**ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ТРЕНИИ.**

**Основные тепловые показатели и их расчет.**

Энергия, необходимая для относительного перемещения трущихся тел, расходуется на разрушение адгезионных связей и деформацию материала контактирующих неровностей и прилегающих поверхностей.

Основная доля энергии (≈ 90%), поглощаемая трущимися телами, трансформируется в тепловую, остальная – на искажение кристаллической решетки, звуковые эффекты, образование новых поверхностей.

Тепловыделения при трении происходят на незначительной площади, а время существования единичных пятен контакта измеряется миллисекундами.

Интенсивность тепловыделения зависит от работы трения и размеров площадки, на которой она совершается.

Работа, производимая внешней силой против сил трения, превращается в тепло и идет на нагревание трущихся тел.

Силовое взаимодействие реализуется на пятнах фактического контакта, здесь и происходит выделение тепла. Таким образом, поверхность трущегося тела покрыта тепловыми источниками (пятнами контакта), которые перемещаются по обеим поверхностям, если они шероховаты, или по гладкой поверхности, если по ней скользит шероховатое тело.

Генерируемое на пятнах контакта тепло распространяется от них вглубь обоих контактирующих тел. Количество теплоты, переносимой в единицу времени, называют *тепловым потоком*. Тепловые потоки распределяются в зависимости от теплофизических свойств контактирующих тел, их размеров и условий теплоотвода.

Совокупность точек в объеме каждого из трущихся тел, имеющих в определенный момент одинаковую температуру, называют *изотермической поверхностью*. Каждая изотермическая поверхность отделяет нагретую поверхность от менее нагретой (рис. штриховые линии).

*n1*

*n′1*

*n2*

*n′2*

*n′3*

*n3*

Рис. Распределение тепловых потоков в трущихся телах

Изотермические поверхности не пересекаются. Тепловой поток вдоль такой поверхности невозможен. Передача тепла осуществляется по нормали к изотермической поверхности от более нагретых областей к менее нагретым. При удалении от источника тепла температура трущихся тел убывает.

Совокупность мгновенных значений температуры во всех точках рассматриваемого тела называют *температурным полем*.

Если температура не является функцией времени, т.е. температура в выбранной точке не изменяется с течением времени, то такое поле называется *стационарным*. В противном случае температурное поле *нестационарное*.

Вдоль различных координат температура изменяется неодинаково. Наибольшее ее изменение наблюдается вдоль нормали к изотермическим поверхностям и характеризуется градиентом температуры

 .

Соотношение  является необходимым условием распространения тепла внутри тела.

**Температура на поверхности контакта**

При оценке тепловых процессов в зоне контакта трущихся тел следует различать: среднюю объемную температуру тел, среднюю поверхностную температуру, температуру вспышки на единичном пятне контакта и максимальную температуру на поверхности трения.

*Средняя объемная температура* (*Т*об) – это среднее значение температуры в рассматриваемом объеме одного из элементов пары трения.

*Средняя поверхностная температура* (*Т*п) – среднее значение температуры в тончайшем поверхностном слое.

*Температурная вспышка* (*Т*всп) возникает на единичных пятнах фактического контакта, может достигать температуры плавления одного из трущихся тел. Время существования вспышки составляет 10-3–10-8 с и определяется размерами пятен контакта и скоростью относительного перемещения трущихся тел.

*Максимальная температура* на поверхности трения рассматривается как сумма объемной, поверхностной температуры и температуры вспышки:

 .

**Расчет температур на скользящем контакте**

*Аналитическое определение средней поверхностной температуры* основано на применении закона Фурье. Для стационарного режима трения, при условии, что количество теплоты, поглощаемой единицей объема контактирующей поверхности равно количеству теплоты, им излучаемой, расчетная формула имеет вид

 ,

где ; σ′1, 2 – коэффициенты теплоотдачи первого и второго тела соответственно, *u* – параметр теплоотдающей поверхности, λ1, 2 – коэффициенты теплопроводности первого и второго тела соответственно *Aа* – номинальная площадь поверхности трения.

*Аналитические методы расчета температуры вспышки (Х. Блок).*

Фрикционный контакт представляет собой совокупность импульсно нагреваемых и охлаждаемых микроскопических пятен, перемещающихся по поверхностям трущихся тел. Координаты, размеры и время появления температурных вспышек носят случайный характер, что затрудняет их экспериментальную оценку. Поэтому для определения температуры пятен контакта используют в основном расчетные методы.

Для упрощения расчетов принимают следующие допущения:

– размеры пятна контакта малы по сравнению с размерами трущихся тел;

– теплоемкость каждого из трущихся тел неограниченно велика;

– отсутствует теплоотдача в окружающую среду;

– интенсивность тепловыделения не зависит от времени, а тепло распределяется по поверхности пятна контакта по тому же закону, что и давление;

– распределение давления на пятне и коэффициент трения известны.

