

М 432335
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. БАУМАНА



На правах рукописи
УДК. 621.86:621.891

ЧИКОВАНИ МИХАИЛ ГИВИЕВИЧ

**СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ
ТОРМОЗОВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ФРИКЦИОННОЙ ПАРЫ**

Специальность — 05.05.05 — Подъемно-транспортные
м а ш и н ы

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

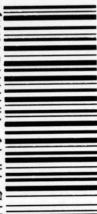
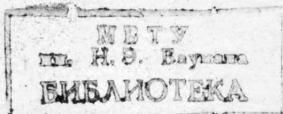
УДК.621.86:621.891

ЧИКОВАНИ МИХАИЛ ГИВИЗБИЧ

СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОВОВО НАГРУЖЕНИЯ ТОРМОЗОВ
ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ
АНАЛИЗА ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ФРИКЦИОННОЙ ПАРЫ

Специальность - 05.05.05 - Подъемно-транспортные
машины

А в т о р е ф з а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена в Московском ордена Левина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор М.П.АЛЕКСАНДРОВ

Научный консультант - кандидат технических наук, с.н.с. В.Н.ФЕДОСЕЕВ

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Н.Б.ДЕМКИН
кандидат технических наук
Е.Н.ПОПОВА

Ведущее предприятие - ВНИИАТИ

Защита диссертации состоится "18" ноября 1985 г. на заседании специализированного совета К.053.19.10 МВТУ им. Н.Э.Баумана по транспортному машиностроению по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "18" октября 1985 г.

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

Ученый секретарь специализированного совета
кандидат технических наук, доцент

В.С.ЦЫБИН

Актуальность проблемы. В связи с совершенствованием подъемно-транспортных машин (ПТМ), при общей интенсификации производства, росте скоростей и массы перемещаемых грузов, повышенные требования предъявляются к отдельным их узлам, в том числе и к тормозам. Тормозные устройства обеспечивают не только безаварийную работу подъемно-транспортных машин, но и оказывают существенное влияние на динамические нагрузки, на механизмы и металлоконструкцию, на производительность и долговечность машин. Наиболее перспективными для применения в ПТМ являются дисковые колодочные тормоза (ДКТ) с малым коэффициентом взаимного перекрытия (Квз) с вентилируемым диском и автоматической компенсацией износа фрикционных накладок.

Определяющим явлением сопровождающим фрикционное взаимодействие в тормозах является нагрев тел пары трения. Разработка новых конструкций тормозов, отвечающих повышенным требованиям современного производства, невозможна без наличия достаточно совершенного метода теплового расчета, позволяющего с определенной степенью точности установить необходимые параметры и в особенности — температуру поверхности трения. Наличие такого метода дает возможность назначать такие материалы, размеры или режимы работы механизма, которые исключат появление температур, превышающих допустимые, а также точно прогнозировать ресурс работы тормоза.

Большой вклад в разработку методов теплового расчета тормозов внесли отечественные и зарубежные ученые: Крательский И.Б., Демкин Н.Б., Александров М.П., Чичинадзе А.В., Щедров В.С., Чудаков Е.А., Пестов А.И., Пытливый Л.И., Иноземцев В.Г., Троицкая Г.И., Варфенов В.Н., Кокошкин С.С., Faszkas E., Ling F.F., Newcomb T.P., Steinhilper W., Hasselgruber H. и др.

