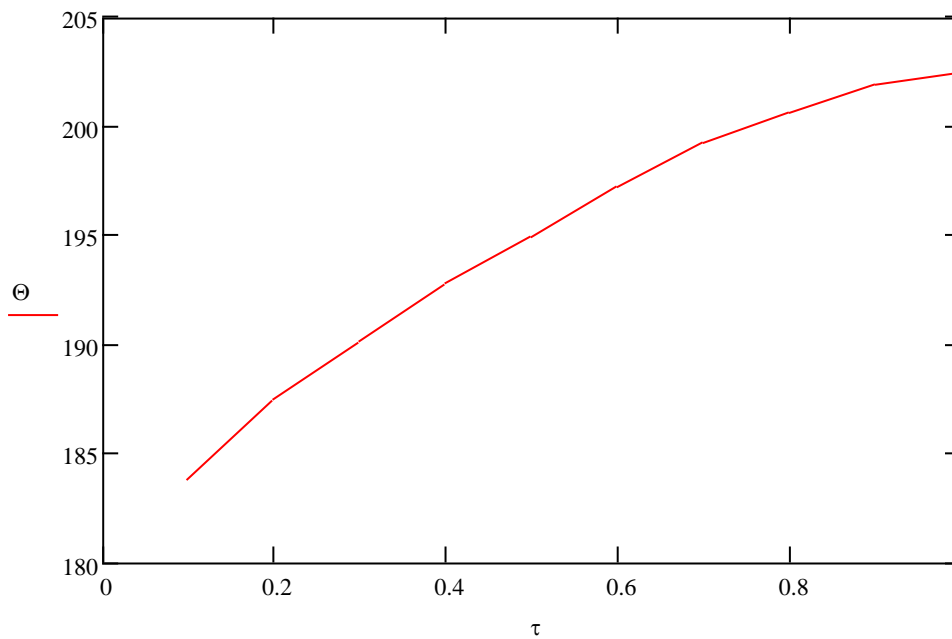
$$\tau_n := \begin{pmatrix} 1.62 \\ 2.02 \\ 2.2 \\ 1.58 \\ 0.90 \\ 0.75 \\ 0.36 \\ 0.18 \\ 0.4 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\tau_w := \begin{pmatrix} 0.19 \\ 0.34 \\ 0.45 \\ 0.57 \\ 0.67 \\ 0.77 \\ 0.86 \\ 0.92 \\ 0.97 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\Theta_i := \left[ \frac{\alpha \psi k W b k}{\lambda k t A} \cdot \left[ -\xi_0 \cdot \left( 1 - \frac{\xi_0}{2} \right) \cdot \tau_{i1} + \frac{1}{3} \cdot \tau_{i1} + F01 \cdot \tau_{i1} - \frac{2 \cdot \tau_{i1}}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{20} \left( \frac{1}{n1^2} \cdot e^{-\pi^2 \cdot n1^2 \cdot F01 \cdot \tau_{i1}} \cdot \cos(\pi \cdot n1 \cdot \xi_0) \right) \right] + \frac{\alpha \psi k W}{m k a f \cdot C k} \cdot \left( \frac{e^{-k k \cdot t o h l} - e^{-n2 \cdot k k \cdot t o h l}}{1 - e^{-k k \cdot t o h l}} \right) \right]$$

$$\Theta =$$

	0
0	183.781
1	187.464
2	190.129
3	192.78
4	194.938
5	197.262
6	199.274
7	200.641
8	201.895
9	202.481



$$\tau_{i1} := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 10 \\ 12 \end{pmatrix} \quad j := 0, 1..9$$



Рис. Д5. Графік залежності температури від часу

$$a_j := \frac{0.204 + 0.192 \cdot \tau_{1j}}{1 + 0.186 \cdot \tau_{1j}} \quad b_j := \frac{1}{0.725 + 0.035 \cdot \tau_{1j} \cdot \ln(\tau_{1j}) + \frac{-0.106}{(\tau_{1j})^2}}$$

$$c_j := \frac{1}{-0.717 + (-0.036) \cdot \tau_{1j} \cdot \ln(\tau_{1j}) + (-0.302) \cdot (\tau_{1j})^{-1} \cdot \ln(\tau_{1j})}$$

$a_j =$

0.334
0.429
0.501
0.557
0.603
0.641
0.672
0.699
0.743
0.776

$b_j =$

1.616
1.339
1.207
1.096
0.998
0.91
0.834
0.766
0.654
0.566

$c_j =$

-1.395
-1.147
-1.057
-0.979
-0.906
-0.837
-0.774
-0.717
-0.619
-0.54

$$l_j := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.25 \\ 0.5 \\ 0.625 \\ 0.75 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$K1_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_0 + c_j \cdot (l_0)^3]$$

$$K4_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_3 + c_j \cdot (l_3)^3]$$

$$K2_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_1 + c_j \cdot (l_1)^3]$$

$$K5_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_4 + c_j \cdot (l_4)^3]$$

$$K3_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_2 + c_j \cdot (l_2)^3]$$

$$K6_j := \Theta_j \cdot [a_j + b_j \cdot l_5 + c_j \cdot (l_5)^3]$$

K1 =

61.364
80.342
95.186
107.444
117.569
126.412
134.004
140.32
149.939
157.124

K2 =

131.584
139.718
149.413
157.313
163.427
168.732
173.122
176.491
180.979
184.049

K3 =

	0
0	177.774
1	178.93
2	184.802
3	189.487
4	192.73
5	195.566
6	197.774
7	199.172
8	200.303
9	200.73

