**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

**Типы поверхностей контакта.**

В основе представлений о фрикционном взаимодействии шероховатых поверхностей лежит понятие о *площади соприкосновения* трущихся тел.

Твердые тела не являются идеально гладкими. Поэтому их контакт не бывает сплошным, а реализуется на отдельных участках, суммарная площадь которых незначительна по сравнению с теоретически возможной. Отклонения поверхностей от реальных подразделяют на макро-, микро- и субмикрогеометрического порядка (рис).

*L, мкм*

*H, мкм*

*105*

*103*

*101*

*10-1*

*103*

*101*

*10-1*

*10-3*

*Макроотклонения*

*Волнистость*

*Шероховатость*

*Субшероховатость*

Рис. Соотношение характерных размеров отклонений топографии

*Макрогеометрические* – отклонения поверхности всей детали или больших ее участков от идеальной.

Макроскопические неровности несут на себе *микронеровности* – наличие на поверхности дефектов в виде трещин, раковин, пиков и впадин, коробления и т.д.

В свою очередь микронеровности имеют *субшероховатость* порядка молекулярных размеров. *Субмикрогеометрические* – дефекты на уровне молекулярной (атомной) структуры: дефекты кристаллической решетки, вакансии и т.д.

**Макрогеометрические отклонения.**

Геометрическая форма, взаимное расположение поверхностей и размеры деталей машин обычно задаются чертежом и техническими условиями. Искажение геометрической формы или *макроотклонение* детали при ее изготовлении или эксплуатации приводит к повышенному и неравномерному изнашиванию деталей, снижает точность работы подвижных соединений, искажает характер посадок, вызывает контактное трение, а также создает очаги задиров и неравномерное распределение напряжений в посадках с натягом.

На практике чаще всего встречаются такие *формы макрогеометрических* отклонений цилиндрических поверхностей:

– в продольному направлении – выпуклость, седлообразность, вогнутость, конусность, и т.п.);

–в поперечном направлении – овальность, огранка и т.п.

*а*

*б*

*в*

*г*

*д*

*е*

Виды отклонений форм цилиндрических поверхностей:

*а* – выпуклость; *б* – седлообразность; *в* – вогнутость; *г* – конусность;

*д* – овальность; *е* – огранка

Технические требования к форме детали возрастают по мере повышения качества машин, их надежности и долговечности.

*Макрогеометрические* отклонения поверхности всей детали обычно имеют масштаб, измеряемый в диапазоне 10-3 – 10-4м.

Величина отклонений определяется путем измерения размеров детали в различных сечениях. Эти отклонения ∆ определяют как наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до идеальной прилегающей поверхности, измеряемые по нормали к последней.

**Микрогеометрия поверхности.**

Поверхность деталей машин в технике оценивается качеством поверхности. В свою очередь, качество поверхности определяется физико-механическими свойствами и ее микрогеометрией.

Макроскопические неровности несут на себе *микронеровности*, измеряемые на уровне 10-5 – 10-6 м.

Микрогеометрия создается в процессе изготовления деталей и характеризуется волнистостью и шероховатостью (рис. ).

*Hв*

*L*

*l*

*lб*

*Hmax*

Рис. . Схема волнистости и шероховатости поверхности

*L* – шаг волны, *Hв* - высота волны, *l* – шаг шероховатости,

*Hmax* – высота шероховатости, *lб* - базовая длина

*Шаг (L, l)* – расстояние между вершинами двух соседних выступов, измеренное на профиле поверхности.

*Высота* (*H*)– расстояние между вершиной и впадиной.

*Волнистость* – это совокупность регулярно повторяющихся неровностей с относительно большим шагом. Обычно отношение

,

где *L* – шаг волны, *H*в - высота волны.

*Шероховатость* – совокупность неровностей с относительно малым шагом *l* ≈ 2...800 мкм и высотой *Hmax* ≈ 0,025...320 мкм, образующих рельеф поверхности детали и рассматриваемых на определенной базовой длине *l*б = 80...8000 мкм и для шероховатостей .

Роль шероховатости особенно важна в подвижных соединениях деталей машин, т.к. оказывает влияние на величину трения и износа трущихся поверхностей, например, подшипника, направляющих, ползунов и т.п.

Шероховатость обработанной поверхности является следствием пластической деформации поверхностного слоя детали при образовании стружки, копирования неровностей режущих кромок инструмента, трения о деталь и др.

Шероховатость поверхности определяют по её *профилю*, который образуется в сечении этой поверхности плоскостью, перпендикулярной к номинальной поверхности, графическое представление профиля называют *профилограммой*.

Основной задачей при исследовании шероховатости поверхности, является определение ее параметров.