Обычно при оценке теплового нагружения тормоза выделяют более "слабый" к термическому воздействию элемент. В паре металл — фрикционная пластмасса обычно это пластмасса, существенно изменяющая свои физико-механические свойства при повышении температуры. Такой подход верен и при оценке фрикционно-износных свойств пары трения. Вопрос оказывается более сложным

при оценке общей надежности и долговечности тормоза. С первого взгляда трудно оценить, какой элемент фрикционной пары оказывает решающее влияние на надежность тормоза. Как показал анализ многочисленных экспериментальных, а также эксплуатационных данных более "сильный" элемент - металлическое контртело, вследствие деформации и малого износа определяет геометрическую конфигурацию контурной площади касания (КПК). Даже малые тепловые деформации могут значительно влиять на процесс трения, вследствие того, что они приводят к локализации нагрузки в отдельных пятнах, при этом тепловые нагрузки еще больше возрастают и вызывают большие напряжения и деформации, что приводит к повышенному износу. Существующие методы расчета не позволяют точно прогнозировать долговечность элементов пары трения тормозов ПТМ, вследствие чего они либо раньше времени выходят из строя, либо приходится проводить их замену до наступления нормативного износа. Одной из причин неточности современных методов расчета тормозов является учет дискретного характера контактирования фрикционной пары, обусловленного поверхностными деформациями элементов пар трения. Поэтому исследование нагрева и контурной площади контакта с учетом деформации фрикционной пары ДКТ ПТМ является актуальным для современного машиностроения.

Целью работы являлось изучение влияния конструктивных параметров и режима работы на контактное взаимодействие и нагрев фрикционных пар тормозных устройств ПТМ, на основе дальнейшего развития методов исследования напряженно-деформированного состояния и нагрева фрикционных пар.

Методы исследования. Для решения трехмерных нестационарных задач теплопроводности и упругости, для тел произвольной формы применялся метод конечных элементов (МКЭ). При расчете КПК использовалась теория моделирования. Для экспериментальных исследований применялись зеркально-оптический метод и система на индуктивных преобразователях. Температура на поверхности трения измерялась малоинерционными ленточными термопарами.

Научная новизна. Используя метод конечных элементов (МКЭ), для решения уравнений теплопроводности Фурье в работе впервые разработан метод и построен алгоритм для расчета температурно-

го поля тел произвольной формы из изотропного неоднородного материала, подверженного действию вращающихся источников тепла с переменной интенсивностью. На основе построенного алгоритма исследовано температурное поле вентилируемых тормозных дисков ДКТ.

Проведено теоретическое исследование механизма образования термоупругих волн на поверхности трения вентилируемого диска, в том числе:

- Впервые исследовано трехмерное напряженно-деформированное состояние сложного по форме вентилируемого тормозного диска, нагруженного неравномерным в радиальном, осевом и окружном направлениях температурным полем, центробежными и поверхностными силами. Механические и теплофизические свойства материала приняты зависимыми от координат.

- Разработаны методики по определению контурной площади контакта, а также перераспределения давлений на фрикционном контакте в процессе торможений вследствие термоупругих деформаций диска.

На основе разработанных методов расчета разработан алгоритм расчета контактных температур с учетом перераспределения давлений в процессе торможения.

Впервые экспериментально исследованы поверхностные деформации тормозного диска в процессе торможения.

Достоверность получаемых результатов обеспечивается применением научно обоснованных методов термодинамики и механики деформированного твердого тела. Допущения, которые делались при решении того или иного вопроса, не выходили за рамки обычных допущений термодинамики, теории упругости и сопротивления материалов. Достоверность численных результатов решений конкретных задач, полученных в диссертационной работе, устанавливалась путем их сопоставления с известными частными точными решениями, а также с результатами экспериментальных исследований.

Практическая ценность работы. На основе разработанных методов исследования температурного поля и напряженно-деформированного состояния проведены тепловые расчеты реальных конструкций фрикционных пар ДКТ с учетом перераспределения давления

на контакте в процессе торможения. КПК и закономерности распределения давления определены с помощью термоупругого анализа, который в свою очередь опирается на тепловой анализ, позволяющий выявить неустановившееся распределение температур.

Для выявления факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на надежность тормозов, исследовано влияние различных параметров материала, конструктивного оформления элементов пары трения, а также режима работы на распределение температур. На основе этих исследований разработаны рекомендации по проектированию элементов фрикционной пары дисковых колодочных тормозов ПТМ.