K6 =

101.944
116.203
123.721
129.959
135.449
140.832
145.805
150.105
156.934
162.383

K5 =

175.904
177.813
182.517
186.267
188.922
191.428
193.49
194.874
196.193
196.923

K4 =

184.348
184.673
189.547
193.407
196
198.336
200.153
201.239
201.909
202.028

$$\begin{aligned}
T1 &:= \begin{pmatrix} K1_0 \\ K2_0 \\ K3_0 \\ K4_0 \\ K5_0 \\ K6_0 \end{pmatrix} &
T2 &:= \begin{pmatrix} K1_1 \\ K2_1 \\ K3_1 \\ K4_1 \\ K5_1 \\ K6_1 \end{pmatrix} &
T3 &:= \begin{pmatrix} K1_2 \\ K2_2 \\ K3_2 \\ K4_2 \\ K5_2 \\ K6_2 \end{pmatrix} &
T4 &:= \begin{pmatrix} K1_3 \\ K2_3 \\ K3_3 \\ K4_3 \\ K5_3 \\ K6_3 \end{pmatrix} &
T5 &:= \begin{pmatrix} K1_4 \\ K2_4 \\ K3_4 \\ K4_4 \\ K5_4 \\ K6_4 \end{pmatrix} \\
T6 &:= \begin{pmatrix} K1_5 \\ K2_5 \\ K3_5 \\ K4_5 \\ K5_5 \\ K6_5 \end{pmatrix} &
T7 &:= \begin{pmatrix} K1_6 \\ K2_6 \\ K3_6 \\ K4_6 \\ K5_6 \\ K6_6 \end{pmatrix} &
T8 &:= \begin{pmatrix} K1_7 \\ K2_7 \\ K3_7 \\ K4_7 \\ K5_7 \\ K6_7 \end{pmatrix} &
T9 &:= \begin{pmatrix} K1_8 \\ K2_8 \\ K3_8 \\ K4_8 \\ K5_8 \\ K6_8 \end{pmatrix} &
T10 &:= \begin{pmatrix} K1_9 \\ K2_9 \\ K3_9 \\ K4_9 \\ K5_9 \\ K6_9 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

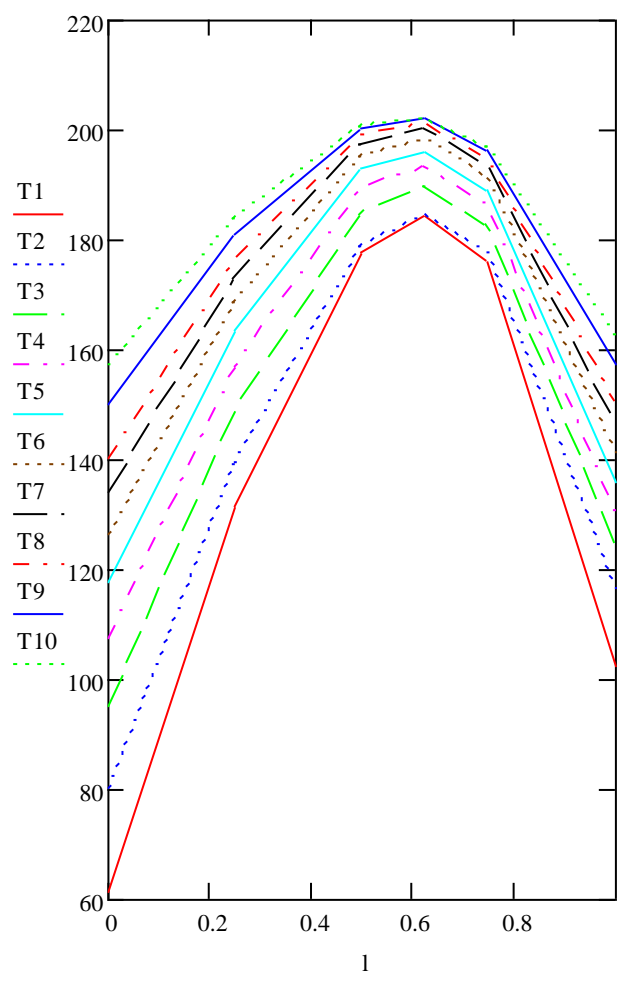


Рис. Д6. Графік розподілу температурного поля по ширині колодки