

На правах рукописи

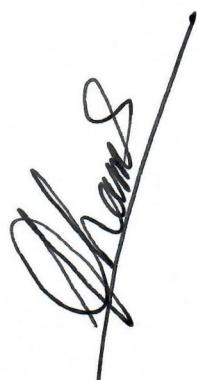
ДО СУАН ТХАНЬ

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ТОРМОЗОВ
ПОДЪЁМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН С ФРИКЦИОННЫМИ
ПОЛИМЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъёмно-транспортные
машины

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2021



Работа выполнена на кафедре подъёмно-транспортных систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: Ромашко Александр Мефодиевич
кандидат технических наук, доцент.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры
«Подъёмно-транспортные системы».

Официальные оппоненты: Сладкова Любовь Александровна
доктор технических наук, профессор.
ФГАОУ ВО «Российский университет
транспорта», профессор кафедры «Наземные
транспортно-технологические средства».

Потапов Валентин Алексеевич
кандидат технических наук.
ЗАО «ИТЦ «КРОС», генеральный директор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт машиноведения
имени А.А. Благонравова Российской
академии наук.

Защита состоится «27» декабря 2021 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «15» ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



В.А. Горелов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Тормоза являются одними из важнейших элементов подъёмно-транспортных машин (ПТМ), обеспечивающих безопасную эксплуатацию. В тормозах механизмов подъёма ПТМ тормозной момент при торможении предопределён фрикционными характеристиками материалов пары трения, конструкцией тормоза и его предварительной регулировкой, так как по существующим требованиям безопасной эксплуатации он должен функционировать автоматически без участия оператора. Для таких тормозов очень важными характеристиками являются значения коэффициента трения при эксплуатации и стабильность коэффициента трения. Коэффициент трения фрикционных материалов может изменяться при нагреве, поэтому при расчётах тормозных устройств и при экспериментальной их отработке важно правильно оценить степень нагрева поверхности трения при работе тормоза.

Одним из путей совершенствования тормозов ПТМ является создание новых энергоёмких тормозных устройств, таких как дисковые колодочные тормоза и дисковые тормоза. Большая энергоёмкость и повышенная износостойкость достигается за счёт того, что в дисковых тормозах возможно применение фрикционных полимерных материалов (ФПМ), более твёрдых по сравнению с традиционными фрикционными материалами, используемыми в распространённых колодочных тормозах ПТМ с тормозными шкивами (6КВ-10, ЭМ-1, ЭМ-2). Но, повышенная твёрдость фрикционного материала приводит к более неравномерному нагреву поверхности трения, за счёт дискретности поверхности контакта тел пары трения.

Нагрев тормоза и его элементов является одним из основных параметров, ограничивающих величину максимального тормозного момента, на который рассчитывается тормоз. В создание методов расчета тепловой нагруженности тормозов большой вклад внесли учёные: М.П. Александров, А.В. Чичинадзе, Ф.К. Германчук, Л.М. Пыжевич, Е.В. Зиновьев, Т.Р. Newcomb, G.A.G. Fazekas, H. Hasselgruber и другие. В настоящее время хорошо разработаны расчетные и экспериментальные методы определения объёмной температуры тел пары трения, средней температуры на номинальной (общей) поверхности трения и температуры вспышки. Но эти методы не позволяют определить распределение температур по поверхности трения, важное для прогнозирования поведения фрикционных полимерных материалов в тормозах. При работе ФПМ в обычных для них режимах, температура нагрева поверхности трения в местах фактического контакта может существенно отличаться от средней поверхностной температуры. На какой-то части пятен контакта температура нагрева ФПМ может кратковременно достигать таких значений, при которых фрикционный материал теряет способность воспринимать нормальную нагрузку на контакте. Для расчёта тепловой нагруженности тормозов с ФПМ нужен такой метод расчёта, который учитывал бы дискретность контакта и неравномерный нагрев пятен фактического контакта поверхности трения.

В настоящее время не существует методов определения нагрева поверхности трения ФПМ в дисковых и дисковых колодочных тормозах,

определяющих неравномерность распределения температуры по поверхности трения.

Создание метода определения тепловой нагруженности тормозов с фрикционными полимерными материалами является актуальным для оценки фрикционных свойств ФПМ при моделировании.

Создание метода определения тепловой нагруженности фрикционных полимерных материалов учитывающего дискретность контакта позволит сократить сроки разработки новых конструкций тормозов ПТМ, сэкономить ресурсы при испытаниях новых фрикционных полимерных материалов для них.

Целью работы является совершенствование методов разработки тормозных устройств ПТМ, направленных на повышение эффективности и безопасности их эксплуатации, путем определения тепловой нагруженности накладок из фрикционных полимерных материалов, с учётом распределения фактического давления на контакте и распределения температур по поверхности трения, применительно к дисковым колодочным тормозам.

Задачи исследования:

1. Выбор метода теоретического моделирования процесса сухого трения в узлах ПТМ.
2. Анализ влияния температуры на физико-механические свойства ФПМ.
3. Создание компьютерной модели микрогеометрии поверхности по стандартным параметрам шероховатости.
4. Разработка модели статического контакта ФПМ с металлическим контроллером при различных температурах нагрева поверхности контакта.
5. Разработка модели контакта ФПМ с металлическим контроллером в процессе сухого трения, с учетом тепловыделения в местах фактического контакта.
6. Экспериментальное определение механических свойств ФПМ при высоких температурах.
7. Фрикционно-износные испытания образцов ФПМ на машине трения, для установления связи шероховатости поверхности трения ФПМ и интенсивности изнашивания, при различных режимах трения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан новый метод определения тепловых нагрузок на поверхностях трения фрикционных полимерных материалов при их работе в дисковых колодочных тормозах подъёмно-транспортных машин, позволяющий более подробно определять эти нагрузки и прогнозировать их влияние на фрикционные и контактные характеристики в процессе торможения.

Для реализации метода создана новая компьютерная модель процесса сухого трения, учитывающая нагрев при трении и микрогеометрию поверхности трения. Модель позволяет получить распределение температуры на фактических площадях контакта, распределение фактического давления по номинальной поверхности трения для конкретных ФПМ в зависимости от внешних параметров, таких как: номинальное давление, скорость скольжения, режим трения.

2. В результате экспериментального исследования установлено следующее:

- в стационарном режиме трения исходная микрография преобразуется в процессе трения в микрографию, соответствующую режиму трения;

- интенсивность изнашивания в стационарном режиме трения остается постоянной, после того как установится микрография, соответствующая режиму трения.