Предложенные методы исследования могут быть использованы в проектных и конструкторских организациях при тепловых и прочностных расчетах различных конструкций.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы на машиностроительных предприятиях п/я А-3590, п/я А-7015 при разработке и испытаниях серии дисково-колодочных тормозов новой конструкции.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и неоднократно обсуждались на научных семинарах кафедры "Подъемно-транспортные машины" МВТУ им. Н.Э.Баумана (1981-1984 г.г.); на Всесоюзном научно-техническом семинаре "Влияние качества поверхности на эксплуатационные свойства подвижных сопряжений машин", Рыбинск, май, 1982 г.; на комитете "Тормозные устройства и муфты сцепления" экции Трибостехники МП НТО Машпром 1982-1984 г.г.; на конференции молодых ученых и специалистов МВТУ им. Н.Э.Баумана, декабрь, 1984 г.; на семинаре лаборатории фрикционных материалов ГосНИИмашиноведения им. А.А.Благонравова, 1984 г.; на X конференции молодых ученых "Актуальные проблемы механики и машиностроения" в институте машиноведения АН СССР, март, 1985 г.; на Международной научной конференции "Трение, износ и смазочные материалы", Ташкент, май 1985 г.; на Всесоюзной научной конференции "Новое в подъемно-транспортной технике". М., май, 1985 г.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 11 статей, в которых изложены основные положения диссертации, получено авторское свидетельство.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, основных выводов, списка литературы, иллюстраций к тексту и трех приложений. Она содержит 190 страниц машинописного текста, 4 таблиц, 55 рисунка, 33 страниц приложения, список литературы из 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности рассматриваемой проблемы и постановке задач исследования:

1. Анализ контактирования и нагрева элементов фрикционной пары дисковых колодочных тормозов ПТМ; определение факторов, влияющих на формирование контурной площади контакта; исследование влияния динамики изменения КПК на нагрев.

2. Выбор и обоснование методики теоретического и экспериментального исследования деформации и нагрева фрикционной пары ДКТ, используемого в режимах работы характерных для механизмов ПТМ.

3. Теоретическое исследование механизма образования термоупругих макроволн на поверхности трения фрикционной пары, в том числе:

- исследование трехмерного напряженно-деформированного состояния тормозных вентилируемых дисков;
- исследование топографии поверхности трения;
- разработка метода расчета контурной площади контакта.

4. Теоретическое исследование трехмерного нестационарного температурного поля вентилируемых тормозных дисков с учетом деформации элементов фрикционной пары.

5. Создание экспериментальной установки и средств измерения с целью проведения экспериментального исследования параметров термоупругих макроволн поверхности трения и нагрева тормозных дисков, а также для опытной проверки правильности результатов теоретического исследования.

6. Разработка рекомендации по проектированию элементов фрикционной пары.

В первом разделе освещены основные направления развития конструкции тормозных устройств ПТМ. Дается краткий обзор работ по созданию отечественных дисковых колодочных тормозов

для ПТМ, проведенных на кафедре ПТМ МВТУ им. Н.Э.Баумана под руководством профессора Александрова М.П. и старшего научного сотрудника Федосеева В.Н. Приводится описание конструкций дисковых колодочных тормозов, разработанных на кафедре, защищенных авторскими свидетельствами.

Проведенный анализ различных исследований о работе тормозных устройств показал, что нельзя ограничиться расчетом фрикционной пары по номинальной площади контакта. При расчете и испытаниях тормозов ПТМ необходимо учитывать дискретный характер контактирования фрикционной пары.

Формирование топографии поверхности трения определяется процессами, протекающими на контакте. К этим процессам относятся прежде всего макротепловые деформации (макроволнистость), обусловленные неравномерным нагревом и конструктивными особенностями элементов фрикционной пары. Как показали проведенные диссертантом расчеты, амплитуда термоупругих макроволн на порядок и больше превышает амплитуду технологической волнистости. Таким образом для построения топографии поверхности трения фрикционной пары необходимо исследование напряженно-деформированного состояния элементов фрикционной пары. для контртел сложной формы, таких, как вентилируемый тормозной диск необходимо исследование трехмерного напряженно-деформированного состояния без допущения осесимметричности.

