**ПЛОЩАДИ КОНТАКТА И ПЯТНА КОНТАКТА**

**Площади контакта и давления на контакте**

Взаимный контакт деталей происходит по вершинам и выступам шероховатости, которая деформируется под действием внешней нагрузки.

Контактирование *реальных тел* будет осуществляться в отдельных зонах, т.е. контакт будет *дискретным* (рис. ). Для характеристики процесса контактирования твердых тел вводят понятия площадей поверхности контакта.

*Fn*

*b*

*a*

*A*

*Ak*

Рис. Схема контакта поверхностей тел. *Fn* – внешняя нагрузка, *A* – общая площадь поверхности, *Ak* – площадь поверхности контакта.

При этом различают: номинальную площадь контакта *Aa*; контурную площадь контакта *Ak*; фактическую площадь контакта *Ar* (рис.).

*Aa*

*Ak*

*ΔAr*

Рис. Структурные компоненты реального контакта шероховатых поверхностей:

*Αа* – номинальная площадь контакта; *Αк* – контурная площадка;

Δ*Αr* – фактическая площадь единичного пятна контакта.

Под *номинальной площадью контакта* *Aa* (НПК) понимают такую площадь, по которой *соприкасались бы* тела, если бы их поверхности имели идеально гладкую геометрическую форму.

Номинальная площадь контакта совпадает со всей площадью контактирующей поверхности детали. Например, если контактируют два тела с различными типами поверхностей: волнистой и абсолютно плоской, то для первого тела номинальная площадь касания равна площади волнистой поверхности, для второго – площади прямоугольника.

При контакте плоских тел НПК определяется их геометрическими размерами. При контакте тел с криволинейными поверхностями НПК зависит не только от размеров, но и от приложенной нагрузки и механических свойств этих тел, т.е. от факторов, определяющих их деформацию.

Номинальная площадь контакта определяется выражением

 ,

а номинальное давление

 .

При наличии волнистости, контактирование тел осуществляется по самым высоким неровностям (вершинам волн, пикам шероховатости). Под воздействием силовых факторов (нагрузка, вес) происходит деформирование элементов волнистости. Деформация элементов волнистости будет определять размеры площадок контакта.

*Контурная площадь контакта Ак* (КПК) – суммарная площадь пятен касания, обусловленная деформацией вершин волн. Контурные площадки удалены друг от друга на расстояние шага волны.

Контурная площадь контакта составляет 5–15 % от Аа, а контурное давление

 

Контурная площадь контакта определяется волнистостью поверхностей, нагрузкой и механическими свойствами контактирующих тел.

С увеличением нагрузки поверхности тел сближаются, происходит внедрение выступов более твердого тела в материал более мягкого. При этом наблюдается как упругая, так и пластическая деформация контактирующих выступов, в контакт вступают новые микронеровности. Образуется множество расположенных на различных уровнях площадок контакта с размером 3–50 мкм. Именно на этих площадках осуществляется *реальный (фактический) контакт*.

*Фактическая площадь контакта Аr* (ФПК) – суммарная площадь, на которой происходит контакт микронеровностей, образующих шероховатость поверхностей. Фактическая площадь контакта обычно мала и составляет в ненагруженном состоянии 0,01…0,1 % от *Аа*, при высоких нагрузках 1–10% от *Аа*.

После снятия нагрузки 30–70% ФПК исчезает вследствие упругого восстановления материала.

Суммарная площадь фактического контакта равна

 ,

а фактическое давление

 .

Контакт может быть *ненасыщенным* – число контактирующих микронеровностей *nr* меньше числа микронеровностей *nс*, расположенных на контурной площадке; и *насыщенным* – *nr* = *nс*.

Фактическая площадь контакта *Аr* меняется после первой и последующей нагрузки:

– фактический контакт *увеличивается* при увеличении нагрузки, уменьшении шероховатости (*Rа*), росте радиуса закруглений выступов *r* и с увеличением времени действия нагрузки.

– фактический контакт *уменьшается* с увеличением предела текучести материала контактирующих тел, с увеличением упругих характеристик, увеличением высоты неровности (шероховатости).