Практическая значимость результатов исследования

Предлагаемый метод определения тепловой нагруженности фрикционных полимерных материалов позволяет сократить сроки разработки новых конструкций тормозов ПТМ за счёт получения более точной информации о тепловой нагруженности накладок дисковых колодочных тормозов и адекватной интерпретации результатов лабораторных экспериментов при испытаниях новых фрикционных полимерных материалов для них.

Для практического применения метода созданы программы для моделирования микрографии шероховатых поверхностей по стандартным параметрам, для решения задачи статического контакта ФПМ в узлах ПТМ при различных температурах, позволяющее определить такие контактные характеристики как: фактическая площадь контакта, распределение фактического давления и сближение, с учетом механических свойств ФПМ (для контакта шероховатой поверхности более мягкого материала с гладкой поверхностью более твердого материала).

Разработана новая компьютерная модель процесса сухого трения фрикционных полимерных материалов, позволяющую определить контактные характеристики с учетом тепловыделения на фактических пятнах контакта.

Экспериментально показано, что при фрикционно-износных испытаниях ФПМ, кроме скорости, нормальной нагрузки и режима трения для сопоставления результатов испытаний необходимо использовать информацию о микрографии поверхности трения ФПМ, получившейся в процессе трения.

Достоверность и обоснованность подтверждается: экспериментальным определением параметров микрографии поверхности трения и интенсивности износа; экспериментальным определением механических свойств ФПМ в зависимости от температуры; использованием различных методов для проверки расчетов с использованием модели; сравнением с результатами других исследователей.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационного исследования внедрены в ЗАО Концерн «ТРАНСМАШ» и в учебный процесс кафедры подъёмно-транспортных систем МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Методы исследования. В работе проводились теоретические и экспериментальные исследования. В теоретическом исследовании проводился анализ существующих методов расчёта контактных характеристик при трении, и методов расчёта тепловой нагруженности пары трения тормозов. На основе этого анализа создавались программы компьютерного моделирования. Программы компьютерного моделирования реализованы на языке С++. Экспериментальные исследования проводились на машине трения с образцами

фрикционных материалов, а также на испытательной машине для определения механических свойств материалов при различных температурах.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

1. Метод определения тепловых нагрузок на поверхностях трения фрикционных полимерных материалов при их работе в дисковых колодочных тормозах подъёмно-транспортных машин.

2. Алгоритм программы и программа создания микрографии шероховатых поверхностей по стандартным параметрам. При создании компьютерной модели шероховатой поверхности в программе могут задаваться различные наборы из стандартных параметров. Достоверность созданной поверхности проверялась расчётом опорной кривой по известным методам, разработанным другими исследователями, с использованием измеренных стандартных параметров шероховатости.

3. Алгоритм программы и программа для решения задачи статического контакта ФПМ в узлах трения ПТМ при различных температурах с учетом шероховатости поверхности, позволяющая определить контактные характеристики. Программа позволяет использовать различные критерии перехода от упругой деформации материала к пластической.

4. Алгоритм и компьютерная модель для оценки влияния нагрева контактирующих выступов, вследствие сухого трения, на контактные характеристики пары трения с ФПМ. Компьютерная модель позволяет рассчитать распределение температуры на фактических площадях контакта, распределение фактического давления по поверхности трения.

5. Экспериментально установленная связь шероховатости, формируемой при трении и интенсивности изнашивания.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на 22, 23, 24-ой московских международных межвузовских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные строительные, дорожные путевые машины и робототехнические комплексы». М.: МАДИ, 2018; М.: МИСИ - МГСУ, 2019; М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020; на 20-ой всероссийской конференции с международным участием «Подъемно-транспортная техника, внутриводской транспорт, склады». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019; на XIII Международной научно-технической конференции «Трибология – Машиностроению». М.: ИМАШ РАН, 2020; на VII Всероссийской научно-практической конференции «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники». Брянск: БГТУ, 2021; на научных семинарах-заседаниях кафедры подъемно-транспортных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана. М., 2017-2021.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, из них 3 статьи в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, 1 статья в сборнике трудов, индексируемом в Scopus и 2 свидетельства о регистрации Программы ЭВМ в РосПатенте. Общий объем публикаций 1,85 п.л.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, литературы из 117

наименований и приложения. Текст диссертации изложен на 166 страницах, содержит 76 рисунков и 16 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели, задачи и методы исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены сведения по апробации, внедрению результатов, публикациях, структуре и объему диссертации.

В Главе 1 проведён обзор методов, связанных с моделированием сухого трения. Показано, что:

- в исследованиях, направленных на создание новых и совершенствование существующих узлов трения, применяются различные виды моделирования: физическое, математическое, аналоговое, компьютерное. В последнее время для анализа триботехнических систем все шире используется компьютерное моделирование;

- при физическом моделировании важное значение имеет правильный выбор основных параметров моделирования, соответствие которых позволяет адекватно переносить результаты лабораторных испытаний на натурные узлы трения. В качестве одних из основных параметров физического моделирования фрикционных узлов ПТМ и СДМ предлагается использовать значения контактного давления на фактических пятнах контакта и распределение температур нагрева поверхностей трения в местах фактического контакта;

- экспериментальное измерение давлений на фактических пятнах контакта при сухом трении и распределения температур на площади фактического контакта затруднительно. Современные информационные технологии позволяют рассчитывать эти параметры процесса сухого трения. В настоящее время в триботехнике накоплены теоретические и экспериментальные результаты, позволяющие создавать компьютерные модели триботехнических систем, более точно учитывающие физические процессы контактирования тел фрикционной пары и их нагрев при трении, а именно: дискретный контакт тел пары трения, локальный нагрев пятен фактического контакта и изменение механических свойств материалов пары трения при таком нагреве;

- достоверность результатов, полученных при компьютерном моделировании процесса трения может подтверждаться сравнением с результатами исследований других авторов, сравнением с результатами расчётов по известным и апробированным математическим моделям триботехнических систем, использованием в качестве исходных данных результатов физического моделирования, экспериментальным исследованием триботехнических систем.

Глава 2 посвящена анализу особенностей теплового нагружения фрикционных полимерных материалов при работе в дисковых колодочных тормозах подъёмно-транспортных машин, теоретическому и экспериментальному исследованию влияния температуры на контактные характеристики фрикционных полимерных материалов (ФПМ), определению критериев перехода от упругой деформации к пластической применительно к

ФПМ, определению коэффициента распределения тепловых потоков, определению распределения температуры по глубине от поверхности трения.

