УДК 539.3

Е. А. Губарева, Т. Ю. Мозжорина,
А. Н. Щетинин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЛ С ПОКРЫТИЯМИ ПРИ ИЗНОСЕ, ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИИ И УЧЕТЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассмотрена упрощенная схема контакта тел с упругими мягкими покрытиями в целях возможно большего учета явлений, протекающих в области контакта. Предложена формула для описания нелинейного трения. С использованием этой формулы получено выражение для расчета температуры в области контакта.

E-mail: gubareva_ea@pochta.ru

Ключевые слова: *покрытие, трение, тепловыделение, контактное давление, контактная температура*.

Изучение контактных задач для тел с покрытиями представляет практический интерес, поскольку такие исследования могут быть использованы при создании методов расчета фундаментов и оснований, гидротехнических сооружений, клеевых соединений, ледовых переправ, дорожных покрытий, композиционных материалов. В сходной постановке задача о взаимодействии тел с покрытиями при износе, тепловыделении и учете зависимости коэффициента трения от температуры рассматривалась в работе [1]. В настоящей работе предложена иная зависимость коэффициента трения от температуры.

Постановка задачи о контактном взаимодействии двух тел с тонкими мягкими покрытиями. Пусть на одно тело нанесено покрытие 1 с начальной толщиной h_{10}, а на другое тело — покрытие 2 с начальной толщиной h_{20}. При этом механические и теплофизические характеристики покрытий различны; механические характеристики самих тел значительно превосходят аналогичные параметры покрытий тел, так что тела по сравнению с их покрытиями можно считать абсолютно жесткими; область контакта тел с покрытиями намного превосходит толщины покрытий h_{10} и h_{20}, так что покрытия можно считать относительно тонкими.

В близкой постановке задача рассматривалась в работах [2—4].

Используя «принцип микроскопа» [5], растянем окрестность какой-либо точки внутри области контакта и представим схему контакта тел с покрытиями, как это показано на рисунке.

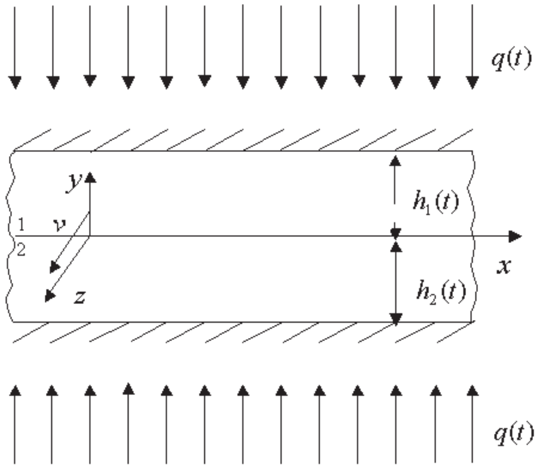

Схема контакта тел с покрытиями

Пусть в начальный момент времени одно тело, находясь в контакте с другим, начинает двигаться относительно него с постоянной скоростью v в направлении оси z. Динамическими эффектами будем пренебрегать. Обозначим через $q(t)$ контактное давление в момент времени t; в силу «принципа микроскопа» его можно считать не зависящим от координат x и z.

Предположим, что в области контакта возникают силы трения $\tau(t)$, связанные с контактным давлением $q(t)$ нелинейной зависимостью $\tau = k(q, T)$, которую представим в следующеем виде:

$$k(q,T) = \tau_* \left\{ \left[1 - \exp\left(-\frac{k_1 q}{\tau_*} \right) \right] + (\beta_1 + \beta_2) T^* \left[1 - \exp\left(-\frac{k_2 q}{\tau_*} \right) \right] \right\}. \quad (1)$$

Здесь τ_* — минимальное из касательных напряжений текучести материалов покрытий; k_1, k_2 — коэффициенты трения материалов покрытий; T^* — контактная температура; $\beta_1 = (1+\nu_1)(1-\nu_1)^{-1}\alpha_1$; $\beta_2 = (1+\nu_2)(1-\nu_2)^{-1}\alpha_2$, где ν_1, ν_2 — коэффициенты Пуассона материалов покрытий; α_1, α_2 — коэффициенты линейного расширения материалов покрытий.

