

# Лекция № 15.1

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ. МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И МЕХАНИЗМЫ ИЗНАШИВАНИЯ ПОЛИМЕРОВ.

**11.1.Основные положения теории трения полимеров.**

**11.2.Металлополимерные системы.**

**11.3.Основные закономерности и механизмы  
изнашивания полимеров.**

**:**

## Цель лекции:

***Получить понятие о теории и закономерностях трения полимерных материалов, металлополимерных системах и основных механизмах изнашивания полимеров.***

# 11.1 Основные положения теории трения полимерных материалов.

*Полимеры* — это природные и синтетические соединения, молекулы которых, как следует из их названия (поли — много, мера — часть), состоят из большого числа повторяющихся одинаковых или различных по строению атомных группировок, соединенных между собой химическими или координационными связями в длинные линейные или разветвленные цепи.

Группа атомов, с помощью которой можно описать строение полимера, называется составным звеном. Составное звено, которое многократно повторяется, называют повторяющимся составным звеном, а группы на концах цепи — концевыми группами. Молекула полимера, состоящая из повторяющихся составных звеньев и концевых групп, называется макромолекулой.

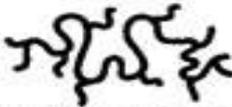
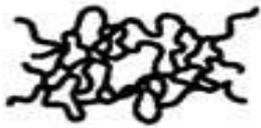
# Типы структур

Полимерные вещества построены из отдельных линейных или разветвленных макромолекул или из совокупности этих цепей, связанных между собой поперечными химическими связями (сшивками), образующими пространственную (сетчатую) структуру.

По типу структуры полимеры разделяются на:

- Линейные
- Разветвленные
- Сетчатые (сшитые)

# Типы структур

Линейный	Разветвленный	Сшитый	Дендример
 <p>Гибкий клубок</p>	 <p>Статистические короткие разветвления</p>	 <p>Редкосшитый</p>	 <p>Сверхразветвленный (неидеальный дендрон)</p>
 <p>Жесткий стержень</p>	 <p>Статистические длинные разветвления</p>	 <p>Густосшитый</p>	 <p>Идеальный дендрон</p>
 <p>Линейный цикл</p>	 <p>Регулярные гребнеобразные разветвления</p>	 <p>Взаимопроникающие сетки</p>	
 <p>Полиротаксан</p>	 <p>Регулярные звездчатые разветвления</p>	 <p>Дендример</p>	

Современные композиционные материалы на основе полимеров позволяют повысить эксплуатационный ресурс и надежность машин, обеспечив при этом значительные материальные выгоды и экономический эффект.

До недавних пор широкому использованию полимерных материалов в машиностроении препятствовали два общепризнанных недостатка полимеров:

- их низкая (по сравнению с марочными сталями) прочность
- их низкая теплостойкость.

Рубеж прочностных свойств полимерных материалов удалось преодолеть переходом к композиционным материалам, главным образом стекло- и углепластикам.

Для повышения эксплуатационных характеристик полимерных материалов разрабатываются новые связующие с требуемыми характеристиками, многотоннажно выпускаемые материалы модифицируются функциональными добавками, трущиеся поверхности обрабатываются специальными методами

Исследование механизма трения и изнашивания полимеров показало, что наиболее существенное влияние на фрикционные характеристики оказывают природа контактирующих материалов, нагрузочно-скоростные и тепловые режимы трения, условия смазки, топография поверхностей трения. Работа узла трения во многом зависит от температуры и состава окружающей среды, наличия абразива, воздействия агрессивных и коррозионно-активных сред.

Для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости материала в состав связующего компонента обычно вводят от 0,1 до 40% сухих смазок — графита, сульфидов металлов, солей высших кислот, талька, слюды и др.

Такие вещества обладают способностью образовывать на поверхностях трения легкоподвижные слои. В последние годы широкое распространение получил метод повышения фрикционных свойств полимерных материалов путем введения в их состав жидкофазных смазок и смазочных масел.

Важный момент в проектировании новых полимеров — изучение влияния эффекта мономера и химической структуры полимера на такие свойства, как «адгезия» (слипание), «связывающее напряжение», водопроницаемость, диэлектрические и оптические характеристики. Чтобы гарантировать хорошую адгезию между компонентами, в дальнейшем необходима поверхностная обработка, а чтобы облегчить обработку полимера, могут использоваться лубриканты — «смазочные материалы». Они представляют собой вещества, которые при добавлении в небольших количествах обеспечивают значительное уменьшение движения цепочек или сегментов полимера.

Приведем несколько примеров. Замена алюминиевого сплава графитопластиком при изготовлении предкрылка самолета позволяет сократить количество деталей с 47 до 14, крепежа — с 1464 до 8 болтов, снизить вес на 22%, стоимость — на 25%. При этом запас прочности изделия составляет 178%.