**Параметры шероховатости**

Шероховатость определяется на *базовой длине*, которую выбирают таким образом, чтобы не проявились другие виды неровностей (макронеровности), однако должна быть большой для увеличения точности оценки.

*Средняя линия профиля* – среднее квадратичное отклонение профиля от нее должно быть минимальным.

*Линия выступов* – эквидистанты средней линии и проходит через наивысшую точку профиля.

*Линия впадин* – эквидистанты средней линии и проходит через низшую точку профиля.

*yi max*

*yi min*

*Средняя линия*

*Линия выступов*

*Линия впадин*

*lб*

*Rmax*

*y*

*x*

Рис. Профилограмма шероховатой поверхности

Шероховатость поверхности характеризуется средним арифметическим отклонением профиля от средней линии *Rа* и высотой неровностей *Rz*.

*Среднее арифметическое отклонение профиля Ra* (0,008–100 мкм) – определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонения профиля от средней линии в пределах базовой длины.

Среднее арифметическое отклонение профиля рассчитывают по формуле:

,

где *yi* – расстояние расчетных точек от средней линии; *n* – число точек профиля.

*Высота неровностей профиля по десяти точкам Rz* (0,025–1600 мкм) – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов *yimax*и глубин пяти наибольших впадин *yimin* профиля в пределах базовой длины.

.

*Наибольшая высота неровностей профиля Rmax* – это расстояние между линией выступов и линией впадин профиля. Расстояние между линиями выступов и впадин (*Rmax*) равно толщине шероховатого слоя.

*Опорная длина профиля* – сумма длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии.

*Эквидистантный* – расположенный на одинаковом расстоянии от чего-либо.

*Относительная опорная длина профиля* – отношение опорной длины профиля к базовой длине.

Относительная опорная длина профиля в некотором приближении соответствует фактической площади контакта, которая равна сумме площадей вершин микронеровностей, попавших в сечение профиля.

Кроме перечисленных характеристик используются также средний шаг микронеровностей, средний угол наклона профиля, средний радиус закругления выступа и др.

По своей форме выступы напоминают пологие горные хребты. Угол при вершине для всех видов обработки обычно заключен в интервале от 150 до 176°. Наиболее близким по форме к реальному выступу является эллипсоид.

*Радиус кривизны* микронеровности (рис.) определяется по выражению

,

где *d* – ширина основания неровности, взятая на расстоянии  от ее верхней точки.

*h*

*d*

*r*

Рис. . Радиус кривизны микронеровности

*Приведенный радиус* *r*прив (средний) вершин неровностей профиля определяется как среднее геометрическое радиусов двух взаимно перпендикулярных направлений – поперечного и продольного (т. к. шероховатость имеет направленный характер, отражающий траекторию движения обрабатывающего инструмента):

.

Диапазон измерения *r*прив = 5...1350 мкм.

**Изменения поверхности при трении**.

Изменения, происходящие на поверхности контакта тел при трении, разбивают на три группы:

1. *Изменение геометрии контакта* происходит по мере скольжения и под сжимающей нагрузкой. Геометрические характеристики – шероховатость поверхности, радиусы закругления неровностей, выс*о*ты, волнистости – за счет наличия в контакте промежуточных частиц (абразив, частица износа) изменяются. Неровности поверхности выглаживаются и стремятся к некоторому стабильному значению (шероховатая разглаживается, а гладкая становится шероховатой).

2. *Изменение структуры твердого тела*:

*для кристаллических тел*:

– развитие дефектов кристаллической структуры: точечных дефектов; линейных дефектов – дислокаций; поверхностных дефектов (границ двойникования, границ зерен, изменение ориентации зерен и др.); объемных дефектов (скопление вакансий, образование полостей);

– изменение строения металлов: превращения кристаллических решеток; образование и растворение карбидов; диффузия и перераспределение молекул; фазовые превращения; рекристаллизация; потеря устойчивости кристаллической решетки;

*для полимеров*:

– ориентация цепей; изменение фазового состояния; деструкция; образование металлополимерных соединений; создание "материалов трения".

3. *Образование пленок на поверхностях трения:* адсорбционных из окружающей среды (газа, смазки); химических и хемосорбционных пленок (окислы, сульфиды, хлориды); пленок материала перенесенного на поверхность контртела; пленок при избирательном переносе при трении; пленок полимеров, образовавшихся при трении из смазки.

**Методы оценки топографии поверхности**

**Методы измерения волнистости.**

Методы основаны на применении механических и оптических систем измерения.

