

УДК 621.762:621.891

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Н.Г. Меликсетян, С.Г. Агбальян, Г.Н. Меликсетян, А.Н. Карапетян

Национальный политехнический университет Армении

Наряду с научно-техническим прогрессом возникает необходимость разработки новых, высокоэффективных и в то же время экологически безвредных тормозных фрикционных материалов с целью интенсификации движений, повышения нагрузочно-скоростных параметров эксплуатации транспортных средств и обеспечения экологической безопасности окружающей среды. В настоящее время при разработке новых фрикционных материалов работоспособность определяется с помощью лабораторных, стендовых и натурных испытаний. Разработка методики физического моделирования высокотемпературного трения тормозных фрикционных материалов путем определения масштабных коэффициентов перехода параметров от природы к модели и установления взаимосвязи между режимными параметрами лабораторных и стендовых испытаний является актуальной задачей современного фрикционного материаловедения.

Целью работы является физическое моделирование процессов высокотемпературного трения тормозных фрикционных материалов путем определения масштабных коэффициентов перехода параметров от природы к модели и установления взаимосвязи между режимными параметрами лабораторных и стендовых испытаний, а также экспериментальная проверка моделирования.

При моделировании процесса высокотемпературного износа в режиме повторнократковременного торможения вычислены переходные коэффициенты для продолжительности интервала между двумя нагружениями и суммарного времени рабочего цикла. Представлены результаты расчетов масштабных коэффициентов перехода с помощью нескольких различных базисных параметров и краевых условий, а также режимные параметры и условия лабораторных и стендовых испытаний.

На основе выбранных параметров проведены сравнительные лабораторные и стендовые испытания, результаты которых показали изменения коэффициента трения и замедления аналогичного характера в зависимости от температуры трения. Режимные параметры испытательного оборудования, установленные на основе описанных принципов физического моделирования, обеспечивают одинаковые условия фрикционного взаимодействия элементов пар трения в условиях высоких температур.

Ключевые слова: тормоз, фрикционный материал, физическое моделирование, высокотемпературное трение.

Введение. В связи с интенсификацией движений, повышением нагрузочно-скоростных параметров эксплуатации транспортных средств и необходимостью обеспечения экологической безопасности окружающей среды предъявляются новые и все более повышенные требования к тормозным фрикционным материалам. Вследствие этого применяемые в настоящее время фрикционные материалы работают в условиях интенсивного изнашивания при высокотемпературном трении (выше 100 °С) и не всегда удовлетворяют возросшим требованиям эксплуатации. Технический прогресс требует разработки новых высокоэффективных и в то же время экологически безвредных тормозных фрикционных материалов, как материалов с заданными трибологическими параметрами и управляемыми свойствами. В связи с этим непрерывно повышаются также значения рабочих параметров фрикционных материалов, предусмотренных международными стандартами.

В настоящее время при разработке новых фрикционных материалов работоспособность определяется с помощью лабораторных, стендовых и натуральных (дорожных, полевых и др.) испытаний. Лабораторные испытания проводят с целью определения свойств фрикционных материалов и отработки отдельных этапов технологического режима разрабатываемых изделий. Простота испытательных установок, быстрота получения данных и сравнительно небольшая стоимость испытаний делают их наиболее рациональными в связи с наиболее полным применением методов подбора и моделирования. Стендовые испытания фрикционных изделий проводят на натуральных узлах трения с помощью стационарных установок, позволяющих воспроизводить основные принципиальные особенности работы узла трения в эксплуатации. Такие испытания являются наиболее маневренными для реальных узлов трения. Натурные испытания фрикционных накладок проводят на специально оборудованных натуральных объектах по разработанной программе. Наиболее эффективным является комплексное применение испытаний, объединенных общей структурой, названной рациональным циклом испытаний (РЦИ), по которому качественно и количественно оценивают работоспособность материалов пар трения фрикционных устройств [1,2].

Испытательные установки, применяемые для экспериментального исследования трибологических характеристик и тепловых процессов фрикционных пар тормозных устройств машин, дают возможность проводить испытания по РЦИ, однако отличаются по конструкции, геометрическим размерам фрикционных узлов и режимам испытаний. Следовательно, экспериментальные данные, полученные на этих установках, также должны быть различными, что затрудняет обработку полученной информации на разных этапах РЦИ.

