

Колпаков М.В.

магистрант,

Некрасов А.А.

магистрант,

Фоминов Е.В.

ведущий электроник кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»,

Научный руководитель: Шучев К.Г., к.т.н.

Донской государственный технический университет

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОГО И СМЕШАННОГО РЕЖИМОВ ТРЕНИЯ

Рассмотрена задача теплофизического анализа процесса трения для случая, когда площадка контакта может быть разделена на две части: участок смешанного трения в начале контакта с коэффициентом трения f_1 и участок граничного трения с коэффициентом трения $f_2 > f_1$, расположенный ближе к концу контакта. Получены расчётные зависимости для оценки распределения температуры в контактирующих телах и на поверхности контакта. Эти зависимости являются замкнутыми, содержат только параметры, заданные по условию, и не содержат неизвестных величин. Примененная методика теплофизического анализа является применимой к парам трения любой конфигурации и любым технологическим системам или их подсистемам независимо от того, какие рабочие процессы осуществляются в этих системах.

Ключевые слова: граничное трение, смешанное трение, температурное поле, средняя поверхностная температура контакта.

Kolpakov M.V.

undergraduate,

*Nekrasov A.A.
undergraduate,
Fominov E.V.*

*leading electronics of "Metal-cutting Machines and Tools" Department,
Scientific Director: Shuchev C.G., Ph.D.
Don State Technical University*

ASSESSMENT OF TEMPERATURE VALUES IN TRIBOSYSTEMS UNDER CONDITIONS OF BOUNDARY AND MIXED FRICTION MODES

The question of thermal analysis of the friction process for the case where the contact area can be divided into two parts was considered: the area of mixed friction at the beginning of contact with the f_1 friction factor and the area of boundary friction with the friction factor $f_2 > f_1$, located near the end of the contact. Calculation dependencies have been obtained to estimate the temperature distribution in the contact bodies and on the contact surface. These dependencies are closed, contain only parameters set by condition, and do not contain unknown values. The applied method of thermal analysis is applicable to friction pairs of any configuration and any technological systems or their subsystems, regardless of what work processes are carried out in these systems. Keywords: boundary friction, mixed friction, temperature field, average surface contact temperature.

В ряде случаев при трении в среде смазочных материалов высокой вязкости, в частности, пластичных смазочных материалов, по схеме «палец по диску» площадка контакта может быть разделена на две части: 1. участок смешанного трения в начале контакта с коэффициентом трения f_1 ; 2. участок граничного трения с коэффициентом трения $f_2 > f_1$, расположенный ближе к концу контакта. Увеличение коэффициента трения по длине контакта в этом случае обусловлено уменьшением толщины смазочного слоя в связи с «размазыванием» изначально

сформировавшегося слоя смазки и затрудненным пополнением образовавшегося дефицита смазочного материала из валиков смазочного материала со стороны боковых участков индентора (пальца). Для оценки значений температуры в трибосопряжении в этих условиях в первом приближении предлагается физическая модель контакта, представленная на рис. 1. Разумеется, в реальных условиях контактного взаимодействия граница между участками 1 и 2 имеет нечеткий, «размытый» характер, а значения коэффициентов трения f_2 и f_1 являются средними значениями на выделенных двух участках.

Полосовые источники тепловыделения с постоянной поверхностной плотностью q_{s1} и q_{s2} считаем быстро движущимися, т.е.

$$Pe = \frac{V l_{1(2)}}{a_2} \geq 8 \dots 10. \quad (1)$$

Это означает, что распространением теплоты перед движущимися источниками можно пренебречь и считать, что теплота распространяется только по нормали к поверхности контакта.

Такое допущение позволяет представить полупространство (тело 2) как пакет полуограниченных пластин малой толщины, имеющих адиабатическую изолированную боковую поверхность, и свести задачу к классу задач одномерной нестационарной теплопроводности.

