

## К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ МАШИН

Захаров Н.В., проф., Ячменев В.А., доц., Мальярчук С.А.\*  
 (\* СНТЦ - Сумский научно-технический центр)

Широкое использование в практике конструирования различных машин и механизмов элементов из неметаллических материалов (пластмасс) требует внесения определенных коррективов в существующие методы расчета деталей из металлов и их сплавов. Главное отличие состоит в более значительной зависимости физических свойств пластмасс от температуры, предельное значение которой часто не должно превышать 200-250°C [1]. Поэтому особое значение на этапе конструирования приобретает достоверность расчетного определения рабочей температуры материала деталей из пластмасс для теплонагруженных узлов машин. При этом ошибка в несколько десятков градусов может повлечь за собой выход из строя элементов узлов.

Вопросам разработки методов расчета полей температур различных нагруженных узлов машин в специальной литературе уделено определенное внимание. Однако в большинстве случаев авторами совершенно не рассматривается термическое контактное сопротивление, возникающее на границе раздела сопрягаемых элементов сборочной единицы. Следует сказать, что этот вопрос изучался во многих работах и к настоящему времени накоплен обширный экспериментально-теоретический материал по контактному термическому сопротивлению. Достаточно упомянуть работы Г.Карслоу и Д.Егер, монографию Ю.П.Шлыкова, работы В.С.Миллера, В.М.Попова [2] и В.Н.Карпожицкого [3]. Но узкая направленность многих из них, отвечающая запросам отдельных отраслей промышленности, некоторые допущения, принимаемые в расчетах, и появление новых перспективных неметаллических материалов вынуждают в ряде случаев снова обратиться к этому вопросу. В частности, широкое использование в узлах уплотнения штоков поршневых компрессоров высокого давления, испытывающих тепловую нагрузку порядка 500-700 кВт/м<sup>2</sup>, элементов из таких современных материалов, как флулон, графелон и др., требует выполнения уточненных тепловых расчетов, которые невозможны без учета термических контактных сопротивлений.

В общем случае контакт двух деталей может осуществляться по точке, линии или поверхности [4]. В предлагаемой статье описывается способ расчета термического контактного сопротивления для случая так называемых плоских контактных элементов, характерных для поверхностей, имеющих регулярные следы обработки (точение, фрезерование, шлифование). По причине наличия шероховатости находящиеся в контакте поверхности (рис. 1) остаются разделенными. Пространство между поверхностями обычно заполнено газом или жидкостью. Если находящаяся в промежутке среда имеет более низкую теплопроводность, чем материал поверхности, возникает контактное термическое сопротивление.

На рис. 1 также показано температурное распределение и большой градиент температуры в маленьком зазоре,

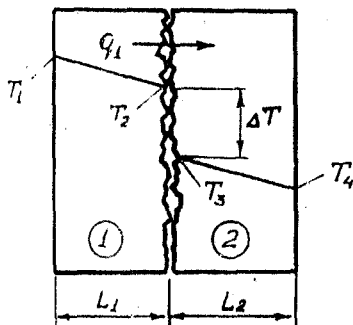


Рис. 1. Контакт двух тел

разделяющем два граничных тела, возникающий при контактном сопротивлении. Ниже перечислены факторы, от которых зависит контактное сопротивление [5]:

- 1) давление, с которым поверхности прижимаются друг к другу;
- 2) теплопроводность среды в зазоре;
- 3) шероховатость поверхности;
- 4) твердость элементов шероховатости на поверхности, которая определяет деформации, возникающие под действием приложенного давления;

5) средняя температура у границы раздела тел.

Таким образом, физическая картина ясна, и разработка общего подхода, удобного для инженерных расчетов, требует значительных усилий.

Для описания термических условий на границе раздела необходимо знать  $u$  - термическую проводимость контакта, которая определяется из соотношения [5]:

$$q_1 = u \Delta T. \quad (1)$$

Основная идея решения заключается в замене зазора между двумя поверхностями тонкой пластиной, имеющей термическое сопротивление, равное контактному сопротивлению зазора. Толщина пластины  $\delta$  должна быть равна величине среднего зазора между шероховатыми поверхностями тел (рис. 2). При таком условии очевидно, что термическое сопротивление между поверхностью тела 1 и пластиной (а также поверхностью тела 2 и пластиной) будет равно нулю, т.е. будет отсутствовать градиент температуры.