По данным ведущих мировых машиностроителей практически все функциональные детали тормозных систем для автомобилей и около 45% для железнодорожного подвижного состава делаются из синтетических прессматериалов. Около 50% деталей вращения и зубчатых колес изготавливается из прочных конструкционных полимеров. В последнем случае можно отметить две различные тенденции. С одной стороны, все чаще появляются сообщения о производстве зубчатых колес для тракторов из капрона. Эти шестерни могут работать почти без износа в контакте со стальными, кроме того, такая система не нуждается в смазке и почти бесшумна. Другая тенденция — полная замена металлических деталей в редукторах на детали из углепластиков. Для них тоже отмечается резкое снижение механических потерь и увеличение срока службы.

Еще одна область применения полимерных материалов в машиностроении, достойная отдельного упоминания — это изготовление металлорежущего инструмента. По мере расширения областей использования прочных сталей и сплавов все более жесткие требования предъявляются к обрабатываемому инструменту. И здесь тоже на выручку приходят пластмассы. Но не совсем обычные пластмассы сверхвысокой твердости, а такие, которые могут поспорить даже с алмазом.

Еще один пример добавок в полимеры. Динамичное развитие спорта, пиковые нагрузки у ворот или у сетки приводят к тому, что трава не успевает подрасти от одного состязания до другого. И никакие ухищрения садовников не могут с этим справиться. На помощь могут прийти синтетические материалы, например, полиамидная пленка. Пленку толщиной 25 мкм нарезают на полоски шириной 1,27 мм, вытягивают, извивают, а затем переплетают так, чтобы получить легкую объемную массу, имитирующую траву. Во избежание загорания в полимер добавляют огнезащитные средства. Коврики из синтетической травы наклеивают на подготовленное основание — и травяной корт, футбольное поле или иная спортивная площадка готовы к использованию, а по мере износа отдельные участки игрового поля можно заменять новыми покрытиями.

## 11.2 Металлополимерные системы.

Практически в любой технике можно встретить элементы, образующие пару трения металл-полимер: подшипники скольжения с полимерными втулками, уплотнительные манжеты и полимерные сальниковые уплотнения плунжеров, поршней, фрикционные передачи, тормозные устройства, искусственные суставы.

Рассмотрим, с точки зрения трибологии, *металлополимерную систему* как пару трения металл - полимер. Пара трения - система из двух элементов, соприкасающиеся поверхности которых перемещаются друг относительно друга.

Пара трения металл - полимер представляет собой своего рода *металлополимерную систему*, отличную по свойствам и происходящим в ней процессам от пар металл - металл, полимер - полимер.

***Металлополимерная система*** — это совокупность по меньшей мере двух предназначенных для совместной работы тел, соединенных атомно-молекулярными силами или механически, одно из которых состоит из макромолекул (полимер), а другое — из атомов с обобществленными электронами (металл).

***Металлополимерный материал*** — это полуфабрикат, состоящий из полимеров и металлов, соединенных между собой неподвижно атомно-молекулярными силами или механически, и предназначенный для изготовления деталей, узлов и конструкций (например, металлический листе полимерным покрытием).

***Металлополимерная деталь*** — это элементарная (неделимая) часть конструкции или узла, изготовленная из полимеров и металлов или металлополимерного материала (например, металлополимерное зубчатое колесо).

***Металлополимерный узел*** — это элемент конструкции, состоящий из металлических и полимерных или металлополимерных деталей, который может быть также использован в различных конструкциях. (например, металлополимерный узел трения, скольжения, металлополимерные уплотнительные узлы).

Полимеры обладают по сравнению с металлами более низким коэффициентом трения, меньше изнашиваются, малочувствительны к ударам и колебаниям. И в то же время обладают низкой, по сравнению с металлами, теплопроводностью и теплостойкостью.

Полимер в паре трения металл - полимер используют непосредственно как тело трения, либо в виде покрытия - плёнки на поверхности другого материала, в основном металла. Чистые полимеры не используются в парах трения, для улучшения свойств в них вводят наполнители, пластификаторы, модификаторы и т.д., используют композиционные полимерные материалы.

Трение полимерных композиционных материалов сопровождается химическими реакциями окисления, процессами трибодеструкции и структурирования (изменения структуры материала при трении), разрыва химических связей, синтеза новых фаз и другими процессами. Всё это приводит к образованию вторичных структур, облегчающих или затрудняющих процесс трения сопряженных поверхностей в узлах трения. Поверхностные слои как металлического контртела (элемент пары трения, работающий совместно с материалом трения, так и полимерного композиционного материала при трении находятся также в сложном напряженно-деформированном состоянии под действием сдвиговых напряжений и деформаций. Механохимическая деструкция макромолекул в поверхностных слоях приводит к разрыву химических связей, образованию свободных радикалов, а также может инициировать адсорбционное пластифицирование поверхностных слоев полимерной и сопряженной металлической детали (согласно эффекту Ребиндера под влиянием активной среды (в том числе смазочных материалов) при трении происходит пластифицирование поверхностного слоя металла).

