

УДК 531.44:530.096

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ЗОНЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА

В. А. Балакин

(Гомель)

Проблемы трения и износа материалов при высоких скоростях скольжения $v > 50$ м/с возникают в авиации, ракетостроении, турбостроении, приборостроении, оборонной технике, на транспорте и ряде других отраслей промышленности [1]. Характерной особенностью работы большинства высокоскоростных установок и узлов трения (таблица) является малый коэффициент взаимного перекрытия $k_{вз}$ трущихся тел, малое время процесса трения t_T , большие удельные нагрузки на номинальную площадь касания p_a , высокая интенсивность тепловыделения q , резкая асимметрия температурных полей относительно фрикционного контакта.

Генерируемое в зоне высокоскоростного фрикционного контакта тепло за счет теплопроводности передается в глубь трущихся тел. Интенсивность тепловыделения в единицу времени на единицу номинальной площади касания равна $q = fp_a v = q_1 + q_2$, где f — коэффициент трения; $q_{1,2}$ — тепловые потоки, направленные по нормали к поверхности касания первого и соответственно второго тел.

При рассмотрении кратковременных процессов теплопроводности необходимо анализировать размер областей, в которых в данный момент времени сосредоточено основное количество тепла. На рис. 1 представлена схема взаимодействия трущихся тел, характерная для установок с малым $k_{вз}$. Через δ_1 обозначена толщина эффективной зоны, участвующей в теплопоглощении u первого тела (скользящего элемента) на период времени t , через δ_2 — максимальная толщина теплового слоя у второго тела (контртела) на период времени $t_2 = l/v$ (где l — длина скользящего элемента), т. е. когда задняя грань скользящего элемента проходит над данной точкой контртела. В большинстве случаев $\delta_1 > \delta_2$ и следовательно, $F_{01} > F_{02}$ (где $F_{01,2}$ — числа Фурье для первого и соответственно второго тел).

Анализ процессов аккумуляции тепла в поверхностных слоях твердых тел, нагреваемых кратковременными тепловыми потоками $q_{1,2}$, показывает, что трущиеся

Тип установки и узла трения	v , м/с	$k_{вз}$	t_T , с	p_a , МПа	q , МВт/м ²	F_{01}	F_{02}
Ружье и винтовка [1]	до 800	$10^{-3}-10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$	до 10	до 120	$10^{-3}-10^{-2}$	$\sim 10^{-5}$
Артиллерийское орудие [1, 12]	до 800	$10^{-3}-10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$	до 10	до 120	$10^{-3}-10^{-2}$	$\sim 10^{-5}$
Ультрацентрифуга Бимса [3]	до 800	$10^{-2}-10^{-1}$	0,1–0,3	до 50	до 300	$10^{-2}-10^{-1}$	—
Ракетные треки [7]	до 1200	$10^{-4}-10^{-2}$	до 10	до 20	до 200	0,1–1,0	$10^{-4}-10^{-3}$
Магниторельсовый тормоз железнодорожного подвижного состава [2]	до 60	$10^{-2}-10^{-1}$	до 30	~ 1	до 3	0,5–3	$\sim 0,1$
Газовые подшипники (работа в условиях вибраций) [9]	до 100	$10^{-2}-10^{-1}$	$10^{-2}-10^{-1}$	—	—	—	—
Тормоз многоместного самолета ГВФ [11]	до 30	0,7–0,8	8–30	$\sim 1,2$	до 8	до 3	до 3

тела при $F_{0,1} \leq 0,2$ можно рассматривать как полуограниченные. При $F_{0,1,2} = 0,3 \div 3$ трущиеся тела целесообразно рассматривать как неограниченные пластины толщиной b , теплоизолированные с одной стороны и нагреваемые тепловыми потоками $q_{1,2}$ с противоположной стороны.