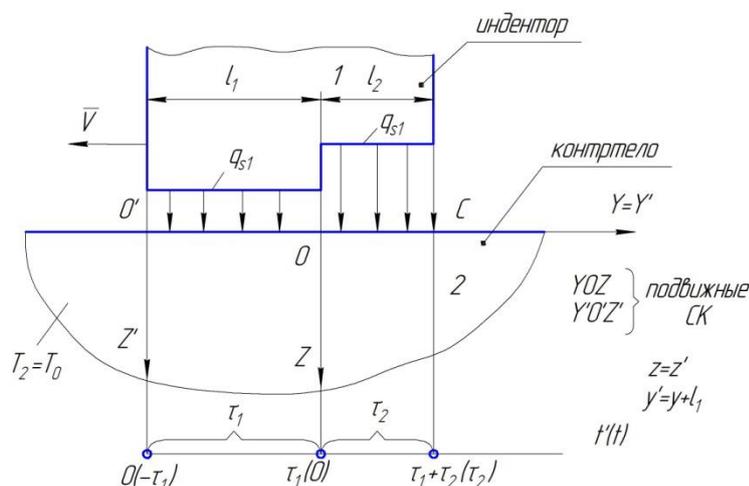


Рис. 1. Формализованная физическая модель контакта

Для описания «моментального снимка» температурного поля в контртеле 2 (неподвижное полупространство) в подвижных системах координат YOZ и Y'O'Z', который будет воспроизводиться в каждый текущий момент времени $t'(t)$ при установившемся трении, в этом случае можно использовать решение для температурного поля в полупространстве одного измерения под действием единичного теплового импульса с постоянной поверхностной плотностью q , действующего в течение времени τ_u [1]:

1) Фаза нагрева ($0 \leq z < \infty, 0 \leq t \leq \tau_u$)

$$T(z, t) = \frac{2q\sqrt{at}}{\lambda} i \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{at}}; \quad (2)$$

2) Фаза охлаждения ($0 \leq z < \infty, t \geq \tau_u$)

$$T(z, t) = \frac{2q}{\sqrt{\lambda c \rho}} \left[\sqrt{t} i \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{at}} - \sqrt{t - \tau_u} i \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a(t - \tau_u)}} \right],$$

$$\text{где } i \operatorname{erfc} u = \int_u^\infty \operatorname{erfc} x \, dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u \operatorname{erfc} u,$$

$$\operatorname{erfc} u = 1 - \operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty e^{-x^2} \, dx. \quad (3)$$

Таким образом, решение задачи нестационарной теплопроводности по определению температурного поля в контртеле 2 (неподвижное полупространство) будет иметь вид:

1) Зона смешанного трения O'O ($0 \leq t' \leq \tau_1 = \frac{l_1}{V}; 0 \leq y' \leq l_1$;

$$q = q_{s1} = \chi f_1 p V)$$

$$T_2(y', z) = \frac{2q_{s1}\sqrt{a_2\frac{y'}{V}}}{\lambda_2} i \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'}{V}}} + T_0 =$$

$$= \frac{2q_{s1}\sqrt{a_2\frac{y'}{V}}}{\lambda_2} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{z^2V}{4a_2y'}} - \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'}{V}}} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'}{V}}} \right] + T_0. \quad (4)$$

2) Зона граничного трения ОС ($\tau_1 \leq t' \leq \tau_1 + \tau_2 = \frac{l_1+l_2}{V}$; $l_1 \leq y' \leq l_1 + l_2$; $q = q_{s2} = \chi f_2 pV$).

Температурное поле в этой зоне определяется как суперпозиция полей от двух движущихся полосовых источников с поверхностными плотностями теплового потока q_{s1} и q_{s2}

$$T_2(y', z) = I_1(y', z) + I_2(y', z). \quad (5)$$

$$\begin{aligned} I_1(y', z) &= \frac{2q_{s1}\sqrt{a_2}}{\lambda_2} \left[\sqrt{\frac{y'}{V}} i \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'}{V}}} - \sqrt{\frac{y'-l_1}{V}} i \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'-l_1}{V}}} \right] + T_0 = \\ &= \frac{2q_{s1}\sqrt{a_2}}{\lambda_2} \left\{ \sqrt{\frac{y'}{V}} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{z^2V}{4a_2y'}} - \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'}{V}}} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'}{V}}} \right] - \sqrt{\frac{y'-l_1}{V}} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{z^2V}{4a_2(y'-l_1)}} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'-l_1}{V}}} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'-l_1}{V}}} \right] \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2(y', z) &= \frac{2q_{s2}\sqrt{a_2\frac{y'-l_1}{V}}}{\lambda_2} i \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'-l_1}{V}}} = \\ &= \frac{2q_{s2}\sqrt{a_2\frac{y'-l_1}{V}}}{\lambda_2} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{z^2V}{4a_2(y'-l_1)}} - \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'-l_1}{V}}} \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_2\frac{y'-l_1}{V}}} \right]. \quad (7) \end{aligned}$$