ФПМ представляют собой многокомпонентные композиции. Механические свойства ФПМ определяются составом и свойствами его компонентов и значительно изменяются под действием повышенных температур. Зависимость прочностных показателей (пределы прочности при разрыве, сжатии, срезе) и твердости от температуры для большинства фрикционных полимерных материалов имеют падающий характер и описываются экспонентой. При изменении температуры от 20°C до 300°C снижение показателей достигает значительной величины – до 90%. В среднем для всех исследуемых материалов снижение прочности при растяжении, сжатии и срезе составляет около 65%, а снижение твердости достигает примерно 75%.

В работе были проведены экспериментальные исследования некоторых ФПМ. Проведено испытание на прочность при сжатии образцов прямоугольного сечения (по ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) и ГОСТ - 14359-69) из фрикционных материалов 145-40-69 и 2-339, при различных температурах. На Рис. 1 представлены диаграммы «напряжение – деформация» при сжатии ФПМ 145-40-69 и 2-339 при температурах 293К, 423К и 523К.

Приведенные на Рис. 1 и Рис. 2 результаты экспериментов подтверждают, что с ростом температуры показатели механических свойств (например, предел прочности, модуль упругости...) у ФПМ 145-40-69 и 2-339 снижаются. Чем больше температура, тем они становятся более пластичными.

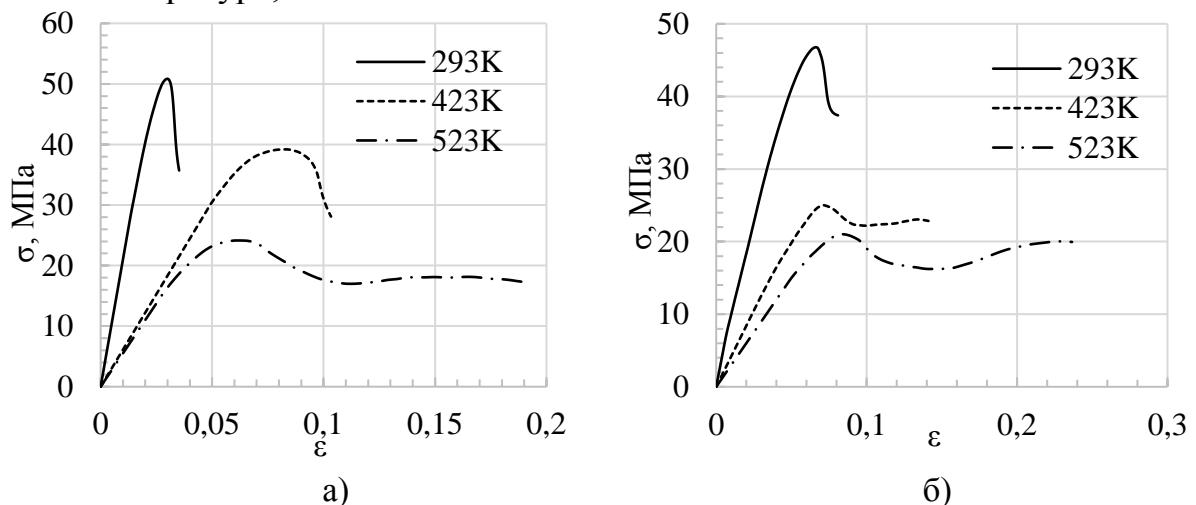


Рис. 1. Диаграмма «напряжение – относительная деформация» при сжатии ФПМ 145-40-69 (а) и ФПМ 2-339 (б) при разных температурах

В дисковых колодочных тормозах, где в основном применяются полимерные фрикционные материалы, работающие в паре со стальным или чугунным диском, большая часть тепла трения поступает в металлический диск. Если принять, что все выделившееся при трении тепло поступает в диск, то ошибка расчёта интенсивности теплового потока будет составлять от 1% до 5%. По характеру распределения тепла в дисковых колодочных тормозах видно, что одна и та же ошибка в определении этого коэффициента меньше влияет на конечный результат при расчете температур в диске. Поэтому в настоящей работе для определения температуры поверхности трения сделано допущение о

том, что все выделившееся при трении тепло поступает в диск. По значению температуры поверхности диска определяется распределения тепла в накладке. То-есть, делается допущение о том, что температура поверхности диска и контактирующего выступа накладки - одинаковая. По крайней мере, температура на поверхности выступа накладки не может быть ниже этого значения. По этой температуре можно рассчитать и приближенное значение коэффициента распределения тепловых потоков. В качестве примера определения коэффициента распределения тепловых потоков для накладки проводился расчет α_{tt} (коэффициент распределения тепловых потоков). Для пары трения: сталь 45 - ФПМ 2-339, значение α_{tt} получается 0,074, а для пары трения: чугун ЧНМХ - ФПМ, имеющий средние теплофизические параметры, $\alpha_{tt} = 0,076$, при режиме трения: скорость скольжения 5 м/с; номинальное давление 1 МПа. Расчет проводился по программе, написанной на языке C++.

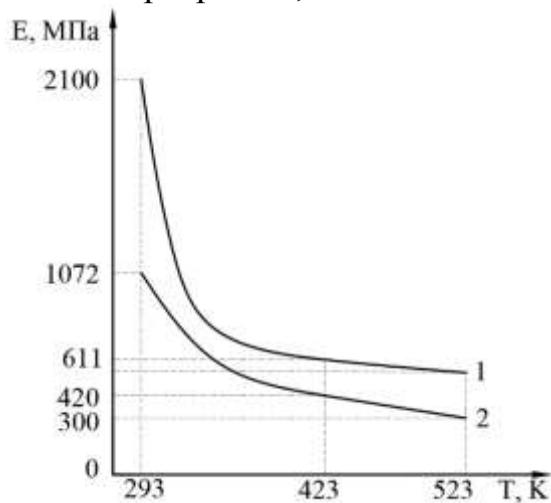


Рис. 2. Зависимости модуля упругости от температуры:
1 – ФПМ 145-40-69; 2 – ФПМ 2-339

В узлах трения ПТМ пятна фактического контакта находятся достаточно далеко друг от друга. Взаимным влиянием нагрева соседних пятен можно пренебречь при относительно малом времени существования контакта. Распространение тепла в выступах и нагрев отдельных выступов поверхности трения можно теоретически анализировать используя решение одномерной задачи теплопроводности с граничными условиями 2 рода.

Твердость материала также может определять давление на пятнах фактического касания. Чем больше твердость, тем больше давление, следовательно, выше мощность трения и больше величина температурных вспышек в местах контакта. При пластической деформации сферического индентора напряжение на контакте равно твердости. Средние нормальные напряжения на фактическом контакте как показал А.Ю. Ишлинский, будут постоянны и равны твердости материала по Бринеллю. Поэтому при расчетах фактическое давление при пластической деформации можно принимать равным твердости по Бринеллю.