Цель работы - физическое моделирование процессов высокотемпературного трения тормозных фрикционных материалов путем определения масштабных коэффициентов перехода параметров от природы к модели и установления взаимосвязи между режимными параметрами лабораторных и стендовых испытаний, а также экспериментальная проверка моделирования.

Методы исследования. Объектами моделирования являются дисковые тормоза легковых автомобилей весов до 1800 кг.

Научное направление физического моделирования процессов фрикционного взаимодействия находит все большее отражение в теоретических и прикладных работах [3-5]. Существует известная методика определения масштабного фактора при моделировании процессов трения и износа, основанная на теории подобия и размерностей (π — теорема Букингема), которая является единственным теоретическим средством для решения подобных задач [6]. При этом размерности основных параметров выражают через размерности базисных и находят критерии подобия.

При моделировании процессов трения и износа на основании предпосылок физического моделирования износа и исследования работоспособности натурального тормозного устройства на инерционном стенде эффективные результаты получаются, если в качестве известного параметра выбрана комплексная геометрическая характеристика образцов [7], объединяющая заданные макрогеометрические параметры модели и природы (параметр со штрихом относится к модели):

$$C_r = \frac{S_1 \cdot S_2}{S'_1 \cdot S'_2} \cdot \frac{A_{a1}' \cdot A_{a2}'}{A_{a1} \cdot A_{a2}} \quad (1)$$

Здесь S - отношение теплоотдающей поверхности фрикционного элемента к его теплопоглощающему объему; A_a - номинальная площадь трения. Параметры с индексами 1 и 2 относятся соответственно к первому (металлическое контртело) и второму (фрикционный материал) элементам пары трения.

Результаты исследования. Модельный процесс будет подобен натурному, если в обоих случаях имеются одинаковые фрикционные связи. Поэтому с помощью методики определения критериев подобия нами была получена общая система критериев подобия изучаемого процесса высокотемпературного трения и износа материалов. При этом в качестве основных критериев были приняты единицы массы, длины, времени, температуры, а в качестве базисных - нагрузка, начальная скорость скольжения, номинальная площадь трения, перепад температуры. Полученные масштабные

коэффициенты перехода от природы к модели были выражены через C_r , а также вычислены коэффициенты перехода:

$$\begin{aligned} C_V &= C_r^{1/2} = C_{Pa}; \quad C = C_r^2; \quad C_{Fn} = C_P = C_r = C_{Rz} = C_E = C_{HB} = C_Z = C_W = 1; \\ C_\lambda &= C_c = C_\eta = C_{g\beta} = C_V = 1; \quad C_{\Delta\theta} = C_t = C_r^{-1/3}; \quad C_{V\theta} = C_u = 1; \quad C_{W_{ТП}} = C_r^{1/2}; \\ C_L &= C_r^{-1/6}; \quad C_{W_n} = C_r^{1/6}; \quad C_{V_{max}} = C_{\Delta h} = 1; \quad C_S = C_r^{-1/3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $C_m = m'/m$, $C_V = V'/V$ и т.д. (параметры со штрихом относятся к модельным испытаниям, а без штриха - к натурным).

При моделировании процесса высокотемпературного износа в режиме повторно-кратковременного торможения вычислены переходные коэффициенты для продолжительности интервала между двумя нагружениями $C_{тохл}$ и суммарного времени рабочего цикла C_ϕ :

$$C_{тохл} = \frac{C_{W_{TT}} \cdot C_m}{C_{W_n} \cdot C_A \cdot C_k}, \quad C_\phi = \frac{C_k^{0.65} \cdot C_B^{0.25} \cdot C_d^{0.96}}{C_t^{0.5} \cdot C_V^{1.04} \cdot C_h^{0.6}}, \quad (3)$$

где C_k , C_B , C_d , C_h , C_{W_n} , C_m , $C_{W_{ТП}}$ и C_A - соответственно симплексы относительной площади теплоотдачи, относительной ширины тормозного шкива, диаметра поверхности трения, числа торможений в час, работы, массы, учитывающей накопленное тепло, площади охлаждения; e - жесткость тормозной системы; C_ψ - комплексный критерий:

$$C_\psi = \frac{C_p \cdot C_E \cdot C_d \cdot C_\lambda \cdot C_C \cdot C_{\Delta\theta} \cdot C_r^{13/6}}{C_V^3 \cdot C_{Fn}^6},$$