Проведем расчет температурного поля и температуры поверхности трения скользящего элемента, работающего в более трудных условиях. Так как нас интересуют кратковременные процессы теплопередачи, то тепловой поток q_1 принимаем линейным, направленным по оси z_1 . Принимая $q_1 = \text{const}$, найдем температурные

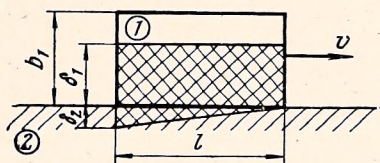


Рис. 1

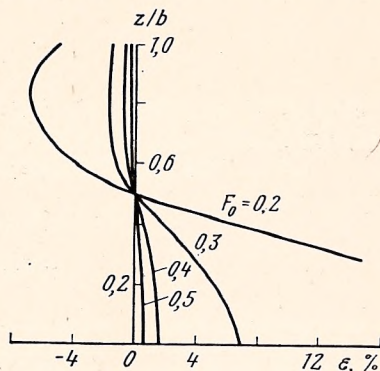


Рис. 2

поля и температуры поверхности трения скользящего элемента из выражений [6, 8], при $F_{0,1} \leq 0,2$

$$\vartheta(z_1, t_1) = \vartheta_0 + \frac{2q_1 \sqrt{a_1 t_1}}{\lambda_1} \text{ierfc} \frac{z_1}{2\sqrt{a_1 t_1}} = \vartheta_0 + \frac{2q_1 b_1 \sqrt{F_{0,1}}}{\lambda_1} \text{ierfc} \frac{z_1}{2b_1 \sqrt{F_{0,1}}}, \quad (1)$$

$$\vartheta(0, t_1) = \vartheta_0 + \frac{2q_1 \sqrt{a_1 t_1}}{\lambda_1 \sqrt{\pi}} = \vartheta_0 + \frac{2q_1 b_1 \sqrt{F_{0,1}}}{\lambda_1 \sqrt{\pi}}; \quad (2)$$

при

$$F_{0,1} \geq 0,3, \quad \vartheta(z_1, t_1) = \vartheta_0 + \frac{q_1 b_1}{\lambda_1} \left(F_{0,1} - \frac{z_1}{b_1} + \frac{z_1^2}{2b_1^2} + \frac{1}{3} \right), \quad (3)$$

$$\vartheta(0, t_1) = \vartheta_0 + \frac{q_1 b_1}{\lambda_1} \left(F_{0,1} + \frac{1}{3} \right), \quad (4)$$

где ϑ_0 — начальная температура тела; λ_1 — коэффициент теплопроводности.

Величина ошибки ϵ при вычислении температур по формулам (3) и (4) находится по графику на рис. 2 [8] в слое z/b в зависимости от числа Фурье. Например, рассчитаем температуру поверхности трения как функцию времени колодки из стали 10 при скольжении ее с постоянными скоростями $v_1=100$, $v_2=150$, $v_3=250$, $v_4=350$ м/с по направляющей большой длины, если дано: $f_1=0,036$, $f_2=0,03$, $f_3=0,025$, $f_4=0,02$, $p_a=12$ МПа, $\lambda_1=42,8$ Вт/мК, $a_1=8,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $b_1=0,01$ м, $\vartheta_0=273$ К. Кроме того, осмотр направляющей показал, что при $v_3=250$ и $v_4=350$ м/с в моменты времени $t_{m_1}^{\text{III}}=2$ и $t_{m_1}^{\text{IV}}=1$ с на ее рабочей поверхности появляется сплошной тонкий адгезионный слой из стали 10 со следами оплавления.

Интенсивность теплообразования в единицу времени на единицу номинальной площади касания в каждом рассматриваемом случае скольжения равна $q^{\text{I}}=43$, $q^{\text{II}}=54$, $q^{\text{III}}=75$, $q^{\text{IV}}=84$ МВт/м². Так как скольжение происходит с постоянными скоростями, тепловые потоки, направленные в колодку, q_1^{I} , q_1^{II} , q_1^{III} , q_1^{IV} принимаем постоянными. Значения тепловых потоков q_1^{III} и q_1^{IV} можно определить из выражения (2) при $\vartheta(0, t_{m_1}^{\text{III}})=T_{\text{пл}}$ и $\vartheta(0, t_{m_1}^{\text{IV}})=T_{\text{пл}}$, где $T_{\text{пл}}=1773$ К для стали 10. Тогда

$$q_1^{\text{III}} = \frac{\lambda_1 \sqrt{\pi} (T_{\text{пл}} - \vartheta_0)}{2 \sqrt{a_1 t_{m_1}^{\text{III}}}} = 14 \text{ МВт/м}^2 = 0,19 q^{\text{III}},$$

$$q_1^{\text{IV}} = \frac{\lambda_1 \sqrt{\pi} (T_{\text{пл}} - \vartheta_0)}{2 \sqrt{a_1 t_{m_1}^{\text{IV}}}} = 20 \text{ МВт/м}^2 = 0,24 q^{\text{IV}}.$$

Значения тепловых потоков q_1^I и q_1^{II} примем равными $q_1^I=0,19$ $q_1^{II}=0,19$ $q_1^{III}=10$ МВт/м².