В Главе 3 представлены компьютерные модели (модель №1 создания микрографии поверхности; модель №2 статического контакта при различных

температурах; модель №3 сухого трения фрикционных полимерных материалов) и программа статического контакта.

Разработана компьютерная модель №1, позволяющая создать координаты микрографии шероховатых поверхностей. Микрография шероховатой поверхности представлена совокупностью элементов в виде стержней, имеющих одинаковое прямоугольное сечение, но разные высоты. Сформулированы комплексы условий K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7 из стандартных характеристик шероховатых поверхностей, позволяющие сократить ресурсы при моделировании микрографии поверхности. Проведено сравнение моделирования поверхностей при различных комплексах условий с известными аналитическими моделями шероховатых поверхностей. В результате моделирования получаются пространственные координаты точек поверхности по осям x , y , z . В качестве примера рассмотрены поверхности с параметрами шероховатости (l , Ra , Rp , $Rmax$, Sm , tm , $t20$ – параметры шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73):

- поверхность №1: $l = 0,8$ мм; $Ra = 2,0$ мкм; $Rp = 5,0$ мкм; $Rmax = 10,0$ мкм; $Sm = 160$ мкм; $t20 = 0,1$; $tm = 0,5$;
- поверхность №2: $l = 2,5$ мм; $Ra = 4,0$ мкм; $Rp = 9,0$ мкм; $Rmax = 16,0$ мкм; $Sm = 200$ мкм; $t20 = 0,2$; $tm = 0,5$.

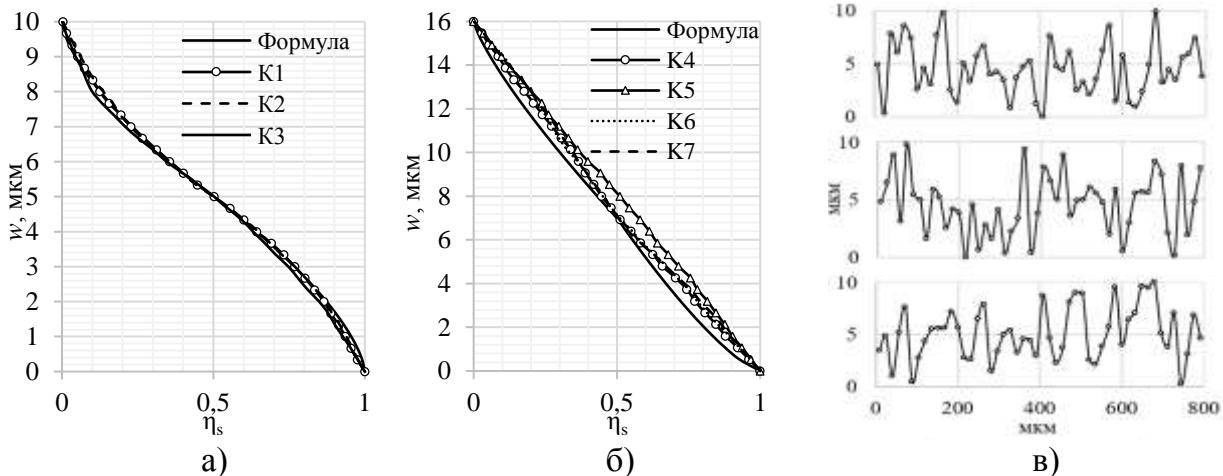


Рис. 3. Результаты расчетов по модели создания микрографии поверхности:
а) – кривые опорной поверхности №1 по комплексам условий K1, K2, K3 и по формуле А.В. Чичинадзе; б) – кривые опорной поверхности №2 по комплексам условий K4, K5, K6, K7 и по формуле А.В. Чичинадзе; в) – профилограммы поверхности №1, рассчитанные по модели

Поверхность, полученная в результате моделирования, имеет опорную кривую близкую к кривой опорной поверхности, рассчитанной по формулам, предложенным другими учеными.

Результаты моделирования можно использовать для построения графической модели поверхности и также для расчета в других графических программах, таких как Excel, Mathlab, APDL по МКЭ и т.д. Представлен способ построения микрографии поверхности в программе APDL.

Создана компьютерная модель №2 статического контакта при различных температурах, которая учитывает особенности микрографии поверхности,

дискретность контакта и механические свойства ФПМ, используемых в узлах трения ПТМ. Модель позволяет учесть изменение механических свойств ФПМ при различных температурах. Модель статического контакта позволяет оценить распределение давления на фактических пятнах контакта и определить основные характеристики контакта.

В модели учитывается, что при нагружении фрикционный материал деформируется сначала упруго, затем упругопластически, а при давлении на контакте, достигающем твердости материала по Бринеллю (при соответствующей температуре) – пластически. Предполагается, что площадь контакта определяется механическими характеристиками фрикционного материала (более «мягкого»). В модели учитывается, что механические характеристики материала при различных температурах изменяются и предполагается, что они должны быть заранее определены экспериментально. Поверхность контакта шероховатых поверхностей имеет дискретный характер.

На Рис. 4 представлены результаты моделирования. А именно: влияние номинального давления p_a на отношение фактической площади к номинальной A_r/A_a , отношение сближения к максимальной высоте шероховатости w/R_{max} , среднее фактическое давление p_{rcp} и объём зазора V в контакте при различных температурах.

