**ФАКТОРЫ И ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ОКАЗЫВАЮЩИЕ ВЛИЯНИЕ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

Кратко рассмотрим явления, факторы и поверхностные явления твердых тел, оказывающие влияние на трибологические процессы.

**Структура вещества**

Различают две разновидности твердых тел, отличающихся своими свойствами – кристаллические и аморфные.

*Кристаллические* тела при нагреве остаются твердыми до определенной температуры, при которой они переходят в жидкое состояние.

*Аморфные* тела при нагреве размягчаются. Размягчение происходит в широком интервале температур. При этом тела становятся вязкими и дальнейший их нагрев сопровождается переходом в жидкое состояние.

Кристаллические тела характеризуются упорядоченным расположением в пространстве элементарных частиц, из которых они состоят – так называемая *кристаллическая решетка*.

Несмотря на многообразие кристаллических решеток, большинство твердых тел имеет решетку трех типов: объемно-центрированную кубическую, гранецентрированную кубическую, гексагональную плотноупакованную (рис.).

а)

б)

в)

Рис. Основные типы кристаллических решеток металлов:

а – кубическая объемноцентрированная, б – кубическая гранецентрированная,

в – гексагональная плотноупакованная

Аморфные тела характеризуются хаотичным расположением элементарных частиц.

*Металлы* – поликристаллические тела, состоящие из большого количества зерен, в пределах одного зерна сохраняется правильная кристаллическая решетка. Из-за хаотического расположения зерен поликристаллы изотропны, а свойства любой поверхности поликристалла в среднем одинаковы.

В технике широко применяются сплавы металлов. Они имеют характерные свойства, присущие металлическому состоянию.

Свойства реальных кристаллов отличаются от свойств идеальных. Главной причиной значительного снижения прочности и текучести кристаллов являются дефекты их структуры (вакансии, внедренные инородные атомы, дислокации).

Особое место в строении металлов занимают границы зерен. Материал на этих участках находится в ослабленном состоянии вследствие повышенной концентрации отмеченных выше дефектов.

Поры и трещины формируют в металлах развитую микрокапиллярную сеть, которая начинается на поверхности в виде системы микроскопических и субмикроскопических трещин и полостей, а далее переходит в фазовые поверхности раздела элементов, структурные и внутренние трещины. Благодаря такому строению металлов внешняя среда за счет адсорбционных и диффузионных процессов проникает внутрь их и оказывает физико-химическое воздействие на механические свойства приповерхностных слоев твердых тел.

*Полимеры* как конструкционные материалы в современной технике занимают важное место наряду с металлами. Область их применения непрерывно расширяется. Физико-механические свойства полимеров отличаются от свойств металлов и сплавов.

Полимеры состоят из огромных молекул, образующихся в результате соединения небольших групп атомов, чаще всего атомов углерода и водорода. В зависимости от формы и размеров молекул полимера свойства его могут меняться в самых широких пределах.

*Линейные* полимеры (рис. ) имеют линейные молекулы, связанные между собой силами Ван-дер-Ваальса.

Если в основной цепи макромолекулы возникают короткие боковые ответвления, то такие полимеры называют *разветвленными* (рис.). При повышении температуры полимеры линейного и разветвленного строения легко размягчаются и переходят в жидкое состояние, причем изменение их свойств происходит постепенно. При комнатной температуре структура линейных полимеров полностью аморфная, или частично кристаллическая. Линейные полимеры являются основой термопластов, которые легко обрабатываются давлением при температурах до 200...300 °С. К термопластам относятся фторопласты, поливинилхлорид, полиэтилен, полистирол и др.

а)

б)

в)

Рис. Строение полимеров:

а – линейных, б – разветвленных, в – пространственных

Полимеры с замкнутой *пространственной* сетчатой структурой (рис.) составляют основу термореактивных полимеров (фенолформальдегидные смолы, карболит, этрол и другие сильнонаполненные полимеры). Цепи макромолекул в пространственных полимерах сшиты между собой химическими связями, что повышает их свойства по сравнению с линейными и разветвленными.

