

Расчет интенсивности изнашивания материалов в условиях оплавления при высокоскоростном трении

Канд. техн. наук В. А. БАЛАКИН

Проблемы трения и износа материалов при скорости скольжения $v > 50$ м/с возникают в различных отраслях промышленности [1]. Для большинства узлов трения, работающих в таких условиях, характерны малый коэффициент взаимного перекрытия трущихся тел, кратковременные процессы трения, высокая интенсивность теплообразования. Температура на границе фрикционного контакта может достигать температуры плавления одного из трущихся тел, в результате чего начнется его оплавление [2]. Начальные очаги оплавления возникают в точках фактического контакта, где максимальная (контактная) температура в некоторый момент времени достигает температуры плавления одного из тел; и если тепловой поток, направленный в данное тело, достаточно велик, то через некоторый промежуток времени происходит оплавление тела по всей номинальной площади касания [1]. В условиях оплавления интенсивность изнашивания материалов зависит от скорости оплавления.

Задачи об оплавлении твердых тел, в частности, за счет тепла, выделяющегося при трении, являются нелинейными. Это обусловлено тем, что при решении таких задач крайевые условия задаются на движущейся границе раздела твердой и жидкой фаз, закон движения которой неизвестен и должен быть найден в процессе решения.

В инженерной практике встречаются следующие случаи оплавления твердых тел на границе фрикционного контакта при высокоскоростном трении: 1) оплавление скользящего элемента в виде выступа, полосы или колодки, находящегося в контакте с контртелом; 2) оплавление контртела, находящегося в контакте со скользящим элементом; 3) одновременное оплавление скользящего элемента и контртела на границе контакта.

Первый случай характерен для высокоскоростных узлов трения, у которых температура плавления контртела выше температуры плавления скользящего элемента ($T_{пл2} > T_{пл1}$), второй — для высокоскоростных узлов трения, у которых температура плавления скользящего элемента выше температуры плавления контртела ($T_{пл1} > T_{пл2}$), третий случай возникает, когда $T_{пл1} = T_{пл2}$.

Рассмотрим задачу об оплавлении скользящего элемента в области контакта. Физическая модель оплавления колодки, иллюстрирующая данный случай, представлена на рисунке. В колодке выделен слой, участвующий за время t в теплопоглощении; его толщина

$$\delta = k \sqrt{a_1 t},$$

где k — коэффициент, характеризующий количество теплоты, аккумулированное в данном слое (принимают $k=1 \div 3$); a_1 — коэффициент температуропроводности скользящего элемента.

Полагая, что контртело является абсолютно жестким, а оплавление происходит с абляцией, можно рассматривать изменение температуры только в твердой фазе, принимая температуру в жидкой фазе равной температуре плавления. Так как процессы высокоскоростного трения кратковременные, скользящий элемент можно рассматривать как полубесконечное тело.

Процесс теплопроводности в скользящем элементе с оплавлением описывается уравнением

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2}, \quad (1)$$

в котором $s(t) < z < h$ при $t > 0$;

$$\vartheta(0, t_m) = T_{пл1}; \quad z = 0 \text{ при } t = t_m;$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial z} = 0; \quad z = h \text{ при } t > 0;$$

$$\vartheta(s, t) = T_{пл1}; \quad z = s(t) \text{ при } t > t_m;$$

$$\vartheta(z, 0) = \vartheta_0; \quad 0 < z < h \text{ при } t = 0,$$

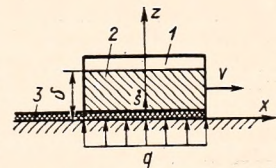
и уравнением, характеризующим условие теплового баланса на границе раздела твердой и жидкой фаз в виде

$$q = -\lambda_1 \frac{\partial \vartheta}{\partial z} + r_1 \rho_1 \dot{s}; \quad (2)$$

здесь c_1 , ρ_1 , λ_1 , $T_{пл1}$, r_1 — удельная теплоемкость, плотность, теплопроводность, температура плавления, удельная теплота плавления скользящего элемента; ϑ_0 и ϑ — начальная и текущая температуры; z — координата в направлении, перпендикулярном к поверхности трения; h — толщина скользящего элемента; t_m — время начала оплавления; q — тепловой поток; $s(t)$ — толщина оплавленного слоя; \dot{s} — скорость оплавления. При этом значения c_1 , ρ_1 и λ_1 для твердой фазы в уравнении (1), берутся как средние арифметические величины в температурном интервале $T_{пл1} - \vartheta_0$; значения r_1 , ρ_1 для жидкой фазы в уравнении (2) — при температуре плавления $T_{пл1}$.