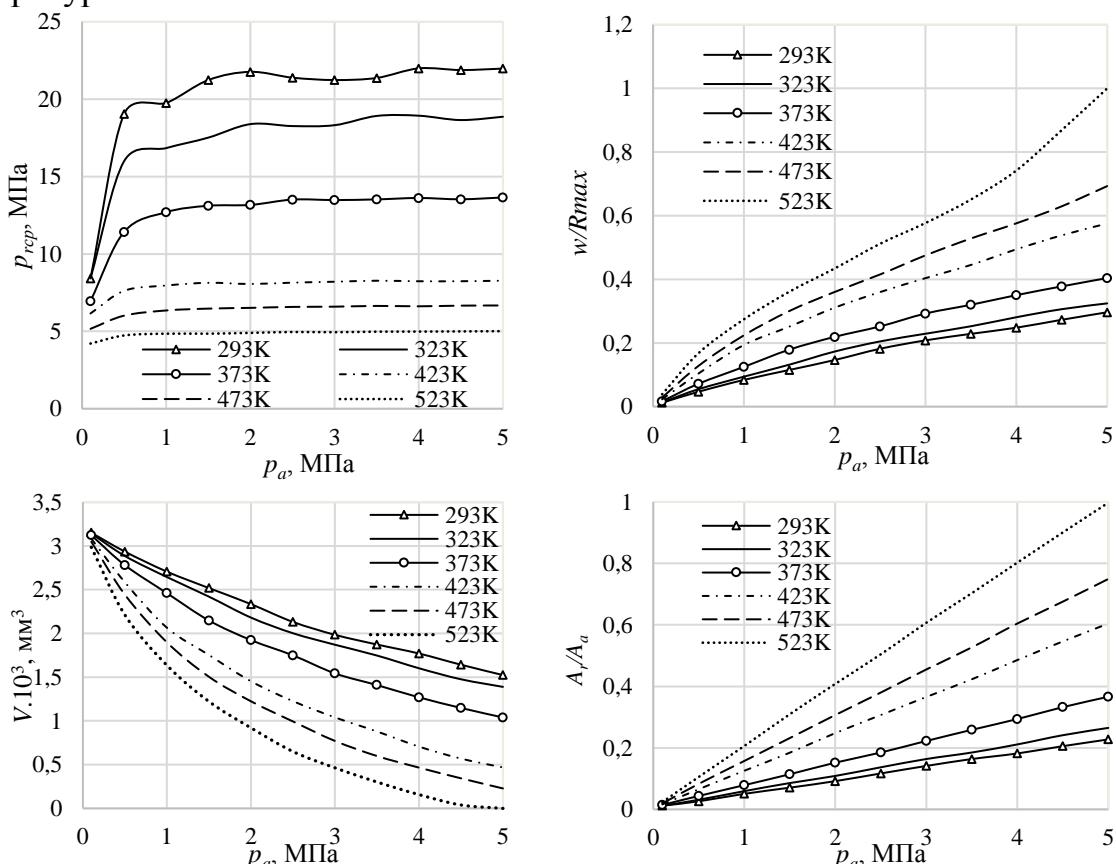


Рис. 4. Влияние номинального давления p_a на характеристики контакта поверхности №1 для материала ФПМ 2-339 при различных температурах

Для проверки достоверности разработанной компьютерной модели было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния контакта методом конечных элементов (МКЭ). На Рис. 5 представлены зависимости отношения w/R_{max} (где w – сближение) от номинального давления для

поверхности №1 фрикционного полимерного материала 2-339 при 293К, полученные расчёты выполнены различными методами. Сплошной линией показан результат расчета по программе APDL; круглыми точками – результат моделирования по модели №2 с условием, когда критерием перехода к пластической деформации является твердость HB рассматриваемого материала; треугольными точками – результат моделирования при условии перехода к пластической деформации при напряжении равном $2\sigma_t$; линия с ромбами – результат о моделирования при условии перехода при напряжении равно $3\sigma_t$. Из Рис. 5 следует, что результат моделирования с использованием HB в качестве критерия перехода от упругой деформации к пластической даёт результаты близкие результатам расчёта методом конечных элементов.

Компьютерная модель статического контакта является базовой для дальнейшей динамической модели скользящего контакта ФПМ с учетом нагрева при трении.

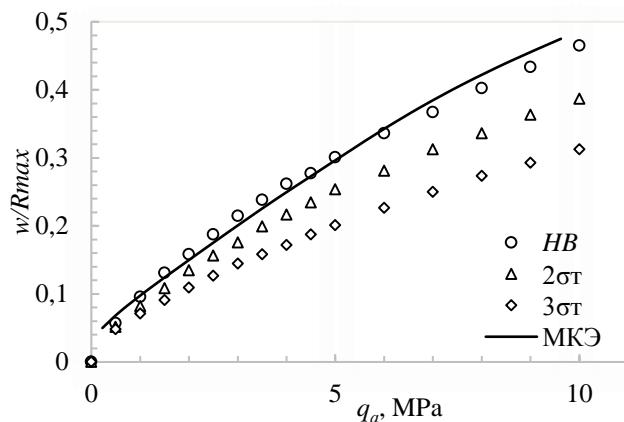


Рис. 5. Сравнение результатов расчёта по компьютерной модели №2 с моделированием методом конечных элементов

По алгоритмам компьютерных моделей №1 и №2 разработана программа расчёта статического контакта при различных температурах. Один из материалов контактирующей пары имеет более низкие механические свойства и более грубую поверхность. Другая контактирующая поверхность принимается гладкой и считается абсолютно жесткой. Программа работает в Windows разных поколений. Программа реализована на языках программирования C++ и C#.

Разработана компьютерная модель №3 сухого трения, учитывающая тепловыделение на площадках фактического контакта поверхности трения. Модель позволяет рассчитать распределение давления и температуры по номинальной поверхности трения с учетом зависимости физико-механических свойств ФПМ от температуры; с её помощью моделируется снижение несущей способности контакта вследствие нагрева при трения и соответствующее перераспределение площадок фактического контакта на номинальной поверхности трения. Таким образом, в этой модели критерием снижения несущей способности контакта является нагрев до соответствующей температуры конкретной площадки фактического контакта. Как показывают расчёты, для материалов и режимов работы, характерных для тормозов устройств ПТМ, время существования наиболее нагруженных контактов, определяемое их нагревом при трении, очень мало и поэтому в модели принято

допущение о температуре нагрева выступа как основном критерии, определяющем несущую способность контакта. Если иметь экспериментальные данные о зависимости износа от совершенной на контакте работы трения или от температуры нагрева, то по этой модели можно также учесть и износ при трении.

На Рис. 6 представлен сокращенный алгоритм модели №3 сухого трения.

Компьютерная модель сухого трения включает в себя следующие модули:

+ модуль создания микрографии поверхности. Этот модуль работает как компьютерная модель №1 создания микрографии поверхности;

+ модуль статического контакта при начальной температуре. Этот модуль работает как модель №2 статического контакта при различных температурах;

+ модуль времени трения по уровням высот.

