

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МНОГОДИСКОВОГО МАСЛООХЛАЖДАЕМОГО ТОРМОЗА

В.Н. Пасовец

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель В.А. Балакин

В связи с повышением грузоподъемности карьерных самосвалов, работающих на длинных горных спусках, возникла необходимость применения принципиально новых многодисковых маслоохлаждаемых тормозов (ММОТ).

Дисково-колодочные и барабанные тормоза, в которых коэффициент трения $f \geq 0,3$, а количество трущихся пар $n = 2$, в таких тяжелых условиях работы неэффективны.

Идея ММОТ состоит в том, что обеспечение заданного значения силы трения в тормозе можно достичь путем увеличения количества трущихся пар n и соответствующего уменьшения величины средней удельной силы трения τ_{cp} , а, следовательно, и коэффициента трения f . Использование большого количества тонких дисков (фрикционных и стальных), работающих в масляной ванне, позволяет реализовать эту идею на практике.

Сухое трение в зоне фрикционного контакта заменяется жидкостным и полужидкостным, существенно снижающими износ. Использование ММОТ эффективно при многократных торможениях транспортных средств, а также в условиях их притормаживаний на длинных горных спусках. Однако актуальной остается задача об отводе теплоты трения в масло с последующим его охлаждением.

Испытания ММОТ БелАЗ-7555 показали, что коэффициент трения в них $f = 0,1 \dots 0,16$, а параметр шероховатости $R_{z1} \gg R_{z2}$ (рис. 1). Это значит, что трение в зоне фрикционного контакта – полужидкостное. В отдельных точках фактического контакта общей площадью A_r происходит трение без смазки с разрушением масляной пленки. В этих точках коэффициент трения может превышать значения $f = 0,3$, что является причиной возникновения температурных всплесков и больших температурных градиентов. На остальной площади, равной $A_{a1} - A_r$, наблюдается течение смазки в зазоре переменной толщины $h(x)$. Вдоль линии контакта по оси x у микронеровностей возникают элементарные гидродинамические клинья. Суммарное их действие обладает несущей способностью, воспринимающей часть осевой нагрузки.

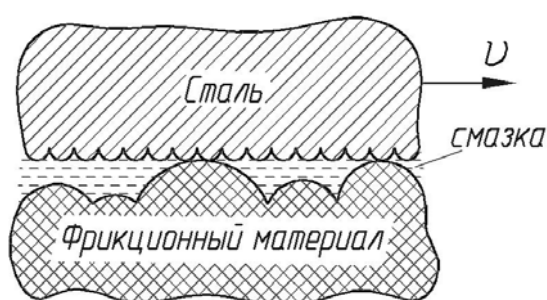


Рис. 1. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей

Для улучшения подвода смазки в зоны трения на фрикционном диске имеются специальные канавки.

Расчеты показывают, что при использовании дисково-колодочных тормозов в автомобиле БелАЗ-7555 с полной массой 95 тонн работа торможения, приходящаяся на одну фрикционную пару, на участке дороги с уклоном 8 % и длиной 1000 метров, в 12 раз превышает работу торможения, приходящуюся на одну фрикционную пару, например, самолета Боинг-737 при посадке (табл. 1). При поглощении тормозами такой огромной работы тормозные диски разогреваются до высокой температуры. Температура в них превышает критическую. Такие высокие температуры приводят к сгоранию тормозных накладок, выходу из строя тормозных механизмов и, как следствие – к отказу тормозов. Из табл. 1 видно, что применение ММОТ позволяет снизить работу торможения, приходящуюся на одну фрикционную пару, в 5 раз.

Таблица 1

Работа торможения, приходящаяся на одну фрикционную пару

Транспортное средство	Полная масса, т	Скорость, м/с	Тормозной путь, м	Уклон дороги, %	Работа торможения, МДж	Количество фрикционных пар	Работа торможения, приходящаяся на одну фрикционную пару, МДж
БелАЗ 7555	95	5–10	1000	8	73,547	8	9,193
БелАЗ 7514	210	5–10	1000	8	162,579	8	20,322
БелАЗ 7530	352,7	5–10	1000	8	273,055	16	17,066

Транспортное средство	Полная масса, т	Скорость, м/с	Тормозной путь, м	Уклон дороги, %	Работа торможения, МДж	Количество фрикционных пар	Работа торможения, приходящаяся на одну фрикционную пару, МДж
БелАЗ 7555 (ММОТ)	95	5–10	1000	8	73,547	40	1,839
БелАЗ 7514 (ММОТ)	210	5–10	1000	8	162,579	40	4,064
БелАЗ 7530 (ММОТ)	352,7	5–10	1000	8	273,055	40	6,826
ВАЗ 2109	1,34	5–10	1000 20000	8 5	1,037 13,402	8	0,130 1,675
BMW 850i	2,3	5–10	1000 20000	8 5	1,781 23,004	8	0,223 2,876
КамАЗ 5325	19	5–10	1000 20000	8 5	14,709 190,035	8	1,839 23,754
Автобус МАЗ-151	18	5–10	1000 20000	8 5	13,935 180,034	8	1,742 22,504
Боинг 737	65,3	50	1000	0	82,089	108	0,759

В данной таблице приведены также данные о тепловой нагруженности тормозов легковых, грузовых автомобилей и автобусов, движущихся с притормаживанием на спусках с 8 % уклоном, а также на спуске с горы Ай-петри в районе Ялты, где средний уклон равен 5 % на длине 20 километров.