– тепловой источник движется по гладкому полупространству, а для шероховатого движущегося тела он неподвижен;

– в полупространство направлен удельный тепловой поток *q*2, а в скользящий выступ шероховатого тела – *q*1.

С учетом перечисленных допущений получены формулы для расчета температуры вспышки при различных условиях контактирования.

1. Выступ, приведенный в контакт с плоской поверхностью полупространства, неподвижен относительно него. Пятно контакта имеет круглую форму с равномерным распределением *q* по поверхности (цилиндр по плоскости). Формула для расчета имеет вид

 , (4)

где  – удельная интенсивность тепловыделения с единичного пятна контакта,  – площадь единичного пятна контакта; *r* – радиус единичного пятна контакта, *f* – коэффициент трения, *Fn* – нормальная нагрузка, *v* – скорость скольжения.

2. Условия контактирования соответствуют первому случаю, только распределение интенсивности тепловыделения по поверхности единичного пятна принимается параболическим (трение верчения сферы по плоскости). В этом случае удельная интенсивность тепловыделения с пятна контакта определяется соотношением

 ,

где *q*0 – интенсивность тепловыделений в центре пятна, *y* – расстояние от центра пятна до рассматриваемой точки.

В центре пятна температура вспышки достигает наибольшего значения и определяется по формуле

 . (5)

3. Выступ, образующий с полупространством пятно контакта круглой формы, скользит по его поверхности с малой скоростью

 ,

где a – коэффициент температуропроводности.

Расчет температуры вспышки можно проводить по формулам (4) и (5) как для неподвижного источника.

4. Выступ (тело 1), образующий с полупространством (тело 2) пятно контакта круглой формы, скользит по его поверхности с большой скоростью, удовлетворяющей условию

 .

Температура вспышки на поверхности трения выступа в центре контакта равна

 ,

а температура вспышки на поверхности полупространства в центре контакта

 ,

где  – параметр, зависящий от скорости скольжения и размеров источника тепла, ρ1 – плотность вещества тела, *c*1 – теплоемкость вещества тела.

Максимальное повышение температуры в контакте определяют как среднее значение *T*всп1 и *T*всп2

 . (6)

5. Тепловой источник круговой формы скользит по поверхности полупространства, тепло распространяется только в теле 2. Предполагается, что теплопроводность одного тела несоизмеримо мала по сравнению с другим.

При равномерном распределении удельного теплового потока *q* по поверхности пятна и малой скорости скольжения источника тепла температура вспышки равна

 , (7)

а при высокой скорости скольжения максимальное значение температуры вспышки, достигаемое на границе контактной площадки равно

 . (8)

Для движущегося по поверхности полупространства источника тепла квадратной формы с равномерно распределенной удельной интенсивностью теплового потока, температура вспышки рассчитывается по тем же формулам с заменой радиуса контакта на полуширину контактной площадки, равной половине длины стороны квадрата.

Анализируя приведенные формулы, можно сказать, что температура вспышки растет с увеличением нормальной нагрузки, коэффициента трения, скорости скольжения и уменьшением теплопроводности контактирующих тел.

Формулы Х. Блока справедливы для контакта трущихся тел, в котором пятна контакта удалены друг от друга так, что тепловое излучение одного источника не оказывает влияния на другой, т.е. тепловые источники считаются изолированными друг от друга. Для большинства реальных узлов трения это допущение справедливо, т.к. расстояние между контактирующими выступами многократно превышает размеры пятен контакта. Однако в тяжелонагруженных узлах, когда неровности поверхностей трущихся тел испытывают высокие давления и пластически деформируются, действительные значения температуры будут выше рассчитанных по приведенным формулам.

Полученные Х. Блоком решения позволяют оценивать температуру на поверхности трения. Задачу распределения температуры по глубине трущихся тел рассматривал Д. Егер. В реальных парах трения форма источников тепла в основном соответствует эллипсу, большая ось которого параллельна вектору скорости.

Д. Кюльманн-Вильсдорф получил уравнения для расчета температур вспышки на пятнах контакта эллиптической формы. Уравнения выведены на основе теории Х. Блока и Д. Егера при условии, что источники тепла расположены на границе раздела фрикционно взаимодействующих тел. Расчетные формулы усложняются и включают в себя функциональные зависимости температуры от скорости и эллиптичности пятна.

Доказано, что при малых скоростях скольжения температура вспышки достигает наибольшего значения при слабо вытянутой в направлении скольжения форме пятна. Для больших скоростей скольжения – для пятен, вытянутых в направлении скольжения с коэффициентом эллиптичности в диапазоне 4–10. Максимальная температура для сильно вытянутых вдоль направления скольжения пятен (коэффициент эллиптичности >10) или вытянутых в перпендикулярном к скорости скольжения направлении, ниже, чем у пятен круговой формы.