Для определения скорости оплавления \dot{s} необходимо знать распределение температуры в любой момент времени по толщине скользящего элемента. Однако температурное поле в твердой фазе плавящегося тела (особенно при переменном q) точным решением найти не удастся. Поэтому для решения задачи используем метод интеграла теплового баланса [3]. При этом методе задаются определенным температурным полем как функцией $\vartheta(z, t)$ и z ; интеграл от подобранной функции $\int_0^{\delta} \vartheta(z, t) dz$ должен

быть близок к его истинному значению. Это значит, что количество теплоты, аккумулированной телом через поверхность контакта, в обоих случаях должно быть одним и тем же. Такой функцией, дающей удовлетворительные по точности результаты и приводящей к наиболее простым решениям, является многочлен n -степени.



Физическая модель оплавления элемента скользящего по контртелу; 1 — область с начальной температурой ϑ_0 ; 2 — область прогрета с температурой $\vartheta(z, t)$; 3 — расплавленный материал

Распределение температуры в твердой фазе скользящего элемента представим уравнением

$$\vartheta = A - Bz^n. \quad (3)$$

Значения коэффициентов A и B находим для момента времени $t=t_m$ исходя из того, что

$$\vartheta = T_{пл}, \text{ при } z=0, \text{ тогда } A = T_{пл};$$

$$\vartheta = \vartheta_0 \text{ при } z = \delta_m, \text{ тогда } \vartheta_0 = T_{пл} - B\delta_m^n \text{ и}$$

$$B = \frac{T_{пл} - \vartheta_0}{\delta_m^n},$$

где δ_m — толщина прогретого слоя за время $t=t_m$.

Тогда уравнение (3) принимает вид

$$\vartheta = T_{пл} - \frac{T_{пл} - \vartheta_0}{\delta_m^n} z^n. \quad (4)$$

При $t > t_m$ положение некоторой точки на температурной кривой относительно фронта оплавления определяется координатой $z=s$, а толщина прогретого слоя соответствует значению $\delta=s$. Следовательно, для периодов времени $t > t_m$ распределение температуры в твердой фазе описывается выражением

$$\vartheta = T_{пл} - \frac{T_{пл} - \vartheta_0}{(\delta - s)^n} (z - s)^n. \quad (5)$$

Умножая правую и левую части уравнения (1) на dz и проинтегрировав его в пределах от $z=s$ до $z=\delta$, получим уравнение, называемое интегралом теплового баланса:

$$c_1 \rho_1 \int_s^\delta \frac{\partial \vartheta}{\partial t} dz = \lambda_1 \left[\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right)_\delta - \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right)_s \right]. \quad (6)$$

При интегральном методе принимается, что для всех значений $z \geq \delta$ температура $\vartheta = \vartheta_0$. Тогда

$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right)_\delta = 0$ и из уравнения (6), воспользовавшись выражением (5), после некоторых преобразований, найдем скорость оплавления

$$\dot{s} = \frac{q - c_1 \rho_1 (T_{пл} - \vartheta_0) \frac{n}{n+1} \dot{\delta}}{c_1 \rho_1 \frac{T_{пл} - \vartheta_0}{n+1} + r_1 \rho_1}. \quad (7)$$

Как видно, значение \dot{s} зависит от интенсивности теплового потока q , теплофизических характеристик материала ($c_1, \rho_1, T_{пл}, r_1$) и скорости распространения тепла в твердой фазе $\dot{\delta}$. Чем выше q , тем больше \dot{s} , чем выше $c_1, \rho_1, T_{пл}, r_1$ и $\dot{\delta}$, тем меньше \dot{s} .

Значения показателя степени n можно находить экспериментально путем измерения температурного поля в твердой фазе скользящего элемента и проведения соответствующей обработки полученных данных.

В условиях кратковременных процессов трения очень важным является определение начальной скорости оплавления \dot{s}_0 . Для этого необходимо из точного решения знать температурное поле в поверхностном слое тела на период времени t_m . Например, если $q = \text{const}$, то температурное поле определяется из выражения

$$\vartheta(z, t_m) = \vartheta_0 + \frac{2q}{\lambda_1} \sqrt{a_1 t_m} \operatorname{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{a_1 t_m}}. \quad (8)$$

Тогда, вычисляя интегралы $\int_0^{\delta_m} \vartheta(z, t_m) dz_1$ приближенной (4) и точной (8) функций и приравняв их друг к другу, найдем значение n при $t=t_m$.

После соответствующих преобразований получим

$$n = \frac{X \sqrt{\pi}}{k - X \sqrt{\pi}},$$

$$\begin{aligned} \text{где } X = \operatorname{erf} \left(\frac{\delta_m}{2\sqrt{a_1 t_m}} \right) + \frac{\delta_m^2}{4a_1 t_m} \operatorname{erf} \left(\frac{\delta_m}{2\sqrt{a_1 t_m}} \right) - \\ - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{\delta_m}{2\sqrt{a_1 t_m}} \right) - \frac{\delta_m^2}{4a_1 t_m} + \\ + \frac{\delta_m}{2\sqrt{a_1 t_m}} \exp \left(-\frac{\delta_m^2}{4a_1 t_m} \right). \end{aligned}$$

Для этого случая при $k=1$ $X=0,33$ и $n=1,402$, при $k=2$ $X=0,308$ и $n=0,375$, при $k=3$ $X=0,194$ и $n=0,13$. Расчеты показывают, что значения s_0 , вычисленные при $k=2$ и $k=3$, различаются менее чем на 3%.