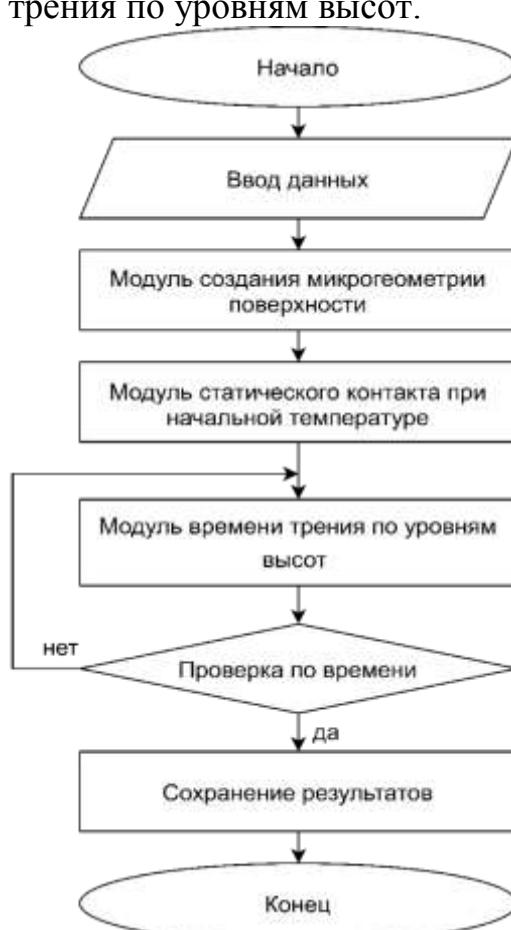


Рис. 6. Сокращенный алгоритм компьютерной модели №3 сухого трения

Модуль времени трения по уровням высот предназначен для нахождения времени трения, в течение которого происходит изменение сближения от одного уровня до следующего уровня высот.

В качестве примера моделирования проведен расчет для пары трения ФПМ 145-40-69 – чугун ЧНМХ при скорости 5 м/с, номинальном давлении 0,5; 1; 2 МПа. На Рис. 7 представлено графическое изображение поверхности контакта при трении, иллюстрирующее изменение распределения напряжения на поверхности контакта через время: 0,001 с; 0,005 с; 0,012 с; 0,015 с. Выступы с различным значением контактной нагрузки в МПа показаны различным цветом.

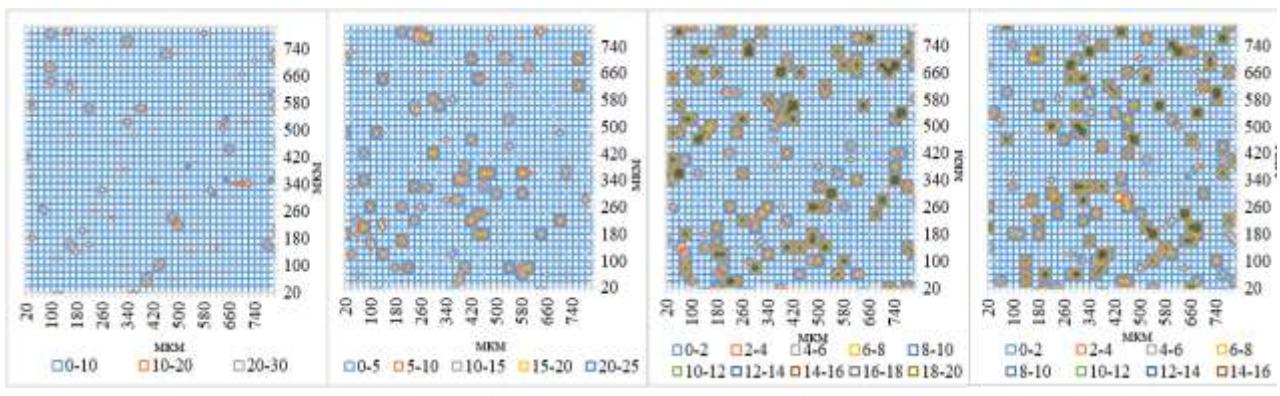


Рис. 7. Распределение напряжений на поверхности контакта в различные моменты времени при номинальном давлении 1 МПа:

а) – 0,001 с; б) – 0,005 с; в) – 0,012 с; г) – 0,015 с

На Рис. 8 показано графическое изображение распределения температур на поверхности контакта в различные моменты времени моделирования процесса трения. Разным цветом обозначены площадки контакта с различными температурами поверхности трения в градусах Цельсия.

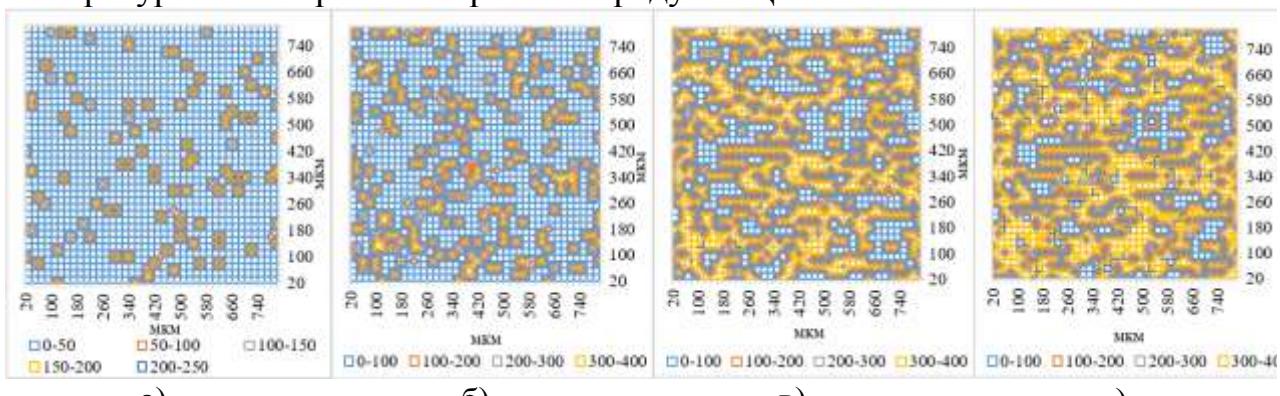


Рис. 8. Распределение температур на поверхности контакта в различные моменты времени при номинальном давлении 1 МПа:

а) – 0,001 с; б) – 0,004 с; в) – 0,012 с; г) – 0,015 с

В результате компьютерного моделирования получаются файлы, в которых сохранены множества матриц напряжения, температуры, а также таблицы зависимостей среднего фактического давления, таблицы фактической площади контакта и сближения для различного времени контакта и другие. Эти зависимости, а также анализ процесса трения на основе выходных данных моделирования могут быть визуализированы в виде графиков. Примеры такой визуализации представлены на Рис. 9. В программе компьютерного моделирования можно учитывать изменение коэффициента трения в зависимости от температуры. В этом случае на каждом шаге моделирования можно пересчитывать фактическую силу трения. Возможно, также учитывать изменение коэффициентов температуропроводности и теплопроводности с температурой.