**Свойства твердых тел**

При контактном взаимодействии твердых тел необходимо учитывать как объемные, так и поверхностные механические свойства металлов.

Объемные свойства характеризуются известными из механики деформирования твердых тел величинами – модулем упругости *Е*, пределом текучести σт, коэффициентом Пуассона μ и т. д.

Поверхностные свойства принципиально должны характеризоваться теми же по физическому смыслу величинами. Однако вследствие сложности их определения используются интегральные величины – твердость и микротвердость.

*Твердость* – это свойство материалов оказывать сопротивление проникновению в него более прочного эталонного материала.

Твердость HB определяется по методу вдавливания шарика (метод Бринелля), микротвердость определяется при вдавливании в материал алмазной пирамиды.

Между числом твердости по Бринеллю НВ и величиной предела прочности сталей при разрыве σв существует приближенная эмпирическая зависимость:

.

Потенциальные возможности конструкционных материалов используются полностью в тех случаях, когда качество поверхности детали удовлетворяет соответствующим требованиям.

Качество поверхности влияет на износостойкость подвижных сопряжений, коррозионную стойкость, теплопередачу и усталостную прочность деталей при работе их в условиях переменных нагрузок.

Упругие *свойства материала в поверхностных слоях* незначительно отличаются от объемных свойств (*Е* и *G*). Пластические свойства, в том числе и микротвердость, изменяются по глубине.

При трении или механической обработке поверхностный слой твердого тела подвергается интенсивному деформированию, насыщается элементами материала контртела и окружающей среды. Это приводит к изменению его структуры и обуславливает неоднородность его строения по глубине.

Примерная структура *поверхностного слоя металла* детали после внешнего трения одной детали относительно второй представлена на рис.

1 (до 0,3 нм)

2 (0,2–8 нм)

3 (до 5000 нм)

4

Рис. Структура поверхностного слоя металла детали:

1 – адсорбированный слой, состоящий из пленок влаги, газов и загрязнений;

 2 – слой оксида, имеющий повышенную твердость; 3 – слой с сильно деформированной кристаллической решеткой; 4 – металл с исходной структурой

Граничный слой 1 толщиной до 3 нм состоит из адсорбированных молекул газов, влаги, смазочного материала. Удаляется с поверхности детали нагревом в вакууме. Слой 2 состоит из оксидов, образовавшихся при взаимодействии металла с кислородом. Он содержит продукты трибохимических реакций, сильно деформированные частицы металла. Для него характерна высокая концентрация пор и микротрещин. Толщина слоя составляет 0,2–8 нм. Слой 3 состоит из сильно деформированных кристаллов металла, подвергнутых воздействию температуры и механических нагрузок, что приводит к повышению пределов прочности, текучести и микротвердости. Толщина слоя 3 достигает 5000 нм. Нижележащий слой 4 имеет структуру исходного материала. Толщина каждого из слоев зависит от режимов нагружения материала при трении. Все это на определенной глубине придает металлу структурно-неустойчивое состояние.

При фрикционном нагружении *полимерного материала* его поверхностный слой претерпевает ряд структурных изменений, которые обеспечивают различие свойств полимера по глубине. В результате деформирования и импульсного нагрева при трении происходит деструкция молекулярных цепей, сопровождающаяся выделением газообразной фазы. Изменяется фазовый состав, измельчаются надмолекулярные структуры и кристаллические области, происходит локальная аморфизация кристаллического полимера. Наблюдается ориентация структуры в направлении действия сил трения. Схематично структура поверхностного слоя, образовавшаяся при трении, представлена на рис.

В результате деструкции молекулярных цепей при трении на поверхности полимера появляется газообразная фаза 1, состоящая из молекул окружающей среды и газов, образующихся при разложении полимера. Ниже располагается адсорбционный слой 2. Область 3 представляет собой слой, состоящий преимущественно из низкомолекулярных продуктов разложения полимера, обладающий низким сопротивлением сдвигу. Слой 4 состоит из ориентированных в направлении сдвига макромолекул и надмолекулярных образований. Слой 5 характеризуется наличием частично разрушенных надмолекулярных образований и кристаллических областей, слабо ориентированных в направлении действия сдвигающей силы (силы трения). Физико-механические свойства каждого из слоев различны и могут существенно отличаться от свойств основного материала (6).