*Метод красок и угольных пленок*. На исследуемую поверхность наносят слой краски или угля толщиной 0,01–0,1 мкм. После приведения в контакт с эталоном покрытие разрушается в местах контакта выступов исследуемой поверхности с поверхностью эталона. Измеряя расстояние между разрушенными участками пленки на исследуемой поверхности или между пятнами краски, перенесенными на поверхность контртела, определяют шаг волны. Этот метод не позволяет определять высоту волны.

*Растровый метод*. Растровую решетку помещают под углом к исследуемой поверхности и направляют на нее луч света под углом. В отраженном свете будут видны теневые узоры, напоминающие картину Муара. Если поверхность плоская, то полосы будут параллельными прямыми, если цилиндрическая – в виде гипербол. Волнистость поверхности вызывает искривление этих полос. Чем больше высота волны, тем значительнее искривление полос.

*Метод теневой проекции профиля.* Исследуемую деталь помещают между экраном и источником светового излучения. При попадании части параллельного пучка света на деталь на экране образуется теневая проекция, которая воспроизводит форму профиля детали. Этот профиль фотографируется и изучается с помощью микроскопа. Метод позволяет изучать также шероховатость поверхностей после грубой обработки детали (фрезерование, точение).

*Волнометры и волнографы*. Различают щуповые, оптические, пневматические (с записью профилограммы).

*Щуповые.* Измерительный прибор (индикатор часового типа) помещают на пластину, жестко закрепленную на станине. Исследуемую деталь перемещают или поворачивают. При этом щуп прибора, перемещаясь по поверхности детали, фиксирует ее отклонения от идеальной формы. Возможен вариант перемещения прибора относительно неподвижной детали. Недостаток прибора – сравнительно низкая точность измерений.

*Оптические*. Параллельный пучок света от источника направляется на зеркало, закрепленное на одной балке со щупом. Затем, отражаясь от зеркала и проходя через узкую щель, он попадает на фотоэлемент, связанный с усилителем и осциллографом. При перемещении щупа по волнистой поверхности зеркало перемещается вместе с ним в вертикальной плоскости. В результате на фотоэлемент попадает световой поток различной интенсивности. Изменение величины фототока по мере перемещения щупа позволяет судить о высоте и шаге волнистости исследуемой поверхности.

**Методы измерения шероховатости.**

Для измерения шероховатости применяется ряд методов, позволяющих получать параметры профиля, снятого в определенном направлении, либо топографическое изображение (трехмерное) поверхности в целом.

***Методы качественной оценки***

*Метод визуального сравнения.* Качественная оценка шероховатости поверхности осуществляется путем визуального сравнения деталей поверхностей исследуемого и эталонного образцов, выполненных из одинаковых материалов. Метод применим только для грубо обработанных поверхностей (*Ra*>0,63 мкм).

*Метод сравнения с применением оптической системы.* Принцип действия прибора – световой пучок разделяется светочувствительным кубиком на две части. Одна из них направляется на эталонную поверхность, а вторая – на исследуемую. После отражения от этих поверхностей оба пучка попадают в объектив микроскопа. С помощью диафрагм регулируют ширину пучков таким образом, чтобы каждый из них занимал половину поля зрения микроскопа. Эталонные образцы заменяют до тех пор, пока изображение обеих поверхностей не становятся визуально неразличимыми. Зная шероховатость поверхности эталона, можно судить о шероховатости исследуемой поверхности.

***Методы количественной оценки/***

*Метод светового сечения*. На исследуемую поверхность направляют под углом 45 полоску света через узкую щель. Поскольку исследуемая поверхность имеет неровности, линия пересечения поверхности и световой полоски будет представлять собой кривую, повторяющую неровности, попадающие в световое сечение. Рассматривая световую полоску с помощью микроскопа под некоторым углом к поверхности, можно измерить ее отклонение от прямолинейности и по эти данным судить о микрогеометрии исследуемой поверхности. Этот метод применим только для оценки шероховатости грубо обработанных поверхностей.

*Интерференционный метод.* Применяют для изучения микрогеометрии гладких поверхностей. Пучок монохроматического света от источника попадает на делительный кубик и разделяется на два луча. Один попадает на зеркало и, отражаясь от него и зеркальной грани кубика, попадает на объектив. Второй луч, отражаясь от исследуемой поверхности, также попадает на объектив. Обладая разностью хода, оба луча накладываются и образуют интерференционную картину. В фокальной плоскости окуляра формируется изображение исследуемой поверхности и система интерференционных полос в тех областях поверхности, в которых разность хода двух интерферирующих лучей равна целому числу длин полуволн. Наличие микронеровностей вызывает искривление интерференционных полос. Ширина полос интерференции является мерой высоты неровностей.