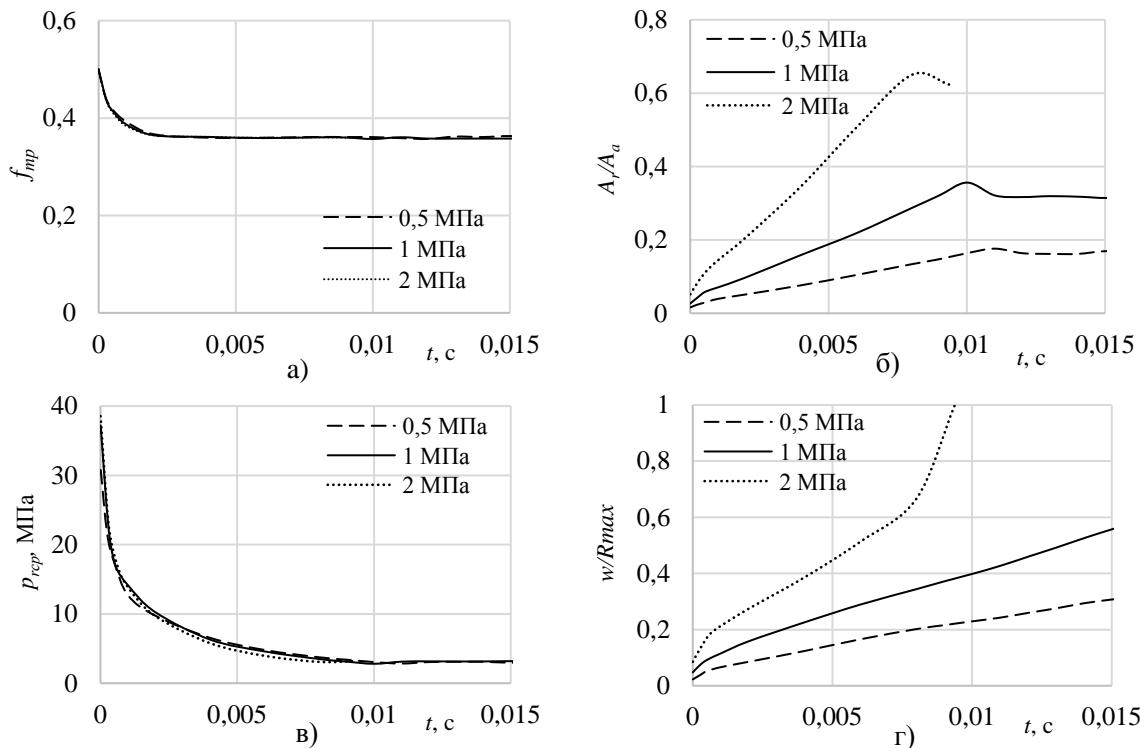


Рис. 9. Зависимость параметров контакта от времени трения при различных номинальных давлениях:

- а) – зависимость коэффициента трения; б) – зависимость отношения фактической площади к номинальной площади; в) – зависимость среднего фактического давления; г) – зависимость отношения сближения к максимальной высоте шероховатости

Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию пары трения ФПМ-сталь на трибометре NANOVEA T50 (США). Анализ результатов исследования показал:

- параметры топографии поверхности трения ФПМ существенно изменяются в процессе испытания. В начале испытаний параметры шероховатости изменяются сильнее, а затем шероховатость стабилизируется. На Рис. 10 представлено изменение шероховатости (R_a) ФПМ 2-339 в паре с сталью 45 от пути трения (L);

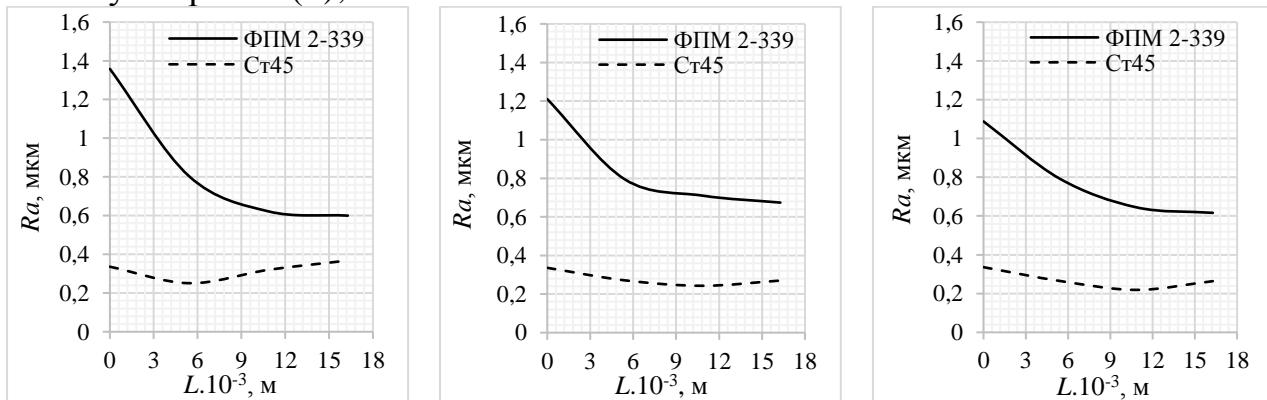


Рис. 10. Изменение шероховатости ФПМ 2-339 в паре с сталью 45 от пути трения

- интенсивность износа ФПМ в начале испытаний существенно зависит от первоначальных параметров шероховатости образцов. При испытаниях фрикционных материалов в стационарном режиме, параметры шероховатости

желательно измерять тогда, когда они становятся стабильными в процессе трения. На Рис. 11 представлена зависимость интенсивности износа ФПМ 2-339 (а) и ФПМ 145-40-69 (б) от пути трения при одинаковых режимах трения. 1; 2; 3; 4; 5 – соответствуют парам трения с разными начальными параметрами шероховатости образцов, а начальные параметры шероховатости контртела одинаковые;

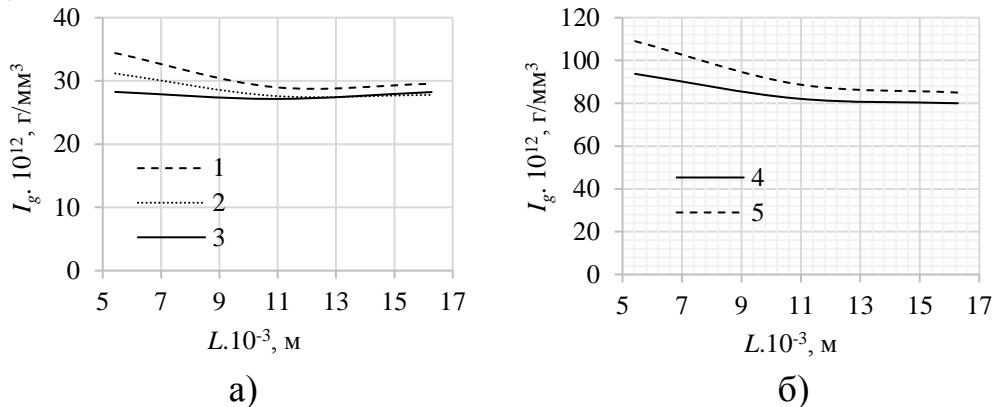


Рис. 11. Зависимость интенсивности износа ФПМ 2-339 (а) и ФПМ 145-40-69 (б) от пути трения

По результатам исследования сделаны следующие выводы.