Расчет температуры поверхности трения проводим по формулам (2) и (4). Результаты расчета графически представлены на рис. 3.

С течением времени температура поверхности трения колодки возрастает, достигая значений, соответствующих температуре плавления стали 10 ($T_{пл.}=1773$ К).

Оплавление колодки по всей номинальной площади касания начинается при: $v_1=100$ в момент времени $t_{m_1}^I=5,8$ ($F_{0_{m_1}}^I=0,47$); $v_2=150$ в момент времени $t_{m_1}^{II}=3,9$ ($F_{0_{m_1}}^{II}=0,31$); $v_3=250$ в момент времени $t_{m_1}^{III}=2$ ($F_{0_{m_1}}^{III}=0,16$); $v_4=350$ м/с в момент времени $t_{m_1}^{IV}=1$ с ($F_{0_{m_1}}^{IV}=0,08$).

Наличие оплавления поверхностных слоев твердых тел при высокоскоростном трении, а также в теплонапряженных тормозах и передачах отмечено в работах

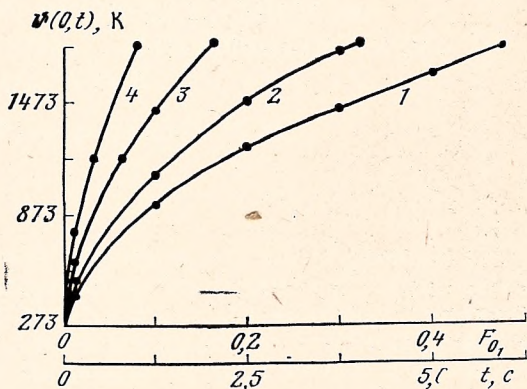


Рис. 3. Зависимости температуры поверхности трения от времени: 1 — $q_1^I=8$ ($v_1=100$), 2 — $q_1^{II}=10$ ($v_2=150$), 3 — $q_1^{III}=14$ ($v_3=250$), 4 — $q_1^{IV}=20$ МВт/м² ($v_4=350$ м/с)

[4—5, 7, 10, 12]. Кривые 1 и 2 (рис. 3) построены по формулам (2), (4) и хорошо согласуются на границах их применимости, т.е. при $F_{0_1}=0,2$ и $0,3$. Кривые 2 и 3 построены по формуле (2). Температура на расстоянии z_1 от поверхности трения в любой момент времени вычисляется из выражений (1) и (3). В тех случаях, когда тепловой поток изменяется во времени, необходимо решать тепловую задачу с учетом конкретных граничных условий второго рода при малых F_0 как для полуограниченного тела, а при $F_0=0,3-3$ как для неограниченной пластины толщиной b , теплоизолированной с одной стороны.

Поступила 16 I 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В. А. Трение и износ металлов при высоких скоростях скольжения. В кн.: Трение, изнашивание и смазка. Вып. 1, М., «Машиностроение», 1978.
2. Балон Л. В. Электромагнитный рельсовый тормоз. Тр. РИИЖТ, № 50, Ростов-на-Дону, 1965.
3. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. М., «Машиностроение», 1968.
4. Горюнов В. М. Исследования трения при нестационарном высокоскоростном режиме. В кн.: Новое в теории трения, М., «Наука», 1966.
5. Дроздов Ю. Н. Трение и противозадирная стойкость тяжело нагруженного фрикционного контакта. В кн.: Теория трения, износа и проблемы стандартизации. Брянск, Приокское книжное издательство, 1978.
6. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967.
7. Лямин В. И. Динамика ракетных тележек. М., Оборонгиз, 1962.
8. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л., «Энергия», 1968.
9. Пинегин С. В., Петров В. П. и др. Исследование материалов для подшипников с газовой смазкой. М., «Наука», 1975.
10. Полосаткин Г. Д., Грибанов С. А. Измерение температуры на поверхности реза при скоростях до 800 м/с. Изв. вузов. Физика, 1965, № 3.
11. Федорченко И. М., Ровинский Д. Я. и др. Исследование материалов для тормозных и передаточных устройств. Киев, «Наукова думка», 1976.
12. Montgomery R. S. Muzzle wear of cannon. Wear, 1975, vol. 33, № 2.