$$C_{Pa} = P_a' / P_a, \quad C_{W_{ТП}} = W_{ТП}' / W_{ТП}, \quad C_{Fn} = F_n' / F_n, \quad C_V = V' / V, \quad C_t = t' / t, \quad C_{\Delta h} = \Delta h' / \Delta h,$$

$$C_p = \rho_1' \rho_2' \rho_3' / \rho_1 \rho_2 \rho_3, \quad C_E = E_1' E_2' / E_1 E_2, \quad C_\lambda = \lambda_1' \lambda_2' \lambda_3' / \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3,$$

$$C_a = \alpha_1' \alpha_2' / \alpha_1 \alpha_2, \quad C_c = C_1' C_2' C_3' / C_1 C_2 C_3, \quad C_{\Delta\theta} = \Delta\theta_1' \Delta\theta_2' / \Delta\theta_1 \Delta\theta_2.$$

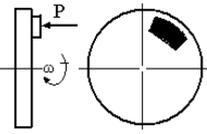
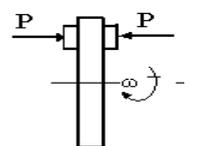
Значения расчетов масштабных коэффициентов перехода с помощью нескольких различных базисных параметров и краевых условий представлены в табл. 1, а режимные параметры и условия лабораторных и стендовых испытаний - в табл. 2. Результаты экспериментов приведены на рис. 1 и 2.

Таблица 1

Варианты расчетов	Масштабные коэффициенты					
	C_{Fn}	C_V	C_t	$C_{W_{тп}}$	$C_{\Delta\theta}$	$C_{\Delta h}$
1. Базисные параметры: $F_n, W_{тп}, t, C_r$ Краевые условия: $C_{Pa} = C_V = C_{\Delta\theta} = 1$	$C_r^{1/3}$	C_r^0	$C_r^{1/6}$	$C_r^{1/2}$	C_r^0	$C_r^{1/6}$
2. Базисные параметры: $F_n, V, \Delta\theta, C_r$ Краевые условия: $C_{Pa} = C_r = C_\psi = 1$	$C_r^{1/6}$	$C_r^{1/6}$	C_r^0	$C_r^{1/3}$	$C_r^{1/30}$	$C_r^{1/6}$
3. Базисные параметры: $W_{тп}, C, e, C_r$ Краевые условия: $C_{Pa} = C_t = C_\psi = 1$	$C_r^{1/6}$	$C_r^{1/6}$	C_r^0	$C_r^{1/3}$	$C_r^{1/30}$	$C_r^{1/6}$
4. Базисные параметры: F_n, t, C, C_r Краевые условия: $C_{\Delta\theta} = C_r = C_\psi = 1$	$C_r^{7/100}$	$C_r^{1/2}$	$C_r^{3/100}$	$C_r^{1/100}$	C_r^0	$C_r^{1/6}$

Таблица 2

Режимные параметры и условия лабораторных и стендовых испытаний

№	Условия испытаний (оборудование)	Схема фрикционного контактирования, параметры контроля	Удельное давление, P_a , МПа	Скорость скольжения, V , м/с	Работа торможения, $W_{тп}$, Дж	$K_{вз}$
1	Модельные испытания в режиме стационарного трения (И-32М)	 -коэффициент трения -интенсивность изнашивания	2,0	16,7	-	0,104
2	Натурные испытания на инерционном стенде (ТС-1)	 -замедление -линейный износ	2,0...8,0	11,1 22,2 31,9	2820*	0,104

Примечание. $K_{вз}$ – коэффициент взаимного перекрытия; *удельная работа торможения

Как видно из лабораторных испытаний, коэффициент трения материала с повышением температуры первоначально увеличивается и имеет максимальное значение при 240 °С (рис. 1). Далее с увеличением поверхностной температуры коэффициент трения уменьшается до минимального значения при 300 °С. При температуре выше 400 °С наблюдается значительное повышение коэффициента трения.

Подобные изменения происходят и при стендовых испытаниях (рис. 2), при которых исследуемым параметром является замедление движения тормозного диска. Значения замедления с повышением температуры увеличиваются и достигают до максимального при 260 °С. Далее происходит уменьшение замедления до 320 °С. С дальнейшим повышением температуры значения замедления увеличиваются.