1. Параметры топографии поверхности трения ФПМ существенно изменяются в процессе испытания. В начале испытаний параметры шероховатости изменяются сильнее, а затем шероховатость стабилизируется. Интенсивность износа ФПМ в начале испытаний существенно зависит от первоначальных параметров шероховатости образцов. При испытаниях фрикционных материалов в стационарном режиме, параметры шероховатости желательно измерять тогда, когда они становятся стабильными в процессе трения.

2. Параметры шероховатости ФПМ зависят от режимов трения. Интенсивность износа ФПМ также зависит от режима трения (она повышается с увеличением номинального давления и скорости скольжения). Шероховатость поверхности может служить одним из индикаторов идентичности режимов трения при испытаниях образцов материалов в разных масштабах.

3. При трении, параметры топографии поверхностей трения фрикционного полимерного материала изменяются существенно больше по сравнению с металлическим контртелом. Для испытанных фрикционных полимерных материалов, Ra у образцов из ФПМ приблизительно в два раза больше чем металлического диска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа известных теоретических и экспериментальных данных и в результате наших исследований разработан новый метод определения тепловой нагруженности фрикционных полимерных материалов в дисковых колодочных тормозах подъёмно-транспортных машин. Для реализации метода создано соответствующее программное обеспечение.

В разработанном методе учитываются: дискретность контакта (задаётся через стандартные параметры шероховатостей); нагрев поверхности

фактических пятен контакта при трении скольжения (рассчитывается в процессе моделирования); зависимости физико-механических свойств материала от температуры (твёрдость, модуль упругости, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность); зависимость коэффициента трения от температуры.

Созданные программы моделируют трение ФПМ по металлическому контрателу и позволяют рассчитать характеристики статического контакта, такие как: сближение, давления на фактических площадях контакта, фактическую площадь контакта и другие; распределение давления по фактическим площадям контакта с учетом нагрева при сухом трении, в каждый момент процесса трения; изменение силы трения в процессе трения вследствие нагрева; размеры площади фактического контакта в процессе трения; температуры нагрева контактирующих выступов, в каждый момент процесса трения.

Расчёты по программе показали, что среднее фактическое давление превышает номинальное давление на контакте в несколько раз. Следовательно, среднее фактическое давление на контакте представляет более объективную информацию о режиме трения, по сравнению с номинальным давлением.

Расчёты также показали, что в процессе трения площадь фактического контакта увеличивается вследствие нагрева и соответствующего «размягчения» контактирующих выступов. Отношение фактической площади контакта к номинальной в значительной мере зависит от времени трения, от режима трения, и оно может служить характеристикой соответствия процессов трения при сопоставлении модельных (лабораторных) и натурных испытаний фрикционных полимерных материалов.

2. Достоверность метода и полученных с его помощью результатов проверялась сравнением с известными результатами других авторов, проверочными расчётами с использованием известных апробированных методов, экспериментальным определением исходных данных для компьютерного моделирования, сравнением теоретических положений диссертации с результатами проведенных экспериментальных исследований.

3. Экспериментально подтверждена связь интенсивности износа и параметров микрографии поверхности трения при сухом трении для ФПМ, используемых в узлах трения подъёмно-транспортных, строительных, дорожных и транспортных машин.

В частности, эта связь проявляется в том, что исходная микрография поверхности трения изменяется в процессе трения в стационарном режиме до тех пор, пока не установится новая стабильная шероховатость поверхностей трения, при этом стабилизируется интенсивность износа. Подтверждено, что изменение режима стационарного трения приводит к изменению микрографии поверхностей трения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ромашко А.М., До С.Т. Компьютерное моделирование микроповерхностей фрикционных материалов // Подъемно-транспортное дело, 2020, №1-2(100). С. 8-11. (0,3 п.л./0,15 п.л.).
2. Ромашко А.М., До С.Т. Модель микроконтакта фрикционных материалов в узлах трения подъемно-транспортных машин при разных

температурах // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника, 2021, №1. С. 29-36. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

3. Ромашко А.М., До С.Т. Компьютерная модель контакта фрикционных полимерных материалов в тормозах подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин // Наука и бизнес: пути развития, 2021, №9. С. 17-20. (0,25 п.л./0,1 п.л.).

4. Romasko A.M., Do X.T. Computer model of contact of rough surfaces of friction material in the friction nodes of lifting and transport machines // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. M., 2021. P. 899-906. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

5. Ромашко А.М., До С.Т. Компьютерная модель контакта шероховатых поверхностей фрикционных материалов в узлах трения подъемно - транспортных машин // Труды XIII Международной научно-технической конференции «Трибология – Машиностроению 2020», М., 2020. С. 232-237. (0,4 п.л./0,2 п.л.).

6. До С.Т. Методы компьютерного моделирования процессов трения и изнашивания // Сборник докладов XXII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». М.: МАДИ, 2018. С. 14-16. (0,2 п.л.).

7. До С.Т. Моделирование поверхности трения// Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». М.: МИСИ - МГСУ, 2019. С. 207-210. (0,3 п.л.).

8. До С.Т. Имитационная модель контактирования при процессе сухого трения фрикционных материалов// Сборник докладов XXIV Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы (Молодой инженер)». М.: Перо, 2020. С. 471-472. (0,1 п.л.).

9. До С.Т., Ромашко А.М., Носко А.Л. Компьютерная модель микроконтакта в процессе сухого трения // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники». Брянск: БГТУ, 2021. С 31-42. (0,8 п.л./0,3 п.л.).

10. Свидетельство 2021613768. MOS (Microgeometry of surfaces): программа для ЭВМ / Д.С. Тхань. № 2021612715 РФ; заявл. 05.03.21; опубл. 15.03.21, Бюл. № 3.

11. Свидетельство 2021616551. Model of the friction process (MoFP): программа для ЭВМ / До С.Т. № 2021615550 РФ; заявл. 13.04.21; опубл. 22.04.21, Бюл. № 5.

Подписано в печать2021. Заказ №
Объем 1 печ.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, (499) 263-62-01