С течением времени скорость плавления полуограниченного твердого тела, нагреваемого тепловым потоком $q = \text{const}$, стремится к значению, определяемому точным решением [4] из выражения

$$\dot{s}_e = \frac{q}{\rho_1 [r_1 + c_1 (T_{пл} - \vartheta_0)]}. \quad (9)$$

Уравнение (9) легко получается из выражения (7) при $n=0$, что отвечает случаю, когда скорость распространения тепла в твердой фазе становится постоянной.

Если $T_{пл} = T_{пл2}$, то процесс теплопроводности в скользящем элементе также описывается рассмотренными зависимостями и скорость его оплавления (скорость изнашивания) определяется формулой (7).

В общем случае скорость оплавления \dot{s} является переменной и изменяется от начальной s_0 до конечной s_e . Следовательно, переменна и толщина расплавленного слоя. Средняя толщина расплавленного слоя

$$h'_{cp} = \frac{sl}{L}, \quad (10)$$

где L — путь трения с начала оплавления; l — длина скользящего элемента.

Текущее значение толщины расплавленной пленки

$$h' = \dot{s} \frac{l}{v}.$$

Средняя интенсивность изнашивания согласно формуле (10)

$$J_{h'cp} = \frac{h'_{cp}}{l},$$

а текущее ее значение

$$J_h = \frac{\dot{s}}{v}.$$

Анализ показывает, что при инженерных расчетах интенсивности изнашивания материалов в высокоскоростных узлах трения можно ограничиваться определением скорости оплавления s_0 .

Пример. Рассчитаем интенсивность изнашивания колодки из стали 10 при скольжении ее со скоростью $v=350$ м/с по направляющей большой длины. Пусть коэффициент трения $f=0,02$; удельная нагрузка на номинальную площадь касания $p_a=12$ МПа:

$$\lambda_1=42,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C}); a_1=8,1\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$c_1\rho_1=\lambda_1/a_1=5,3\cdot 10^6 \text{ (Вт}\cdot\text{с)}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{C}); \vartheta_0=0;$$

$$T_{\text{пл}_1}=1500^\circ\text{C};$$

$$\rho_1=7860 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$r_1=83,7\cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг};$$

$$k=2; n=0,375; l=0,3 \text{ м}.$$

Интенсивность теплообразования в единицу времени на единице номинальной площади касания

$$q_1=f p_a v=84 \text{ МВт}/\text{м}^2.$$

Так как скольжение происходит с $v=\text{const}$, то $q_1=\text{const}$ и тепловой поток q , направленный в скользящий элемент, также можно принять постоянным.

Температура на поверхности трения колодки согласно уравнению (8) выражается как

$$\vartheta(0, t) = \vartheta_0 + \frac{2q}{\lambda_1 \sqrt{\pi}} \sqrt{a_1 t}. \quad (11)$$

При $t=t_m=1$ с на поверхности трения направляющей появляется сплошной тонкий адгезионный слой стали 10 со следами оплавления. В этих условиях значение теплового потока можно определить из формулы (11) при $\vartheta(0, t_m) = T_{\text{пл}_1}$:

$$q = \frac{\lambda_1 \sqrt{\pi} T_{\text{пл}_1}}{2 \sqrt{a_1 t_m}} = 20 \text{ МВт}/\text{м}^2.$$

Воспользовавшись выражением (7), получим

$$s=2,16\cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{с},$$

$$\text{тогда } J_h = \frac{\dot{s}}{v} = 6,2 \cdot 10^{-6}.$$

Результаты расчетов изложенным методом удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [1], полученными в условиях трения образцов из сталей 10, 45, У10, армо-железа, чугуна и меди по направляющей большой длины с $v \leq 350$ м/с = const и $p_a \leq 20$ МПа. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 11%.

Список литературы

1. Балакин В. А., Балакина Н. А. Оплавление твердого тела при высокоскоростном трении. — В Межвуз. темат. науч. сб.: Среда и трение в механизмах. Вып. 2, Таганрог: изд. ТРТИ, 1976, с. 16—26.
2. Чичинадзе А. В., Горюнов В. М. Температурный режим работы опор скольжения при высоких скоростях. — В сб.: Тепловая динамика трения. М.: Наука, 1970, с. 70—77.
3. Гудмен Т. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена. — В сб.: Проблемы теплообмена, М.: Атомиздат, 1967, с. 41—96.
4. Landau H. G. Heat conduction in a melting solid. Quarterly of applied mathematics. 1950, vol VIII, N 1, p. 81—94.