Охлаждение фрикционного контакта смазкой снижает температуру на поверхности трения. Вычисляем приращения температур с учетом охлаждения зоны фрикционного контакта смазкой, воспользовавшись уравнением:

$$\vartheta_2(0, Fo_2) - \vartheta_0 = K_1 \Theta'(0, Fo_2) - K_2 \Theta''(0, Fo_2),$$

где $\vartheta_2(0, Fo_2)$ – температура стального диска; ϑ_0 – начальная температура;

$$\Theta'(0, Fo_2) = Fo_2 + \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} A'_n \cos \mu_n \exp(-\mu_n^2 Fo_2),$$

$$\Theta''(0, Fo_2) = \frac{Fo_2}{2} + \frac{Fo_2}{3} - \frac{1}{45} - \sum_{n=1}^{\infty} A''_n \cos \mu_n \exp(-\mu_n^2 Fo_2),$$

$$Fo_2 = \frac{a_2 t}{h_2^2}, \quad \mu_n = n\pi, \quad A'_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2}, \quad A''_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^4};$$

$$K_1 = \frac{q_2^0 h_2 K_{вз}}{\lambda_2}, \quad K_2 = \frac{kh_2^3}{\lambda_2 a_2 t_T},$$

где h_2 – полуширина стального диска; $K_{вз}$ – коэффициент взаимного перекрытия.

Проведя расчеты для маслоохлаждаемых тормозов карьерного самосвала БелАЗ-7555 были получены следующие результаты, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные данные

t, с	Fo ₂	S, м	Θ'(0, Fo ₂)	Θ''(0, Fo ₂)	Θ ₂ (0, Fo ₂) – Θ ₀ , К при K _{вз}		
					0,9	0,8	0,7
1	4,07	4,17	4,40	9,62	15,2	15,2	15,2
10	40,7	41,7	41,0	842	140,5	139,1	139,7
15	61,0	62,6	61,3	1881	209,8	209,0	208,2

Расчеты проведены, исходя из исходных данных: автомобиль массой $m = 95$ т движется по горному спуску с 8 % уклоном ($\alpha = 4^\circ 30'$) со скоростью 15 км/ч (4,17 м/с), $\omega = 4,24 \text{ с}^{-1}$ (внутренний, средний и наружный радиусы дисков $R_1 = 0,424$ м, $R_{cp} = 0,508$ м, $R_2 = 0,592$ м), энергия торможения $W = 242$ кВт (предполагая, что 20 % энергии поглощает трансмиссия). Автомобиль оборудован двумя ММОТ ($n^* = 2$), каждый из которых имеет $n = 20$ поверхностей трения ($A_{a_2} = 0,134 \text{ м}^2$), масса масла $m_m = 5$ кг, ширина стального диска $2h_2 = 3$ мм, средняя толщина смазочного слоя $h_{cp} = 10$ мкм, глубина канавок $h^* = 0,5$ мм, максимальная температура смазки в контакте $\Theta_c^{\max} = 230^\circ \text{С}$, максимальная температура масла в околосдисковом пространстве $\Theta_m^{\max} = 150^\circ \text{С}$, начальная температура $\Theta_0 = 20^\circ \text{С}$.

Теплофизические свойства (теплопроводность λ , теплоемкость c , плотность ρ и температуропроводность a_2): $\lambda_1 = 1$ Вт/(м·К), $c_1 = 1250$ Дж/(кг·К), $\rho_1 = 1950$ кг/м³ – для фрикционного материала ВОМ-55; $\lambda_2 = 32$ Вт/(м·К), $c_2 = 450$ Дж/(кг·К), $\rho_2 = 7780$ кг/м³, $a_2 = 9,16 \cdot 10^{-6}$ м²/с – для стали; $c_c = 3000$ Дж/(кг·К), $\rho_c = 900$ кг/м³ – для масла.

Выводы

Обоснована необходимость применения маслоохлаждаемых тормозов для автомобилей большой массы, движущихся по длинным горным спускам.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что при принятом допущении об обновлении объема смазки, находящегося в зоне фрикционного контакта, за один оборот колеса, приращение температуры на 209°С происходит за $t'_T = 15$ с на пути $S = 62,6$ м.

Для повышения эффективности прокачки масла через контакт дисков необходимы специальные конструктивные меры. Например, подвод смазки под давлением в область внутреннего радиуса дисков, а отсос ее из околосдискового пространства в области внешнего радиуса дисков или наоборот. Соответственно необходимо оптимальное профилирование канавок на фрикционном диске. Снижение температуры трения достигается также увеличением массы масла m_m .

Литература

1. Балакин, В.А. Тепловые расчеты тормозов и узлов трения /В.А. Балакин, В.П. Сергиенко //ИММС АН РБ. – Гомель, 1999.
2. Балакин, В.А. Тепловой режим работы тормозов карьерных самосвалов БелАЗ в условиях их экстренного торможения /В.А. Балакин, В.П. Сергиенко, Ю.В. Лысенко //Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 5. – С. 520-526.
3. Балакин, В.А. Тепловой режим работы тормозов автомобилей на горном спуске /В.А. Балакин, В.П. Сергиенко, Ю.В. Лысенко //Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 1. – С. 35-40.