Вследствие трения в области контакта возникает износ поверхностей покрытий. Происходит изменение толщин покрытий за счет термоупругих деформаций. Обозначим текущие значения толщин покрытий через $h_1(t)$ и $h_2(t)$. Износ будем считать абразивным. Тогда перемещения, возникающие вследствие износа, пропорциональны работе сил трения и, следовательно, изменение толщин покрытий произойдет соответственно на величины [6]

$$\upsilon_{1*}(t) = -l_1 \int_0^t v\tau \, d\varsigma = -l_1 v \int_0^t k(q, T) \, d\varsigma;$$

$$\upsilon_{2*}(t) = l_2 \int_0^t v\tau \, d\varsigma = l_2 v \int_0^t k(q, T) \, d\varsigma,$$

где l_1, l_2 — коэффициенты износостойкости материалов покрытий.

Вследствие трения в области контакта происходит также тепловыделение. Если пренебречь малой долей мощности работы сил трения, идущей на износ покрытий и приращение мощности их упругой энергии, то количество теплоты, выделяемой в единицу времени на единице площади контакта, можно представить в виде

$$Q = v\tau(t) = vk(q, T). \tag{2}$$

Износ — медленно протекающий процесс, поэтому будем считать, что функции $q(t)$, $\tau(t)$, $h_1(t)$, $h_2(t)$ являются медленно изменяющимися.

Определение контактной температуры. В контактной задаче с учетом износа и тепловыделения от трения представляет интерес не только определение контактного давления, но и контактных температур поверхностей покрытий. Для этого предположим, что давление задано, рассмотрим задачу теплопроводности для тел с покрытиями при наличии источников теплоты в зоне их контакта, т. е. на оси x. Поскольку $q(t)$ изменяется медленно, режим теплопроводности можно считать квазистационарным.

В действительности тепловыделение происходит не на оси x, а в примыкающем к оси x тонком слое толщиной $\delta \ll \inf(h_{10}, h_{20})$, который называют «третьим слоем» [7]. Теплофизические свойства этого слоя вследствие наличия продуктов износа, шероховатостей (микроповреждений и трещин) неоднородны по толщине. Таким образом, чтобы правильно сформулировать граничные условия задачи теплопроводности между покрытиями 1 и 2, т. е. на оси x, необходимо сначала решить задачу теплопроводности для неоднородного по теплофизическим свойствам слоя толщиной δ с распределенным в нем источником теплоты.

Рассмотрим одномерное уравнение теплопроводности

$$\left[\lambda(y) T'(y)\right]' = -f(y), \tag{3}$$

где $\lambda(y)$, $T'(y)$ — теплопроводность и температура третьего тела; $f(y)$ — источники теплоты, распределенные в третьем теле.

Поставим на границах третьего тела следующие условия:

$$T = T_2, \ \ \lambda(0)T' = \lambda_2 T_2' \quad \text{при} \quad y = 0; \tag{4}$$

$$T = T_1, \ \ \lambda(\delta)T' = \lambda_1 T_2' \quad \text{при} \quad y = \delta, \tag{5}$$

где T_1 и T_2 — температура в покрытиях 1 и 2; λ_1, λ_2 — теплопроводность материалов покрытий 1 и 2.

Условия (4) и (5) — это обычные условия равенства температур и потоков теплоты между разнородными контактирующими телами. Вследствие непрерывного перехода теплофизических свойств третьего тела к теплофизическим свойствам покрытий 1 и 2 на границах $y = \delta$ и $y = 0$ имеем $\lambda(0) = \lambda_2$, $\lambda(\delta) = \lambda_1$. Отметим, что

$$\int_0^t f(\xi)\, d\xi = Q, \tag{6}$$

где Q определяют по формуле (2).