1

2

3

5

4

6

Рис. Структура поверхностного слоя полимера:

1 – газообразная фаза; 2 – адсорбционный слой; 3 – низкомолекулярные продукты разложения полимера; 4 – слой с сильно ориентированной структурой; 5 – слой со слабо ориентированной структурой; 6 – основной материал

Структура поверхностных слоев твердых тел зависит от режимов нагружения и может отличаться от приведенной. Разделение твердого тела на слои является условным. В реальных деталях наблюдается плавное изменение структуры по нормали к поверхности трения.

**Деформация кристаллических тел**

Под деформацией понимают изменение размеров и формы тела под воздействием приложенных сил. Различают упругую и пластическую деформации.

В монокристалле или отдельном кристалле под действием внешних сил атомы исходной кристаллической решетки смещаются относительно своего первоначального расположения. Если это смещение мало и не превышает половины расстояния между атомами, то после устранения внешней нагрузки атомы вновь занимают первоначальное положение, размеры кристалла восстанавливаются. В данном случае имеет место *упругая деформация*.

*Пластическая деформация* происходит в результате смещения одних атомов относительно других на целое число межатомных расстояний. После снятия нагрузки смещенный атом не возвращается, т.к. перестал взаимодействовать с соседним атомом. При таком механизме пластической деформации происходит скольжение атомных плоскостей кристаллов друг относительно друга. Сопротивление кристалла пластической деформации велико, т.к. необходимо одновременное смещение всех атомов, лежащих в плоскости скольжения.

В реальных *металлах* действует дислокационный механизм пластической деформации. Переход атомов в соседнее устойчивое положение в этом случае происходит с местным искажением структуры, называемыми дислокациями и распространяющимися по плоскости скольжения подобно волне.

Упругие деформации *кристаллических полимеров* обусловлены изменениями валентных углов полимерной цепи и изменением межатомных и межмолекулярных расстояний и могут достигать нескольких процентов, в отличие от металлов. Пластические деформации полимеров являются результатом необратимого перемещения макромолекул или их агрегатов относительно друг друга.

Деформационные свойства *аморфных полимеров* чувствительны к изменению температуры. До температуры стеклования полимер находится в стеклообразном состоянии и в нем возникают только упругие деформации. Выше температуры стеклования некоторые полимеры могут испытывать обратимые высокоэластические деформации, обусловленные конформационными изменениями молекулярных цепей (распрямлением). При достижении температуры текучести в полимере возникают необратимые пластические деформации за счет перемещения молекулярных цепей друг относительно друга и разрушению слабых межмолекулярных связей.

**Адсорбция и хемосорбция**

В результате взаимодействия твердого тела с молекулами газа или жидкости, соприкасающихся с твердым телом, поверхность последнего покрывается пленкой веществ, содержащихся в окружающей среде: газов, паров воды, обычно находящихся в воздухе, и паров других жидкостей, а также веществ, растворенных в жидкостях и соприкасающихся с поверхностью твердого тела.

Явления образования на поверхности твердого тела тончайших пленок газов, паров или растворенных веществ, либо поглощение этих веществ поверхностью тела называют *адсорбцией*.

Тело, на котором происходит адсорбция, называют адсорбентом.

При химической адсорбции (хемосорбции) полярные концы молекул, связываясь с поверхностью тела, образуют в ней монослой, сходный с химическим соединением. Подвижность молекул в результате этого значительно уменьшается.

Наибольшей способностью к адсорбции обладают поверхностно активные вещества (ПАВ), молекулы которых ориентируются при адсорбции перпендикулярно к поверхности тела, с которым взаимодействуют (органические кислоты, спирты, смолы, дистиллированная вода). В трибологии роль ПАВ велика, они присутствуют практически во всех видах смазочных материалов и оказывают влияние на механические свойства твердых тел. П. А. Ребиндером был открыт эффект адсорбированного снижения прочности поверхностного слоя твердых тел под воздействием ПАВ жидкой среды.