Термическая проводимость пластины  $\lambda/\delta$  определяется из выражения

$$q_2 = \frac{\lambda}{\delta} \Delta T. \quad (2)$$

При равенстве тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$  и градиента температуры  $\Delta T$  термическая проводимость пластины будет равна термической проводимости контакта:

$$\frac{\lambda}{\delta} = u. \quad (3)$$

Для случая плоской стенки (рис. 2) тепловой поток, как известно, может быть рассчитан по следующей формуле:

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\left(\frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{L_2}{\lambda_2}\right)}, \quad (4)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  - коэффициенты теплопроводности тел 1, 2.

Решая (4) относительно  $\lambda/\delta$  и учитывая соотношение (3), получим выражение для определения величины термической контактной проводимости

$$u = \frac{T_1 - T_4}{q} - \left(\frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2}\right). \quad (5)$$

Неизвестными в выражении (5) являются температуры наружных поверхностей плоской стенки  $T_1, T_4$ , одинаковые для обоих случаев, которые можно определить, построив поле температур для случая, изображенного на рис 1.

Прежде чем приступить к решению поставленной задачи, необходимо принять физическую модель шероховатостей зоны контакта двух тел. Очевидно, что под действием давления происходит сближение поверхностей контакта, определяемое величиной деформации выступов шероховатостей. Форма и размеры выступов и впадин рельефа шероховатой поверхности обусловлены, прежде всего, видом обработки, а при наличии трения в зоне контакта - режимом трения [1].

В качестве одной из возможных моделей контакта примем следующую: шероховатость будем рассматривать как совокупность равномерно

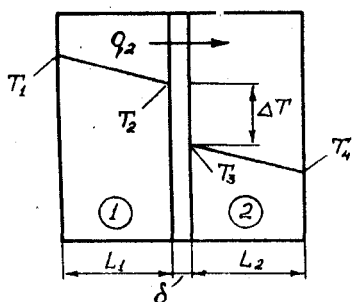


Рис. 2. Замена зазора тонкой пластиной равного термического сопротивления

распределенных по линии контакта одинаковых прямоугольных щелей шириной, равной среднему зазору между поверхностями контакта, рис. 3. Считаем, что в щелях находится та же среда, что и между телами. Коэффициент теплопроводности среды  $\lambda_c$ . Следует отметить, что  $L_1$  и  $L_2$  следует взять достаточно большими, чтобы на расстоянии  $L_1$  и  $L_2$  от контакта в поле температур не наблюдались возмущения, вносимые наличием щелей.

Очевидно, что отношение суммарной длины щелей  $\Sigma l$  к длине линии контакта  $A$  равно отношению площади фактического контакта  $F_\phi$  к площади геометрического контакта  $F_g$ :

$$\frac{\Sigma l}{A} = F_\phi / F_g \quad (6)$$

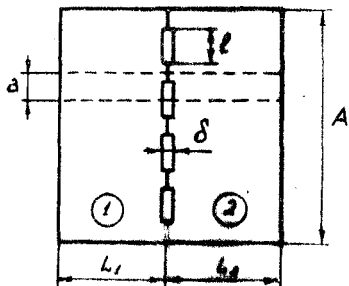


Рис. 3. Модель контакта

В специальной литературе можно найти различные методики расчета отношения  $F_\phi / F_g$  и величины среднего зазора  $\delta$ . В этой статье мы не будем на них останавливаться, достаточно сослаться на [1, 2, 3]. Важным в данном случае является то, что, зная отношение  $F_\phi / F_g$ , всегда можно найти суммарную длину щелей для принятой модели контакта.

Равномерное распределение щелей одного размера позволяет не рассматривать всю линию контакта, а ограничиться решением задачи только для выделенного элемента  $a$  (рис. 3). Нужно только учесть, что

отношения  $a/L_1$  и  $a/L_2$  должны быть достаточно малыми. В этом случае, как указывалось выше, возмущения температурного поля вблизи щели не окажут влияния на характер его распределения у наружных поверхностей тел.

Таким образом, одним из численных методов нужно решить двумерную стационарную задачу теплопроводности для плоской стенки (рис. 4), которая, как известно, сводится к решению уравнения Лапласа в декартовой системе координат.

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

Для удобства примем  $q = 1$ ,  $L_1 = L_2 = 1$ ,  $T_4 = 0$ ,  $a = 0, 2$ ;  $L = 0, 2$ .