**Факторы, влияющие на температуру пятен контакта**

При фиксированных значениях давления и скорости единичные пятна контакта, имеющие *б****о****льшую площадь*, нагреваются до более высоких температур.

Чем *больше длина контакта* в направлении скольжения, тем выше температура вспышки, что объясняется увеличением времени нахождения материала под нагрузкой (т.е. время генерирования тепловой энергии).

*Увеличение скорости скольжения* сопровождается ростом максимальной температуры пятен контакта. *В области малых скоростей* скольжения зависимость более существенна, а по мере приближения к температуре плавления одного из элементов пары трения повышение скорости скольжения не вызывает значительного изменения температуры пятен контакта (из-за роста рассеяния тепла в окружающую среду и снижения сопротивления материала нагретых неровностей сдвигу).

*Увеличение нормальной нагрузки* приводит к росту температуры, причем в области малых нагрузок зависимость более существенна. По мере приближения температуры к температуре плавления одного из тел, зависимость ослабевает. Рост температуры при повышении нагрузки обусловлен повышением доли пластической деформации контактирующих тел.

Уровень температуры пятен контакта *зависит от теплофизических и механических характеристик* трущихся тел. При увеличении коэффициента теплопроводности и твердости сопрягаемых тел температура пятен контакта уменьшается.

**Сварка металлов трением**

Явление возникновения высоких температур в зоне трения при тяжелых режимах нагружения является причиной сварки трущихся металлов.

Чаще всего сварка имеет место в тормозах, муфтах сцепления, зубчатых передачах, системе резец – стружка обрабатываемой детали. Выделяемое при трении тепло и пластическая деформация поверхностных слоев сопрягаемых тел приводят к разрушению и удалению пленок и загрязнений из зоны контакта. Обнаженные участки поверхности трения образуют мостики сварки, не имеющие пор, раковин, включений, пленок оксидов и других дефектов.

Благодаря этому металл мостиков сварки отличается высокой прочностью и пластичностью. Прочность образующихся соединений определяется не только свойствами металлов трущихся тел и состоянием их поверхностей, но и режимами нагружения (скорость, давление, площадь контакта) и условиями теплоотвода. Это явление может быть использовано для сварки металлов трением.

**Методы измерения температуры в зоне контакта.**

Экспериментальные исследования тепловых процессов в зоне фрикционного контакта сопряжены с рядом трудностей, которые не позволяют разработать универсальный метод, обеспечивающий высокую точность измерения температуры.

Все существующие методы измерения температуры в зоне контакта можно разделить на две группы: *косвенные и прямые*.

*Косвенные методы* позволяют получить приближенные данные о температуре в зоне трения. Данная группа методов имеет ряд недостатков: низкая точность измерения; некоторые методы требуют введения в зону трения веществ, которые оказывают влияние на сам процесс трения; ограничение по диапазону температур.

– *метод цветных термоиндикаторов*: наносят вещество чувствительное к изменению температуры и по цвету судят о ее величине;

– *метод цвета побежалости*: по цвету излучающей тепло поверхности судят о ее температуре (среднее значение);

– *метод легкоплавких вставок*: температуру определяют по температуре плавления вставки;

– *метод структурных изменений*: зная температуру превращений материалов (фазового состояния) фиксируют структуру поверхности (только для температур, выше температур фазовых переходов);

– *термоэмиссионный метод*: с увеличением температуры увеличивается эмиссия электронов, по плотности потока судят о величине температуры.

В большинстве случаев *применение прямых методов* сопряжено с необходимостью вводить в объем одного из трущихся тел преобразователей тепловой энергии в электрический сигнал, либо использовать в качестве таких преобразователей элементы пары трения.

– *метод естественной термопары*: в качестве термоэлектродов служат тела трения, создающие термо-ЭДС при нагреве. Недостаток: используется только для металлов и сплавов, низкая точность измерений.

– *метод искусственной термопары*: очень мелкие термопары устанавливают в объеме трущихся тел в предповерхностных слоях. Недостатки: измерение температуры на удалении от поверхности, оказывают влияние токи наводки и индукции.

– *метод скользящей термопары*: один электрод вводится в материал одного тела, роль другого электрода выполняет второе тело, при скольжении возникает разность потенциалов, увеличивающаяся со скоростью. Недостатки: трудность градуировки.

– *метод термосопротивления*: измеряется электрическое сопротивление выбранного участка.

– *пирометрический метод*: основаны на измерении спектра излучения нагретых тел.

– *приемники инфракрасного излучения*.

*– термографические методы* (метод фото- и киносъемки, оптико-электронные преобразователи сканирующего типа).