Температура в точке О на поверхности контакта (условная граница между зонами смешанного и граничного трения)

$$T_2(l_1, 0) = \frac{2q_{s1}\sqrt{a_2l_1}}{\lambda_2\sqrt{\pi V}} + T_0. \quad (i \operatorname{erfc} 0 = \frac{1}{\sqrt{\pi}}) \quad (8)$$

Температура в точке С на поверхности контакта (максимальная поверхностная температура)

$$T_{max} = T_2(l_1 + l_2, 0) = \frac{2\sqrt{a_2}}{\lambda_2\sqrt{\pi V}} [q_{s1}(\sqrt{l_1 + l_2} - \sqrt{l_2}) + q_{s2}\sqrt{l_2}] + T_0. \quad (9)$$

График распределения температуры на поверхности контакта представлен на рис. 2.

Температурное поле в теле 1 (индентор), рассматриваемом как полуограниченный стержень без тепловой изоляции (стационарный тепловой режим, координата z направлена от поверхности контакта вглубь тела) [2]

$$T_1(z) = (T_k - T_0) \exp\left(-\sqrt{Bi} \frac{z}{\delta}\right) + T_0, \quad (10)$$

где $T_k = T_1(0)$.

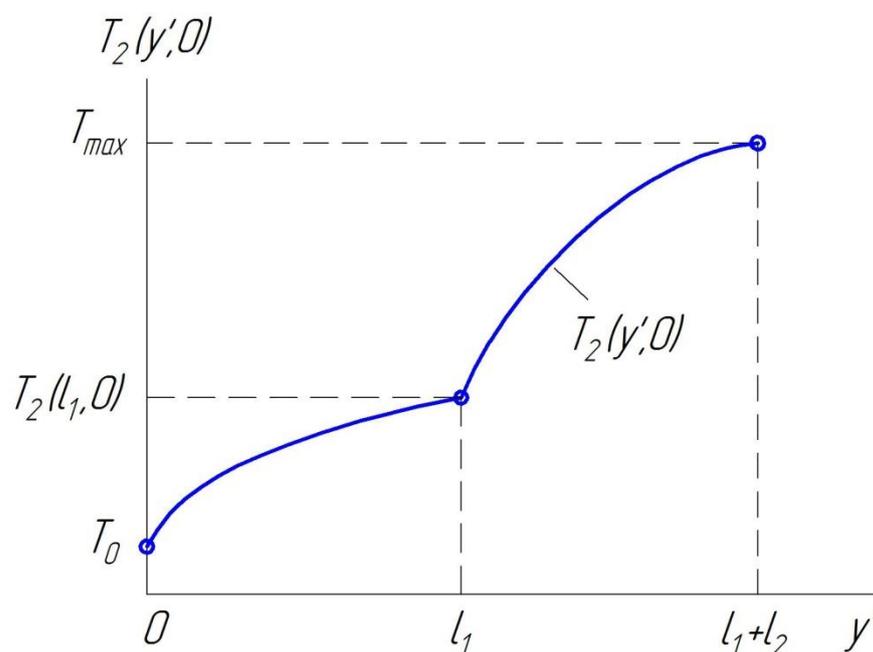


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности контакта

Первая производная от температуры по координате

$$\frac{dT_1(z)}{dz} = -\frac{\sqrt{Bi}}{\delta} (T_k - T_0) \exp\left(-\sqrt{Bi} \frac{z}{\delta}\right). \quad (11)$$

Средняя поверхностная плотность теплового потока, направленного от поверхности контакта в индентор

$$q_{\text{и}} = -\lambda_1 \frac{dT_1(0)}{dz} = \frac{\lambda_1 \sqrt{Bi}}{\delta} (T_k - T_0) = (1 - \chi) \bar{f} p V, \quad (12)$$

где $\bar{f} = \frac{f_1 l_1 + f_2 l_2}{l_1 + l_2}$.