Длина щели  $l/2 = a(1 - F_\phi / F_g) = 0, 2(1 - F_\phi / F_g)$ . Тогда граничные условия

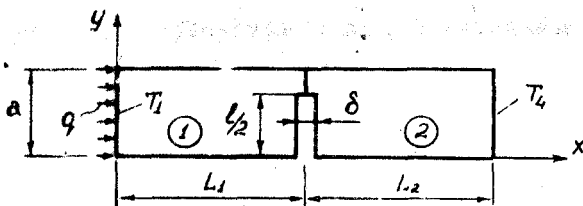


Рис. 4. Физическая модель задачи

для наружных поверхностей задачи (рис. 4) запишем так:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T(0, y)}{\partial x} &= \frac{q}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda_1} \\ T(2, y) &= T_4 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T(x, 0)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial T(x, a)}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

из условия симметрии теплового потока.

Граничные условия на линии контакта следует рассматривать для двух случаев - в щели и вне щели. В обоих случаях весь тепловой поток  $q$  полностью передается через границу слева направо.

Граничные условия на линии контакта вне щели

$$\lambda_1 \left| \frac{\partial T(1, y)}{\partial x} \right|_{\text{лев}} = \lambda_2 \left| \frac{\partial T(1, y)}{\partial x} \right|_{\text{прав}} \quad (9)$$

для  $l/2 \leq y \leq a$ .

Граничные условия в зоне щели

$$\lambda_1 \left| \frac{\partial T(1, y)}{\partial x} \right|_{\text{лев}} = k \Delta T = \lambda_2 \left| \frac{\partial T(1, y)}{\partial x} \right|_{\text{прав}} \quad (10)$$

для  $0 \leq y \leq l/2$ , где  $k$  - коэффициент, определяемый зависимостью

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (11)$$

В (11)  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи от стенки к среде (от среды к стенке) первого и второго тел, вычисляемые с помощью критериальных уравнений, которые всегда можно найти в специальной литературе по теплопередаче, например, [5].

Численное решение дифференциального уравнения (7) позволяет получить поле температур в телах 1, 2 и температуру стенки  $T_1 = T(0, y)$ . Теперь для вычисления термической проводимости шероховатой контактной поверхности достаточно значение  $T_1$  подставить в (5). С учетом ранее принятых допущений ( $q = 1, L_1 = L_2 = 1, T_4 = 0$ ) выражение (5) примет вид

$$u = T_1 - \left( \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right). \quad (12)$$

Рассмотренный подход к определению контактного термического сопротивления обладает известной универсальностью и позволяет определить контактное сопротивление в широком диапазоне изменения  $F_\phi/F_s$ , от  $F_\phi/F_s = 1$  (контактного сопротивления равно нулю) до  $F_\phi/F_s = 0$  (непосредственный контакт поверхностей отсутствует).

Расчеты, проведенные для ряда материалов при различных давлениях сжатия и различной шероховатости поверхности, показали, что термическая контактная проводимость может изменяться в достаточно широких пределах, от 400 до 60000 Вт/м К и более. Полученные расчетные значения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в [2, 3]. Следует отметить, что предлагаемый расчет термической контактной проводимости не учитывает лучистый теплообмен между шероховатыми поверхностями, возникающий при достаточно большом градиенте температуры  $\Delta T$  и температуре в зоне контакта порядка 420 - 480°C [2].

## SUMMARY

*The article deals with a way of calculation thermal contact resistance on the boundary line of conjugated parts of the construction. It is assumed that physico-mechanical properties of the parts differ substantially.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков И.И., Захаренко В.П., Ландо В.С. Бесшмазочные поршневые уплотнения в компрессорах. - Л.: Машиностроение, 1981.
2. Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. - М.: Энергия, 1971.
3. Карножицкий В.Н. Контактный теплообмен в процессах литья. - Киев.: Наукова думка, 1978.
4. Захаров Н.В., Соболев С.Ф. Конструкторско-технологическая классификация сборочных единиц //Тезисы докладов научно-технической конференции "Автоматизированное проектирование в машиностроении". - Устинов, 1985.
5. Справочник по теплообменникам. В 2-х томах, т.1/Перевод с английского; Под редакцией члена - корреспондента АН СССР В.С. Петухова и канд.тех.наук В.К. Шикова. - М.: Энергоатомиздат, 1987.

Поступила в редколлегию 21 февраля 1994 г.