При сопряжении тел из разнородных материалов ФПК определяется физико-механическими свойствами более мягко материала и геометрией более твердого.

Площадь фактического контакта играет исключительную роль во всех физических и химических процессах, которые могут протекать на границе раздела деталей.

**Расчет фактической площади контакта и деформации**

Выступы контактирующих поверхностей под действием нагрузки деформируются упруго и пластически. При малых нагрузках имеет место упругая деформация (после снятия нагрузки форма профиля восстанавливается), а с ростом нагрузки развивается пластическая деформация.

При разработке физической модели для расчета площади фактического контакта тел учитываются следующие экспериментальные факты:

– контакт шероховатых поверхностей имеет дискретный характер, при этом отдельные неровности по форме близки к сферическим сегментам;

– элементарные пятна фактического контакта возникают в результате как упругих, так и пластических деформаций;

– фактическая площадь касания пропорциональна приложенной нагрузке, с ростом которой увеличение площади происходит в основном за счет возникновения новых пятен контакта при сохранении среднего размера пятна в пределах 10–20 мкм.

При контактных давлениях, не превышающих предела текучести материала σт, напряженно-деформированное состояние тела определяется из решения задачи Герца о контакте упругой сферы с упругим полупространством.

В пластическое состояние материал переходит при средних нормальных давлениях на контакте в соответствии с зависимостью

 ,

где σт – предел текучести материала при одноосном напряженном состоянии, *c* – коэффициент, учитывающий влияние формы тела (для сферы по результатам экспериментально-теоретических исследований).

Тогда материал перейдет в пластическое состояние при

 ,

где *HB* – твердость материала по Бринеллю.

Рассчитаем *упругую деформацию двух приведенных в контакт сфер* радиусами *R*1 и *R*2 (рис. ) применяя формулу Герца:

 ,

 ,

где *Аri*– площадь контакта двух сфер, *Е*1, *Е*2, μ1, μ2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона тел, *Fn* – нормальная нагрузка, *a*i – сближение тел, вызванное их деформацией.

*ai*

*R2*

*Fn*

*R1*

Рис. Контакт двух сфер

При упругом контакте отдельной сферической неровности радиусом *R* с плоской поверхностью приведенные формулы преобразуются к виду

 ,

 .

При *пластической деформации сферы или внедрении ее в пластическое полупространство* площадь и деформацию приближенно можно оценить по выражениям, полученным в предположении, что среднее нормальное давление на контакте равно твердости более мягкого материала:

 , .

Если радиусы неровности поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях неодинаковы, то в расчетах можно использовать эквивалентный радиус .

При контакте *шероховатой поверхности 1 с гладкой плоскостью* *2* (рис) площадь фактического контакта равна сумме площадок контактов, образованных в результате деформирования отдельных выступов:

 ,

где *n* – число контактирующих выступов.

*R*

*R*

*Fn*

*1*

*2*

Рис. Схема контакта идеально гладкой и шероховатой поверхностей

При расчетах ФПК шероховатую поверхность обычно моделируют набором сферических сегментов радиусом *R*, вершины которых соответствуют опорной кривой реальной поверхности (рис).

Для текущего уровня *p* относительная опорная длина профиля

 ,

где ηp – длина отрезков, *l* – длина контактов.

Для модели будет иметь место равенство (аналогично показанной формуле)

 ,

где *Аp* – площадь сечения шероховатого слоя на уровне *p*, т.е. относительная опорная длина профиля принимается равной относительной площади шероховатого слоя на некотором уровне, *Аk* – контурная площадь контакта.

Следовательно, площадь сечения

 ,

где *b* и *v* – параметры, зависящие от вида обработки поверхности (*b* = 1–10, *v*= 1,6–3); *a* – сближение тел, вызванное их деформацией, *Rmax* – максимальная высота неровностей.

Тогда фактическая площадь контакта

 ,

где α*y* – коэффициент, учитывающий упругую осадку выступов и их расплющивание. При упругом контакте α*y* = 0,5, а при пластическом α*y* ≈ 1 (см. рис.).