Внешний адсорбционный эффект (адсорбция ПАВ на внешней поверхности твердого тела) способствует пластифицированию поверхностного слоя. Внутренний адсорбционный эффект (адсорбция ПАВ на внутренних поверхностях раздела – зародышевых микротрещинах) приводит к снижению поверхностной энергии, проявляющейся в возникновении хрупкости и потере прочности.

Наряду с адсорбцией проходят и процессы *диффузии* – распространение вещества в какой-либо среде в направлении убывания его концентрации, обусловленное тепловым движением ионов, атомов, молекул, а также более крупных частиц.

В процессе трения и изнашивания могут иметь место гетеро-, самодиффузия, диффузия в градиенте температур и напряжений, реактивная, объемная и поверхностная диффузия.

Адсорбция и диффузия играют существенную роль в повышении или снижении износа в сопряжения деталей. Явление *диффузии используется* для термомеханического упрочения поверхности слоев деталей узлов трения за счет их насыщения элементами других веществ (азотирование, цианирование, цементация и т.д.) и получения защитных покрытий. Метод получения антифрикционных деталей из порошков путем спекания также основан на явлении диффузии.

**Оксиды на металлах**

Процесс трения усиливает процесс окисления. Физико-химические свойства поверхности металла, ее дефекты определяют механизм и глубину реакции поверхностного окисления.

Пленка оксидов, в связи со своей высокой твердостью защищает нижележащие слои металла от механического воздействия. Однако, из-за незначительной толщины оксидных пленок, их защитное действие невелико.

Наличие оксидных пленок снижает молекулярно-адгезионное взаимодействие между трущимися поверхностями металлов.

Окисление связано с образованием оксида при протекании химической адсорбции атомов кислорода воздуха с металлической поверхностью. Затем происходит образование кристаллической фазы оксидов. Различия в постоянной кристаллической решетке оксида и металла способствуют тому, что пленки оксидов находятся в сжатом состоянии. Это сжатое состояние снижает дальнейшее проникновение кислорода к металлу.

Присутствие воды и находящихся в воздухе газов *CO*2 и *SO*4 создают условия для протекания электролитического окисления.

Защитная роль пленки оксида связана с твердостью оксида и основного металла. Максимальная несущая способность оксидной пленки связана с твердостью основного металла. Чем меньше разница между твердостью основного металла и оксида, тем выше прочность пленки.

В начале процесса окисления пленки обладают большой прочностью и защищают материал от схватывания. Дальнейший рост толщины пленки приводит к уменьшению ее прочности и под действием внешних сил трения она легко отделяется.

Основное назначение оксидных пленок – предотвращение образования металлических связей и замена их межмолекулярными ван-дер-вальсовыми.

Оксидные пленки на трущихся поверхностях приводят к ослаблению схватывания, уменьшению трения и износа.

Кроме пленок оксидов на поверхности твердых тел могут образовываться сульфидные, водяные, полимерные пленки.

**Адгезия между твердыми телами.**

Трение является следствием действия сил адгезии.

*Адгезия* – это явление образования соединений между двумя приведенными в контакт разнородными телами.

Преодоление сил адгезии двух взаимоконтактирующих поверхностей тел происходит в момент начала их взаимного перемещения.

Взаимное перемещение элементов структуры тела, вызывающее внутреннее трение, также связано с преодолением сил сцепления между атомами и молекулами структуры. Если силы сцепления действуют внутри тела, то они вызывают *когезию*, если на поверхности – *адгезию*.

Любое воздействие, связанное с отрыванием элементов тел, встречает сопротивление сил когезии. Взаимное перемещение поверхностей твердых тел при их силовом взаимодействии связано с преодолением сил адгезии.

Под действием нормальной нагрузки *Fn* между двумя телами возникают адгезионные соединения (мостики сварки) в области взаимного внедрения неровностей поверхностей (рис.). При снятии нормальной нагрузки часть соединений разрушается благодаря упругому восстановлению деформированных неровностей.