Наиболее совершенные методы расчета удобных конструкций встречаются в энергомашиностроении и в авиамоторостроении. Анализ исследований напряженно-деформированного состояния закрытых колес газотурбинных двигателей показал, что наиболее полным является метод, разработанный И.В.Демьянушко. В последнее время появление метода конечных элементов (МКЭ) позволил исследователям учитывать многие особенности конструкции и расчетных нагрузок. Однако решения полученные по МКЭ для вращающихся дисков Пушкаревым В.К., Демьянушко И.В., Плотниковым Е.Р., Израилевичем Ю.Л. и др. с использованием осесимметричных конечных элементов не дают возможность оценить неравномерность деформации в окружном направлении.

В последнее время в зарубежной литературе появился метод граничных элементов (МГЭ), который дает возможность решения задачи с использованием дискретизации лишь границ области. Есте-

ственно, что реализация такой возможности в МГЭ предусматривает предварительный переход от исходной краевой задачи для дифференциальных уравнений, описывающих некоторый процесс к соотношениям, связывающим неизвестные функции на границе области. Однако, эти методы эффективны, при плавных изменениях формы исследуемого тела и расчетных нагрузок не могут быть использованы для сложной формы вентилируемых дисков.

Второй раздел посвящен расчету трехмерного напряженно-деформированного состояния тел сложной формы методом конечных элементов.

Объектом исследования является вентилируемый тормозной диск, имеющий неравномерные в радиальном, осевом и окружном направлениях температурные градиенты, нагруженный инерционными и поверхностными силами. Вследствие неравномерного нагрева диска механические и теплофизические характеристики материала приняты зависимыми от координат.

В качестве конечного элемента выбран криволинейный шестигранный элемент с 24 степенями свободы. Поле перемещений и температур внутри каждого конечного элемента аппроксимируются следующими функциями:

$$U = \sum_{i=1}^8 N_i u_i ; \quad V = \sum_{i=1}^8 N_i v_i ; \quad W = \sum_{i=1}^8 N_i w_i ; \quad T = \sum_{i=1}^8 N_i t_i ; \quad (1)$$

$$N_i = \frac{1}{\Delta z \Delta \varphi \Delta z} \left[\frac{\Delta z}{2} \pm (z - z_0) \right] \left[\frac{\Delta \varphi}{2} \pm (\varphi - \varphi_0) \right] \left[\frac{\Delta z}{2} \pm (z - z_0) \right], \quad (2)$$

где z, φ, z - координаты в цилиндрической системе координат; $\Delta z, \Delta \varphi, \Delta z$ - размеры конечного элемента; z_0, φ_0, z_0 - координаты центра тяжести конечного элемента; u, v, w - соответственно радиальные, осевые, окружные составляющие перемещения; t - температура узловых точек конечного элемента.

В основу построения уравнения равновесия конечного элемента положен принцип возможных перемещений.

$$[K] \{ \delta \} = \{ F \}, \quad (3)$$

где, $[K] = \sum_{e=1}^m [k^e]$ - матрица жесткости системы;
 $\{ \delta \} = \{ u, v, w, \dots, u_n, v_n, w_n \}'$ - столбец узловых перемещений;

$\{F\} = \sum_{i=1}^m \{f_i^e\}$ - вектор столбец нагрузки системы.