*Ari*

*Ari*

*Api*

*Api*

*Fn*

*Fn*

*а*

*б*

Рис. Контакт сферы с упругим (а) и пластическим (б) полупространством

Исходя из приведенных формул, сближение при упругом контакте (α*y* = 0,5) определяется по выражению

 .

Если деформация выступов пластическая, то фактическая площадь равна

 ,

а сближение при пластическом контакте

  или .

При расчете контакта двух шероховатых поверхностей вместо *b*, *v*, *Rmax* необходимо подставить их эквивалентные значения, учитывающие свойства двух тел:

 , , ,

где *K* – коэффициент, зависящий от *v*1 и *v*2.

**Методы измерения фактической площади контакта**

Методы оценки ФПК делят на три группы (по классификации В.А. Белого), основанные на:

– явлении массопереноса между приведенными в контакт телами;

– передаче и переносе энергии;

– деформации неровностей и сближении контактирующих тел.

Первая группа:

*Метод красок* – на поверхность одного из сопрягаемых тел наносят слой краски и приводят в контакт с другим телом. По размерам, форме и числу пятен после разъединения судят о ФПК. Основной недостаток – низкая точность измерения.

*Метод угольных пленок* – поверхность одного из сопрягаемых тел покрывают распылением в вакууме угольной пленкой (h = 0,3 мкм). Во время контакта пленка разрушается. Замеряют разрушенные участки. Метод дает завышенные значения.

*Метод радиоактивных изотопов* – слой радиоактивного вещества наносят на поверхность одного тела и приводят в контакт с другим. Радиоактивное вещество локализуется на вершинах вступающих в контакт неровностей. По интенсивности излучения и его распределению по поверхности судят о числе и размерах пятен контакта. В качестве радиоактивного вещества применяют, например, раствор хлористого цинка, содержащий изотоп Zn65. Основной недостаток – трудность тарировки и зависимость результатов измерений от времени экспозиции.

Для *этой группы характерна* низкая точность измерения, возможность для применения только для неподвижного контакта шероховатых тел, трудность получения тонкослойных покрытий одинаковой толщины.

Вторая группа:

*Метод измерения электропроводности контакта* – через два приведенных в контакт тела пропускают электрический ток. По величине тока и напряжения определяют электрическое сопротивление и фактическую площадь контакта. Недостатки: низкая точность и ограниченная область применения.

*Метод измерения теплопроводности контакта* – роль измерителя играет разность в теплопроводности зоны контакта с материалом тел.

*Акустический метод* – основан на явлении распространения упругих волн (ультразвуковых), в объеме твердого тела. Мерой ФПК является коэффициент отражения волн от границы раздела сопрягаемых тел (отношение отраженной энергии к энергии падающей волны). Недостатки – воздействие ультразвуковой волны может привести к изменению структуры контактирующих тел, рассеяние ультразвуковых колебаний на неровностях поверхности, зависимость результатов измерений от фрикционного нагрева сопрягаемых тел.

*Метод прозрачных моделей* – два прозрачных образца приводят в контакт и пропускают пучок параллельных лучей света. Измерение ФПК основано на прохождении и рассеивании пучков в телах и воздушном зазоре между ними. Дает завышенные значения для контакта гладких поверхностей.

*Метод Мехау* – основан на нарушении внутреннего отражения света на пятнах фактического контакта оптически прозрачного образца с непрозрачным. На участках фактического контакта свет рассеивается, что под микроскопом видно как темные пятна на зеркальном фоне. Метод обеспечивает получение надежных результатов измерения ФПК для шероховатых поверхностей, применим для статического и динамического контакта. Дает завышенные значения измерений для контакта гладких поверхностей.

Третья группа – включает расчетно-экспериментальные методы определения ФПК, основанные на результатах измерения сближения двух контактирующих тел и исходной шероховатости поверхностей. Данная группа методов измерения наименее распространена, так как необходимо производить различные типы измерений (сближение, профили шероховатости) и применять расчеты, что приводит к снижению точности определения ФПК.