*Fn*

Рис. Схема образования адгезионных соединений при контакте твердых тел

Прочность адгезионного взаимодействия двух реальных тел, как правило, незначительна. Это связано с малым числом и размером площадок, на которых образуются адгезионные связи. Кроме того, оксидные и адсорбционные пленки препятствуют образованию адгезионных соединений.

Разрушение адгезионных связей происходит по месту ее образования (адгезионное разрушение) или на некоторой глубине (когезионное разрушение).

Адгезия наблюдается во многих узлах трения – в зубчатых передачах, опорах скольжения и качения, муфтах, при механической обработке металлов и др.

Единой теории адгезии пока не существует. В настоящее время используют несколько теорий, объясняющих адгезию:

– *механическая теория* – одностороннее или взаимное заклинивание неровностей одного тела в дефектах другого;

– *адсорбционная теория* – между контактирующими телами возникает молекулярное взаимодействие с образованием *водородных*, *ориентационных*, *дисперсионных*, *индукционных связей*;

– *электрическая теория* – образование двойного электрического слоя при переходе электронов или ионов с одной поверхности на другую (в основном в парах полимер метал);

– *диффузионная теория* – адгезия обусловлена взаимным проникновением цепей молекул или их сегментов и возникновением связи между ними – образуется переходная пленка совмещенного состава (адгезия полимеров);

– *рекристализационная теория* – миграция атомов через кристаллические решетки (даже через оксидные пленки) с образованием общих кристаллов в области контакта (адгезия металлов).

– *химическая теория* – образование в местах контакта химических связей ковалентного и ионного типа.

**Взаимодействие тел при трении.**

При относительном перемещении твердых тел в зоне их контакта имеет место сложный комплекс *механических, физических и химических явлений*, приводящих к возникновению сопротивления перемещению и разрушению сопрягаемых поверхностей.

Под действием нормальной нагрузки и сдвигающего усилия в микрообъемах трущихся тел возникают *высокие напряжения*, материал этих объемов испытывает существенные по величине *деформации*, что сопровождается *импульсным нагревом* материала интенсивно деформируемых участков до температуры, соизмеримой с температурой его плавления или деструкции. Это способствует *увеличению скорости* протекания адгезионных, диффузионных, электрических и магнитных процессов в зоне фрикционного контакта.

В результате поверхностные слои трущихся тел становятся *химически и каталитически активными*: металлы насыщаются дислокациями, полимерные материалы – реакционно-способными группами, образующимися при разрыве молекулярных и межмолекулярных связей, интенсифицируются процессы образования граничных слоев и оксидных пленок.

Следствием протекания перечисленных процессов при трении является образование новых «вторичных» структур поверхностных слоев, отличающихся по строению и свойствам от структуры и свойств исходного материала. Наряду с изменением структуры происходит образование, накопление и развитие дефектов, приводящих к разрушению поверхностных слоев трущихся тел.

Природа происходящих процессов при трении различна. Условно их подразделяют на группы: *механические*, *физические; химические; физико-химические*.

*Механический аспект* – при взаимодействии твердых тел под нагрузкой возникают напряжения и соответствующие деформации, величина и вид которых зависит от механических свойств контактирующих тел.

*Химический аспект* – взаимодействие обусловлено образованием между материалами контактирующих тел химических связей (химических соединений).

Химические связи характерны для работы металлополимерных пар, особенно при трении со смазкой. Трибологические процессы приводят к возникновению высокоактивных свободных радикалов (или молекул), которые могут вступать в реакции синтеза с мономерами (как смазки, так и полимеров) или молекулами другого тела. Таким образом, при трении возможно возбуждение химических реакций, приводящих к образованию так называемых "материалов трения", как снижающих, так и увеличивающих коэффициенты трения.

*Физический аспект* – взаимодействия, ответственные за адгезию и диффузию твердых тел, в частности за адгезионную составляющую сил трения. Адгезионные и диффузионные механизмы имеют самостоятельную классификацию (подробнее ниже);