Матрица жесткости и столбец нагрузки элемента определяются выражениями:

$$[k^e] = \int_V [B]' [D] [B] dV; \quad (4)$$

$$\{f^e\} = \{f_t^e\} + \{f_m^e\} + \{f_n^e\}, \quad (5)$$

где $[B]$ - матрица градиентов, зависящая от координатных функций N_i ; $[D]$ - симметричная матрица параметров упругости элемента; $\{f_t^e\} = \int_V [B]' [D] \{\epsilon\} dV$ - столбец тепловых нагрузок; $\{f_m^e\} = \int_V \rho \omega^2 dV$ - столбец центробежных нагрузок; $\{f_n^e\} = \int_V p dS + \int_V \rho m_r ds$ - столбец поверхностных нагрузок; $\{\epsilon\} = \{\alpha_t \alpha_t \alpha_t 0 0 0\}$ - столбец тепловых деформаций; ρ - плотность материала; ω - угловая скорость; p - давление; m_r - коэффициент трения; α - коэффициент линейного расширения; t - температура.

На основании исследования матрицы теплопроводности элемента составлена модельная матрица, которая позволила значительно сократить объем вычислений для элемента.

На основе выведенных зависимостей составлен алгоритм решения задачи и программа "BADRO-U" на языке PL/I.

В конце главы проводится анализ точности метода, а также краткое описание возможности программы, в частности расчета напряженно-деформированного состояния за пределами упругости.

В третьем разделе на основе рассмотрения процессов выделения и распространения тепла в тормозах ПТМ, сформулирована в общем виде задача о распространении тепла в вентилируемом тормозном диске, на наружных торцевых поверхностях которого периодически действуют источники тепла переменной мощности, а остальные поверхности охлаждаются окружающей средой. Математическая модель процесса выделения и распространения тепла в диске представляет собой уравнение теплопроводности Фурье в цилиндрических координатах с граничными условиями II и III рода. Используя метод конечных элементов и конечно-разностное решение дифференциальных уравнений, исходная задача сводится к решению системы линейных уравнений типа:

$$([K_e] + 2/\Delta t [C]) \{T\} = 2/\Delta t [C] \{T_0\} + \{F_e\}, \quad (6)$$

где $[K_r]$ - матрица теплопроводности; $[C]$ - матрица демпфирования; $\{F_r\}$ - столбец нагрузок; $\{T\}$ - столбец неизвестных температур; $\{T_0\}$ - столбец начальных температур; Δt - шаг по времени.

Аппроксимирующая функция температур внутри конечного элемента в виде криволинейного нестигматика определяется уравнениями (1) и (2). Матрица теплопроводности элемента представляет собой сумму двух симметричных матриц $[A]$ и $[B]$, размерность (8×8) , элементы которых определяются выражениями.

$$a_{ij} = \int_V \lambda \left(\frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} + \frac{\partial N_i}{\partial \varphi} \frac{\partial N_j}{\partial \varphi} + \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} \right) dV; \quad (7)$$

$$b_{ij} = \int_{S_1} c N_i N_j ds, \quad (8)$$

где λ и c соответственно коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи; S_2 - поверхность элемента с конвективным теплообменом. Матрица демпфирования элемента является симметричной матрицей, размерность (8×8) , компоненты которых определяются выражением $d_{ij} = \int_V c N_i N_j dV$, где c - удельная теплоемкость. Столбец нагрузки для элемента аналогично матрице теплопроводности состоит из двух столбцов, компоненты которых определяются выражениями

$$\{q_i\} = \int_{S_1} q N_i ds; \quad \{q_i\} = \int_{S_2} c T_{cp} N_i ds, \quad (9)$$

где $q = \mu_t r \omega$ - интенсивность теплового потока, S_1 - поверхность элемента, на которой происходит приток тепла, T_{cp} - температура окружающей среды.

Если величина теплового потока генерируемого на поверхности трения в течение времени торможения не меняется, тогда система уравнений имеет вид $[K_r]\{T\} = \{F_r\}$. Шаг по времени - Δt рассчитывался в соответствии с интервалами времени δt_q и δt_k , в течение которых происходит приток тепла, или конвективный теплообмен. Переменность интенсивности теплового потока при постоянном коэффициенте трения, определяется частотой вращения и перераспределением давления на поверхности трения.