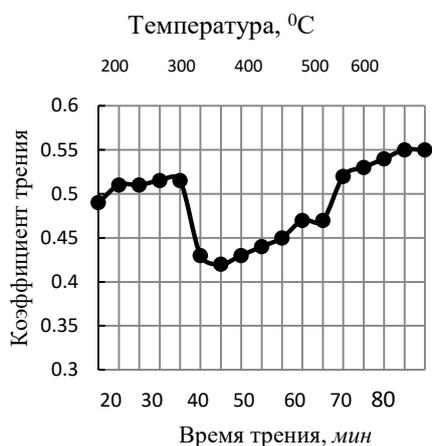


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от времени и температуры при лабораторных испытаниях; $P_a = 2,0$ МПа; $V = 16,7$ м/с; $K_{вз} = 0,104$

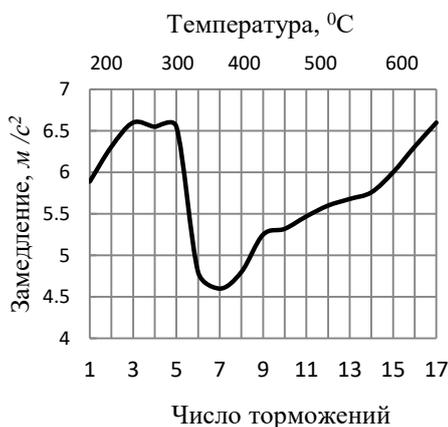


Рис. 2. Зависимость замедления от числа торможений и температуры при стендовых испытаниях; $P_a = 6,0$ МПа; $V = 22,2$ м/с; $K_{вз} = 0,104$

Выводы. Результаты лабораторных и стендовых испытаний показали изменения коэффициента трения и замедления аналогичного характера в зависимости от температуры трения. Режимные параметры испытательного оборудования, установленные на основе описанных принципов физического моделирования, обеспечивают одинаковые условия фрикционного взаимодействия элементов пар трения в условиях высоких температур. Разработанная методика и программа экспериментов позволяют реализовать процесс рационального цикла испытаний по исследованию работоспособности фрикционных материалов тормозных устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного комитета по науке при Министерстве образования и науки Республики Армения в рамках тематики научно-исследовательской базовой лаборатории "Трибология" Национального политехнического университета Армении.

Литература

1. **Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Гинзбург А.Г., Игнатъева З.В.** Расчет, испытание и подбор фрикционных пар. - М.: Наука, 1979. - 267 с.
2. **Tsang P.H.S., Jacho M.G., Rhee S.K.** Comparison of Chase and Inertial Brake Dynamometer Testing of Automotive Friction Materials // Wear of Materials. ASME. - 1985. - P.129-137.
3. **Погосян А.К.** Трение и износ наполненных полимерных материалов. - М.: Наука, 1977. -138 с.
4. Моделирование распределения температурных полей в авиационном колесе в условиях принудительного охлаждения тормоза при помощи численных методов / **Д.В. Васильев, Е.И. Крамаренко, В.В. Мозалев и др.** // Труды 6-го Межд. симпозиума по фрикционным изделиям и материалам "ЯРОФРИ-2006". - Ярославль, 2006. - С. 235-243.
5. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / **А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.;** Под ред. **А.В. Чичинадзе.** - М.: Машиностроение, 2003. - 576 с.
6. **Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин /** Под ред. **Е.Л. Шведкова, Д.Я. Ровинского, В.Д. Зозули, Э.Д. Брауна.** – Киев: Наукова думка, 1979. -188 с.
7. **Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Гинзбург А.Г., Игнатъева З.В.** Расчет, испытание и подбор фрикционных пар. – М.: Наука, 1979. - 267 с.

*Поступила в редакцию 15.03.2017.
Принята к опубликованию 14.06.2017.*

**ԱՐԳԵԼԱԿԱՅԻՆ ՇՓԱՆՅՈՒԹԵՐԻ ԲԱՐՁՐՁԵՐՄԱՍՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ՇՓՄԱՆ ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ
ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ**