Полагая $T_0 = 0$, получаем

$$T_k = \frac{\delta p V \bar{f} (1 - \chi)}{\lambda_1 \sqrt{Bi}}. \quad (13)$$

Для определения неизвестного коэффициента распределения теплового потока χ используем балансовое уравнение $T_k = T_2(l_1, 0)$ (условие неразрывности температурного поля), которое при $T_0 = 0$ имеет вид

$$\frac{\delta p V \bar{f} (1 - \chi)}{\lambda_1 \sqrt{Bi}} = \frac{2 \chi f_1 p V \sqrt{a_2 l_1}}{\lambda_2 \sqrt{\pi V}}. \quad (14)$$

Решая это балансовое уравнение, получаем

$$\chi = \left(1 + 2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{f_1}{\bar{f}} \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{a_2 l_1 Bi}{\pi V}} \right)^{-1}. \quad (15)$$

Таким образом, получив зависимость для расчёта коэффициента распределения теплового потока на площадке контакта индентора с контртелом χ , мы определили последнюю неизвестную величину, входящую в формулы для оценочного расчёта температурного поля в контактирующих телах 1 и 2, а также распределение поверхностной температуры на площадке контакта. Задачу теплофизического анализа процесса трения для случая, когда площадка контакта может быть разделена на две части: 1. участок смешанного трения в начале контакта с коэффициентом трения f_1 ; 2. участок граничного трения с коэффициентом трения $f_2 > f_1$, расположенный ближе к концу контакта, можно считать

решенной. Полученные расчётные зависимости являются замкнутыми и не содержат неизвестных величин.

Обозначения

$l_{1(2)}$ – длина участка смешанного (граничного) трения на поверхности контакта;

Pe – критерий Пекле;

V – скорость скольжения;

a_2 – коэффициент температуропроводности материала контртела (тела 2);

$t'(t)$ – текущее время контактного взаимодействия, привязанное к подвижной системе координат $Y'O'Z'$ (YOZ);

$\tau_{1(2)}$ – полное время контактного взаимодействия на участках смешанного (1) и граничного (2) трения;

$q_{s1(2)}$ – поверхностная плотность теплового потока, направленного от поверхности контакта в контртело на участках смешанного (1) и граничного (2) трения;

p – нормальное давление на контакте;

χ – коэффициент распределения теплового потока на контакте между индентором и контртелом;

T_0 – начальная температура (температура окружающей среды);

$f_{1(2)}$ – средний коэффициент трения на участках смешанного (1) и граничного (2) трения;

\bar{f} – средний коэффициент трения по всей поверхности контакта;

q_u – поверхностная плотность теплового потока, направленного от поверхности контакта в индентор;

$T_{1(2)}$ – температура в инденторе (1) и контртеле (2);

$\lambda_{1(2)}$ – коэффициент теплопроводности материала индентора (1) и контртела (2);

Bi – критерий Био;

α – коэффициент теплоотдачи на боковых поверхностях индентора;

δ – отношение площади поперечного сечения индентора к периметру сечения (характерный линейный размер).

$erf u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-x^2} dx$ – функция ошибок Гаусса.

Выводы:

1. Решена в первом приближении задача теплофизического анализа процесса трения для случая, когда площадка контакта может быть разделена на две части: 1) участок смешанного трения в начале контакта с коэффициентом трения f_1 ; 2) участок граничного трения с коэффициентом трения $f_2 > f_1$, расположенный ближе к концу контакта. Полученные расчётные зависимости являются замкнутыми и не содержат неизвестных величин.

2. Разработанный алгоритм расчёта температурных полей в контактирующих телах может быть представлен в виде программы для ЭВМ, что позволяет существенно ускорить проведение расчетов при решении конкретных задач теплофизического анализа процессов трения и обработки лезвийным инструментом.

3. Примененная методика теплофизического анализа является, в принципе, применимой к парам трения любой конфигурации и любым технологическим системам или их подсистемам независимо от того, какие рабочие процессы осуществляются в этих системах (лезвийная обработка, обработка ППД, шлифование и т.д.).

Использованные источники:

1. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 328 с.
2. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.