Величины δt_q и δt_k определяются законом движения диска при торможении. На основе вышеприведенных зависимостей разработан алгоритм решения задачи и составлена программа "BADRO-TM".

на лампе " PL/1 ".

В четвертом разделе на основе анализа условия контактирования при наличии термоупругих волн на поверхности трения, разработана методика по определению контурной площади контакта и перераспределения давлений для упругих и пластических контактов. При контакте деформированного диска с мягким фрикционным материалом (на каучуковом связующем) для оценки перераспределения давлений на контакте предложена формула $P_i = k_i p$, где: $k_i = W_i / W_{cp}$; W_{cp} - среднее значение осевых перемещений поверхностных узлов диска; p - номинальное давление. В случае применения твердых фрикционных материалов на смоляном связующем, когда контакт происходит по отдельным пятнам, деформированная поверхность диска моделируется цилиндрическими или конусными поверхностями. Далее, используя условие неизменяемости осевых усилий, действующих на тормозную колодку, разработана методика определения контурных площадок контакта.

для расчета температуры контакта, а также температурного поля диска с учетом формирования КНК и перераспределения давлений в процессе торможений, предложен метод последовательных приближений, который включает в себя разработанные выше алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния и температур. Расчет ведется в следующей последовательности: - на основе исходных данных решается температурная задача; с учетом полученных значений температур рассчитывается напряженно-деформированное состояние диска; с помощью полученного массива перемещений рассчитываются: контурные площади контакта, контурные давления, коэффициенты, учитывающие перераспределения давлений; далее вторично решается температурная задача с учетом новых граничных условий. Цикл повторяется несколько раз, пока результаты решения не станут близки к соответствующим результатам предыдущего приближения.

В пятом разделе приведено описание экспериментальной установки, а также результаты экспериментальных исследований. Для измерений амплитуды термоупругих волн на поверхности трения в процессе торможений, были разработаны две установки: вращающаяся зеркально-оптическая приставка и система на индуктивных преобразователях, позволяющие проводить измерения непосред-

венно в процессе торможения. Принцип действия зеркально-оптической приставки основан на бесконтактном методе отраженной сетки. Метод отличается высокой чувствительностью и точностью измерений, отсутствием влияния на точность измерений различных электромагнитных полей. Однако требование наличия полированной поверхности у исследуемого объекта не позволяло применять данный метод для чугунных дисков. Вторая измерительная система включает в себя индуктивные датчики с двумя обмотками, обладающие взаимоиндукцией, зависящей от величины воздушного зазора между датчиком и поверхностью измерительной базы. Измерительная система позволяет регистрировать изменение воздушного зазора с точностью до 1,0 мкм.

Для измерения температур на поверхности трения применялись безинерционные ленточные термодатчики со спаем, формирующимся в процессе трения, позволяющие зарегистрировать и измерить пульсации температур на поверхности трения тормозного диска. В процессе эксперимента определялись амплитуды термоупругих волн и температуры поверхности трения фрикционной пары ДКТ, при работе в повторно-кратковременном режиме. Испытания проводились с вентилируемыми дисками из чугуна - СЧ-15 и из дуралюминия - Д16, в паре с фрикционными материалами И45-40 и 242 (ВНИИАТИ).

Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические выводы и правильность разработанных методов расчета деформации и температур. Было установлено: что максимальных значений амплитуды термоупругих волн достигают в начале торможений у выходной кромки накладки, ближе к внешнему радиусу трения; при определении максимальной поверхностной температуры с учетом дискретности контакта погрешность расчета на 25-35% ниже, чем при расчете с номинальной площадью.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

I. Анализ, имеющихся в литературе сведений о работе тормозных устройств, показывает, что повышение температуры во время торможения приводит к появлению тепловых деформаций в элементах фрикционной пары и к изменению их формы. Даже малые тепловые деформации могут сильно влиять на процесс трения, вследствие того, что они приводят к локализации нагрузки в отдельных пятнах кон-

такта, при этом тепловые нагрузки еще больше возрастают и вызывают высокие значения напряжений и деформаций, что приводит к повышенному износу. Поэтому при расчете и испытаниях тормозов необходимо учитывать дискретный характер контактирования фрикционной пары (характеристикой которого является КПК), а также закон изменения давления на пятнах контакта.