Ն.Գ. Մելիքսեթյան, Ա.Գ. Աղբալյան, Գ.Ն. Մելիքսեթյան, Ա.Ն. Կարապետյան

Երթևեկության ուժգնացման, տրանսպորտային միջոցների շահագործման բեռնա-արագընթացային պարամետրերի մեծացման և շրջակա միջավայրի բնապահպանական անվտանգության ապահովման հիմնախնդիրներով պայմանավորված՝ տեխնիկական առաջընթացը պահանջում է նոր, բարձրարդյունավետ և, միևնույն ժամանակ, բնապահպանական անվնաս արգելակային շփանյութերի մշակում: Նոր շփանյութերի մշակման ընթացքում ներկայումս դրանց աշխատունակությունը որոշվում է մոդելային լաբորատոր, ստենդային և բնական փորձարկումներով: Բնականից մոդելին անցումային մաշտաբային գործակիցների որոշման ճանապարհով արգելակային շփանյութերի բարձրջերմաստիճանային շփման ֆիզիկական մոդելավորման մեթոդիկայի մշակումը և լաբորատոր ու ստենդային փորձարկումների ռեժիմների միջև փոխկապակցության հաստատումը ժամանակակից շփանյութագիտության արդիական խնդիրներից մեկն է:

Աշխատանքի նպատակը արգելակային շփանյութերի բարձրջերմաստիճանային շփման գործընթացների ֆիզիկական մոդելավորումն է՝ բնականից մոդելին անցման մասշտաբային գործակիցների որոշման ճանապարհով, լաբորատոր ու ստենդային փորձարկումների ռեժիմների միջև փոխկապակցության հաստատումը, ինչպես նաև մոդելավորման փորձարարական ստուգումը:

Կարճատև-կրկնվող արգելակման ռեժիմի պայմաններում բարձրջերմաստիճանային շփման գործընթացների ֆիզիկական մոդելավորման դեպքում հաշվարկված են անցումային գործակիցները երկու բեռնավորումների միջև ընկած տևողությունների և աշխատանքային ցիկի գումարային ժամանակների համար: Ներկայացված են անցումային մասշտաբային գործակիցների հաշվարկների արդյունքները՝ մի քանի տարբեր բազիսային պարամետրերով և սահմանային պայմաններով, ինչպես նաև լաբորատոր և ստենդային փորձարկումների ռեժիմային պարամետրերը և պայմանները:

Ընտրված պարամետրերի հիման վրա կատարված են լաբորատոր և ստենդային փորձարկումներ: Լաբորատոր և ստենդային փորձարկումների ընթացքում նկատվում են շփման գործակցի և դանդաղեցման նմանատիպ բնույթի փոփոխություններ՝ կախված շփման ջերմաստիճանից: Ներկայացված ֆիզիկական մոդելավորման սկզբունքների հիման վրա որոշված փորձարկման սարքավորումների ռեժիմային պարամետրերն ապահովում են շփագույգների տարրերի նույնական փոխազդեցության պայմաններ շփման բարձր ջերմաստիճանների պայմաններում:

Առանցքային բառեր. արգելակ, շփանյութ, ֆիզիկական մոդելավորում, բարձրջերմաստիճանային շփում:

PHYSICAL MODELING OF HIGH-TEMPERATURE FRICTION OF BRAKE FRICTION MATERIALS

N.G. Meliksetyan, S.G. Aghbalyan, G.N. Meliksetyan, A.N. Karapetyan

Together with technical progress, a necessity for the development of new highly effective and, at the same time, environmentally friendly brake friction materials for the movement intensification, the load-speed increase parameters of the vehicle operation and the assurance of the ecological safety of the environment arises. At present, at developing new friction materials, the working capacity is determined by laboratory, stand and full-scale tests. The development of a technique for the physical modeling of high-temperature friction of brake friction materials by determining the scale coefficients of the transition of parameters from nature to the model and establishing the relationship between the regime parameters of laboratory and stand tests is an actual task of modern friction material science.

The goal of the work is the physical modeling of the processes of high-temperature friction of brake friction materials by determining the scale factors of the transition of parameters from nature to the model and establishing the relationship between the regime parameters of laboratory and stand tests, as well as the experimental verification of modeling.

When modeling the high-temperature friction process in the mode of short-time braking, the transition coefficients for the duration of the interval between two loads and the total time of the working cycle are calculated. The results of calculations of scaling transition coefficients by several different basic parameters and boundary conditions are presented, as well as regime parameters and laboratory and bench testing conditions.

Based on the selected parameters, comparative laboratory and stand tests were carried out. In laboratory and stand tests, a similar change of friction coefficient and deceleration is observed as a function of friction temperature. The regime parameters of the test equipment established on the basis of the described principles of physical modeling, provide the same conditions for the frictional interaction of the elements of friction pairs in high-temperature conditions.

Keywords: brake, friction material, physical modeling, high-temperature friction.