После интегрирования уравнения (3) и с учетом выражений (4), (5) условие неидеального контакта [4] имеет вид

$$\lambda_2 T_2' - \lambda_1 T_1' = Q. \tag{7}$$

Приступим теперь к решению задачи теплопроводности для тел с покрытиями. При $y = 0$ будем ставить условия (7). Будем считать, что температура тел T_0 постоянна и равна температуре окружающей среды, поэтому ее можно принять за начало отсчета температур, т. е $T_0 = 0$; следовательно, $T_1 = 0$ при $y = h_1$ и $T_2 = 0$ при $y = -h_2$. Тогда из уравнений теплопроводности для покрытий

$$T_1'' = 0; \ \ T_2'' = 0.$$

Найдем выражения для температур в покрытиях:

$$T_1 = T^*\left(1 - \frac{y}{h_1}\right); \quad T_2 = T^*\left(1 + \frac{y}{h_2}\right). \tag{8}$$

С помощью (8) удовлетворим первому уравнению (7) при $y = 0$. В результате для контактной температуры T^* получим выражение

$$T^* = \frac{h_1 h_2 v \tau_* \left[1 - \exp\left(-\frac{k_1 q}{\tau_*}\right)\right]}{\lambda_2 h_1 + \lambda_1 h_2 - h_1 h_2 v (\beta_1 + \beta_2) \tau_* \left[1 - \exp\left(-\frac{k_2 q}{\tau_*}\right)\right]}.$$

Очевидно, следует потребовать, чтобы в любой момент времени t выполнялось условие

$$S = \lambda_2 h_1 + \lambda_1 h_2 - h_1 h_2 (\beta_1 + \beta_2) v \tau_* \left[1 - \exp\left(-\frac{k_2 q}{\tau_*}\right)\right] > 0, \tag{9}$$

которое необходимо для осуществления режима квазистационарной теплопроводности. Данное условие накладывает ограничение на скорость v или контактное давление $q(t)$. Также при определенных значениях параметров, входящих в выражение (9), может оказаться, что в какой-то момент времени $S = 0$, а контактная температура T^* станет бесконечной. Такое явление называют тепловым взрывом [8]. При $k_2 = 0$ это условие выполняется автоматически.

Необходимо также потребовать, чтобы значение T^* при любых t не достигало температур плавления T_1^m и T_2^m материалов соответствующих покрытий. Это при условии, что $q(t) \le q^* < \infty$ накладывает ограничение на скорость v, т. е. из равенства $T^* = \min T_i^m$ $(i = 1, 2)$ может быть найдена критическая скорость v_*, превышение которой приведет в какой-то момент времени к подплавлению одного из покрытий.

В рассматриваемом случае

$$v_* = \frac{T^* (\lambda_2 h_1 + \lambda_1 h_2)}{h_1 h_2 \tau_* \left(T^* (\beta_1 + \beta_2) \left[1 - \exp\left(-\frac{k_2 q}{\tau_*}\right)\right] + \left[1 - \exp\left(-\frac{k_1 q}{\tau_*}\right)\right]\right)}.$$

Выводы. В предложенной постановке задачи о взаимодействии тел с покрытиями при износе, тепловыделении и учете зависимости коэффициента трения от температуры найдено аналитическое выражение для контактной температуры в виде простой формулы, которая может быть использована при инженерных расчетах, а также получено выражение для критической скорости, превышение которой приведет к подплавлению одного из покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А л е к с а н д р о в В. М., Г у б а р е в а Е. А. Задача о взаимодействии тел с покрытиями при износе, тепловыделении и учете зависимости коэффициента трения от температуры // Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2006. – № 2. – С. 10–15.

2. А л е к с а н д р о в В. М. О термосиловом взаимодействии деформируемых покрытий тел с учетом износа // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 5. – С. 70–75.

3. А л е к с а н д р о в В. М. Абразивный износ тонкого мягкого покрытия при нелинейном законе трения с учетом тепловыделения // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. регион. Техн. науки. – 2001. Спец. выпуск. – С. 11–13.

4. А л е к с а н д р о в В. М. Контактная задача для тел с покрытиями с учетом нелинейного трения, износа и тепловыделения от трения // Изв. РАН. МТТ. – 2003. – № 4. – С. 128–135.

5. Ч е р е п а н о в Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

6. Х р у щ о в М. М., Б а б и ч е в М. А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с.

7. К р а г е л ь с к и й И. В., Д о б ы ч и н М. Н., К о м б а л ов В. С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 528 с.

8. П о д с т р и г а ч Я. С. Температурное поле в системе твердых тел, сопряженных с помощью тонкого промежуточного слоя // Инж.-физ. журн. – 1963. – Т. 6, № 10. – С. 129–136.

Статья поступила в редакцию 03.07.2012.

.