2. Ввиду того, что механические показатели асбодфрикционного материала значительно ниже ($H\bar{B}-20 + 27$), чем металлов, на топографию контакта решающее влияние оказывает тепловые деформации металлических контртел.

3. Проведено теоретическое исследование механизма образования термоупругих макроволн на поверхности трения вентилируемого диска, в том числе:

- впервые исследовано трехмерное напряженно-деформированное состояние неравномерно нагретого вентилируемого тормозного диска, нагруженного центробежными и поверхностными силами. Механические и тепло-физические характеристики материала приняты зависимыми от координат;

- на основе этих исследований разработан алгоритм решения задачи, который реализован в программе "BADRO-U";

- расчеты по разработанному алгоритму показали, что на величину осевых перемещений тормозного диска основное влияние оказывает температурное поле диска. Амплитуда термоупругих волн значительно превосходит амплитуду исходной волнистости дорожки трения диска.

4. На основе анализа контактирования фрикционной пары ДКТ образованной с мягкими (лаучуковое связующее) и твердыми (смоляное связующее) фрикционными материалами в паре контакта с деформируемым металлическим тормозным диском, разработана методика по определению КПК и перераспределения давлений на пятнах контакта. Новым в этой методике является возможность определения КПК и закона изменений давлений в нестационарном режиме (при торможении) в зависимости от времени.

5. В результате рассмотрения процессов выделения и распространения тепла в ДКТ разработан алгоритм исследования нестационарного трехмерного температурного поля тормозных дисков. При этом учтено влияние охлаждающих ребер на температурное поле вентилируемого тормозного диска. Алгоритм исследования

реализован в программе " ВАРКО-ТН ".

6. Составлен алгоритм исследования динамики нагрева и формирования КПК в процессе торможения. Площади зон контакта и распределение давления определены с помощью термоупругого анализа, который в свою очередь опирается на тепловой анализ, позволяющий выявить неустойчившееся распределение температур.

7. Для выявления факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на безопасность и надежность тормозов, исследовано влияние параметров материала, конструктивного оформления элементов пары трения, а также режима работы на распределение температур.

- В тормозных дисках из материалов с повышенными свойствами теплопроводности и температуропроводности наблюдаются сравнительно малые значения температурных градиентов и соответственно уровень тепловых деформаций ниже.

- Большое влияние на максимальную поверхностную температуру вентилируемых тормозных дисков оказывают форма диска. Причем она оказывает двойное влияние на максимальную поверхностную температуру: это объясняется тем, что форма диска влияет на объемную температуру диска и на деформируемость диска. Эти факторы не всегда оказывают однозначное влияние на максимальную поверхностную температуру. Поэтому при проектировании вентилируемых тормозных дисков недопустимо руководствоваться минимизацией одной объемной температуры, не учитывая при этом деформируемость диска или наоборот.

- Ввиду того, что температурное поле тормозного диска характеризуется большой неравномерностью, учет зависимости теплофизических и механических свойств материала от температуры в расчетах может вносить существенные погрешности.

8. Разработаны и апробированы две измерительные системы для регистрации деформации на поверхности трения диска - вращающаяся зеркально-оптическая приставка и система на индуктивных преобразователях.

9. Впервые экспериментально исследованы деформации тормозного диска непосредственно в процессе торможения. Было показано, что максимальных значений амплитуды термоупругих волн достигают в начале торможения, у выходной кромки накладок, ближе к внешнему радиусу трения. Сравнение расчетных значений ампли-

туд термоупругих волн и температур с экспериментально измерениями подтвердило применимость предлагаемых методов расчета, а также подтвердило правильность теоретических выводов.