*Щуповой метод.* Основан на измерении вертикальных колебаний иглы, перемещаемой по исследуемой поверхности в выбранном направлении. Колебания иглы при этом повторяют неровности профиля поверхности. Они усиливаются оптической, электрической или магнитной системой и регистрируются в виде профилограммы или поступают в интегрирующее устройство, выдающее параметры шероховатости. Применяемые приборы – профилографы (профилометры). Алмазная игла-щуп имеет коническую форму с радиусом закругления вершины – 2-10 мкм. Недостатки – игла не проходит через вершину выступа, а перемещается по его склону. Это приводит к заниженным результатам измерения параметров шероховатости.

*Метод слепков.* Применяют для определения параметров шероховатости труднодоступных участков поверхности (крупные детали, отверстич и т.п.). Реализуется путем нанесения на исследуемую поверхность пластической массы и ее отверждения. Поверхность образующегося при этом слепка является копией исследуемой поверхности.

Перечисленные методы имеют общие недостатки – параметры профиля, снятого в одном направлении, как правило, не совпадают с параметрами профиля поверхности, рассматриваемой как трехмерный объект, при профилометрировании нельзя получить информацию о строении отдельных элементов поверхности и их взаимном расположении.

***Методы регистрации топографического изображения поверхности (трехмерное).***

*Цифровой оптический метод.* Объемное изображение поверхности получают с использованием интерферометра Миро и двухмерной матрицы фотоприемников.

Монохроматическое излучение от источника попадает на полупрозрачную пластинку. Отраженный от нее луч переходит на исследуемую поверхность, проходя через интерферометр Миро, который перемещается пъезоэлектрическим элементом, управляемым микропроцессором.

Интерференционные полосы освещают формирователь изображения, состоящий из 384×240 фотоприемников. Последовательно получаемые при сканировании исследуемой поверхности световым пучком электрические сигналы обрабатываются микропроцессором, который строит трехмерное изображение исследуемой поверхности в виде набора профилограмм.

*Бесконтактный метод.* Основан бесконтактный метод на существовании взаимнооднозначного соответствия между ординатами профиля и величиной низкоэнергетической компоненты излучения вторичных электронов.

Метод реализуется в растровом электронном микроскопе и заключается в следующем. Электронный пучок, выходящий из катода, проходит через анод, фокусируется с помощью системы электромагнитных линз и разворачивается в растр по поверхности исследуемого образца. Вторичные электроны, излучаемые поверхностью исследуемого образца, собираются на детекторе. Полученный видеосигнал через интерфейс вывода изображения поступает на вход компьютера, где по специально разработанной программе обрабатывается. Результат обработки в табличной и графической форме выводится на принтер.

*Сканирующая зондовая микроскопия.* Объединяет группу методов, основанных на принципе сканирования исследуемой поверхности зондом и регистрации его перемещений в плоскости исследуемой поверхности и перпендикулярном к ней направлении. Метод обеспечивает получение трехмерного изображения поверхности с атомным разрешением. Были разработаны сканирующий туннельный микроскоп (Цюрих), атомно-силовой и световой сканирующий микроскопы.

Сканирующая зондовая микроскопия – самый современный метод изучения субмикрорельефа поверхности твердых тел, обладающих атомарным разрешением.

**Сравнение методов исследования топографии поверхности**

|  |  |
| --- | --- |
| Методы исследования | Недостатки метода |
| Визуальный способ | Точность оценки качества поверхности зависит от квалификации оператора и от характеристик набора образцов шероховатости |
| Бесконтактный способ (фокусные устройства) | Большое влияние на результат измерения оказывают: наклон поверхности, отражающая способность образца, степень его загрязненности и структура микрогеометрии. Высокая погрешность (приборы позволяют измерить неровности поверхности высотой от 0,8 до 63 мкм при погрешности показаний от 2,4 до 7,5%) |
| Бесконтактный способ (интерферометры) | Полученные результаты трудны в восприятии и требуют математической обработки. Вертикальный диапазон измерений очень низкий и ограничен длиной волны испускаемого света. Необходимо учитывать коэффициент отражения поверхности. Оптическая постоянная должна быть неизменной на всем протяжении исследуемого участка поверхности |
| Контактный способ | Влияние на измерение особенностей щупа, связанных с его размером, формой, проскальзыванием, нагрузкой на поверхность, износом. Низкая скорость измерения |
| Способ, основанный на применении электронных микроскопов | Образец нуждается в специально подготовке. Трудно измерить гладкие поверхности. Низкая скорость измерения методом стереопары. Классический электронный микроскоп не позволяет проводить трехмерные измерения |