10. В результате проведенных исследований выработаны рекомендации по выбору толщины стенок диска, числа вентиляционных каналов, относительной окружной толщины ребер, коэффициента взаимного перекрытия и материалов фрикционной пары в зависимости от режима работы тормоза. При учете разработанных рекомендаций можно снизить максимальную поверхностную температуру на 30-45%.

11. Используя разработанный метод построения топографии поверхности трения можно уточнить расчет циклов торможения приводящих при различных условиях работы тормоза к единичному разрушению поверхности трения и более точно прогнозировать ресурс работы фрикционной накладки.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Чиковани М.Г., Федосеев В.Н. Термоупругие деформации поверхности трения тяжелонагруженного тормоза ПТМ. - Изв. вузов. Машиностроение, 1984, № 8, с. 98-102.
2. Чиковани М.Г., Федосеев В.Н. Температурное поле вентилируемого диска дисково-колодочного тормоза с каналами произвольной формы. - Изв. вузов. Машиностроение, 1985, № 3, с. 14-19.
3. Чиковани М.Г. Исследование нагрева дисково-колодочного тормоза ПТМ с учетом динамики формирования контурной площади контакта. - Тез. докл. на Всесоюзной научной конф. - Новое в подъемно-транспортной технике. М., 1985, с. 76.
4. Чиковани М.Г. Экспериментальное исследование термоупругих деформаций поверхности трения тяжелонагруженного тормоза ПТМ. / М.Г. Чиковани, В.Н. Федосеев, Т.В. Хурцидзе. - Тез. докл. на Всесоюзной научной конф. - Новое в подъемно-транспортной технике. М., 1985., с. 76-77.
5. Моделирование износа нагруженных фрикционных пар при повторно-кратковременном режиме. / В.Н. Федосеев, М.П. Александров, А.М. Романко, М.Г. Чиковани. - Тез. докл. на международной научной конференции. - Трение, износ и смазочные материалы. Ташкент, 1985, в. 366-370.

6. Федосеев В.Н., Чиковани М.Г. Триботехника тормозов подъемно-транспортных машин. - Труды / МВТУ, 1985, № 438, с. 42-57.
7. Чиковани М.Г. Решение нестационарных тепловых задач применительно к тормозным устройствам ПТМ. - Изв. вузов. Машиностроение, 1985, № 9.
8. Чиковани М.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование узлов трения. / М.Г.Чиковани, А.А.Носко, В.А.Поталов и др. - Тез. докл. на X конф. молодых ученых по актуальным вопросам механики и машиноведения. ИМАШ АН СССР. 1985.
9. Чиковани М.Г. Решение трехмерных задач нестационарной теплопроводности и упругости методом конечных элементов. - Изв. вузов. Машиностроение, 1985, № 10.
10. Разработка высокомоментных дисково-колодочных тормозов стреловых кранов манипуляторов: Отчет по теме № КО480-84 рук. работы М.П.Александров. Отв. исп. В.Н.Федосеев, испол. М.Г.Чиковани, Т.В.Хурцидзе, ГР № 018400260696, М., МВТУ, 1984.
11. Разработка и исследование дисково-колодочных тормозов для стреловых кранов серии КС: Отчет по теме № КО78-84, рук. работы В.Н.Федосеев. Отв. испол. Т.В.Хурцидзе, испол. М.Г.Чиковани, А.А.Носко, Т.В.Хурцидзе. ГР № 01830027244, М., МВТУ, 1984.
12. А.С. 1120122 (СССР). Дисково-колодочный тормоз. / М.П.Александров, М.Г.Чиковани - Опубликовано в Бюллетене изобретений и товарных знаков, 1984, № 39.



З. 4660 т. 120 УЭ 12198

Кутаисское полиграфическое производственное объединение
Государственного комитета по делам издательств, полиграфии и
книжной торговли Грузинской ССР.
г. Кутаиси, пр. И. Чавчавадзе, 33.