При различных режимах трения возможен фрикционный перенос материалов, который заключается в переносе полимерного материала на металлическое контртело. В результате взаимодействия частиц полимера с активными участками поверхности контртела формируется так называемое «третье тело» - плёнка фрикционного переноса. Механизм образования плёнки переноса зависит от механизма разрушения полимерного материала, степени деструкции макромолекул, активности образующихся радикалов и их взаимодействия с металлом, подвижности молекулярных цепей.

Структура и свойства плёнки переноса имеют определяющее значение в механизме трения и изнашивания металлополимерных пар трения.

Исследования и опыт эксплуатации металлополимерных трибосопряжений показали, что удовлетворительная работа этих сопряжений возможна только при условии образования на металлическом контртеле устойчивой полимерной плёнки фрикционного переноса.

Установлено, что образование плёнки фрикционного переноса происходят благодаря адгезионным связям, возникающим при контакте полимера с металлом. Процесс образования адгезионной связи можно разделить на две стадии.

На первой стадии происходит перемещение молекул полимера к поверхности металла и их определённое ориентирование в межфазном слое, в результате которого обеспечивается тесный контакт между молекулами и функциональными группами полимера и металла.

Вторая стадия процесса состоит в непосредственном взаимодействии полимера и металла.

Изучению механизма образования плёнок фрикционного переноса посвящено много работ, но они, как правило, носят частный характер, так как в них исследуются отдельные виды полимерных и композиционных материалов.

## **11.3 Основные закономерности трения и механизмы изнашивания полимеров.**

Материалы на основе полимеров в большей степени, чем металлы, чувствительны к воздействию многочисленных факторов, обусловленных трением и влиянием внешней среды.

Широкие исследования изменений коэффициента трения и характера скольжения при трении пластмасс по стали и одноименных пластмасс без смазки и со смазкой полярными и неполярными маслами показывают, что смазывающая среда (граничная смазка), например неполярная жидкость (диффузионное масло), снижает общую силу трения вследствие уменьшения площади непосредственного контакта трущихся поверхностей. Однако в результате внедрения под воздействием нагрузки неровностей стальной поверхности в полимерный материал и соответствующей деформации его поверхностных слоев при скольжении на определенных участках смазка вытесняется. В этом случае, если пластмасса обладает высокой адгезией к стали, в момент образования адгезионных мостиков сила сцепления может достичь высоких значений, что приводит к скачкообразному изменению силы трения.

Если полимерный материал имеет малую адгезию к стали, то неполярная жидкость снижает общую величину силы трения в основном вследствие облегчения процесса пластического деформирования поверхностного слоя полимера микронеровностями стальной поверхности. При этом процесс трения протекает более стабильно. При смазке маслом с полярной присадкой, образующей на поверхности стали прочные ориентированные граничные слои, непосредственный контакт пластмассы и стали затрудняется, и трение происходит между граничным слоем масла на стали и поверхностью пластмассы. Возможные единичные разрывы граничного слоя с образованием адгезионных мостиков не оказывают существенного влияния на характер трения.

Для полимеров в связи с их специфическими свойствами влияние смазки на коэффициент трения менее эффективно, чем для металлов, и традиционное применение смазки часто не приводит к ожидаемым результатам.

Фрикционное взаимодействие сопровождается износом — характерным поверхностным разрушением материалов или остаточным изменением формы поверхности тела, происходящих вследствие механического контактного воздействия.

Внешние проявления износа полимерных материалов в значительной степени схожи с поверхностными явлениями, происходящими при изнашивании металлов. Это послужило основанием для многих исследователей применить к полимерам известные из опыта изучения износостойкости металлов теории и классификации. Обычно изнашивание полимерных материалов происходит вследствие сильного адгезионного взаимодействия, усталости, макросдвига, абразивного, термического и термоокислительного воздействия, коррозии, кавитации и т. д.

Происходящие в процессе фрикционного взаимодействия механическое, физическое и химическое взаимодействия контактирующих поверхностей, разрушение и рекомбинация молекул и структурных образований приводят к изменению свойств граничных слоев и их разрушению.

Рассмотрим **основные механизмы изнашивания** полимерных материалов.

*Адгезионное изнашивание.* При определенных сочетаниях материалов и условиях эксплуатации наблюдается износ полимерных материалов, основу механизма которого составляет фрикционный перенос. В этом случае в локальных зонах фактического контакта происходит интенсивное молекулярное (адгезионное) взаимодействие, силы которого превосходят прочность связи между отдельными элементами надмолекулярных образований или полимерных молекул, находящихся в напряженно-деформированной зоне трения. В процессе ограниченного количества актов фрикционного взаимодействия происходит поверхностное разрушение материала, продукты которого образуют «третье тело» — более или менее устойчивые участки пленки (отдельные фрагменты материалов, молекул и т. д.), которые в большинстве случаев в результате дальнейшего фрикционного воздействия диспергируются и уносятся из зоны трения. Процесс этот может многократно повторяться.

Фрикционный перенос оказывает благоприятное влияние на скорость изнашивания кристаллизующихся полимеров линейного строения, склонных к пластическому характеру деформирования. Жесткие аморфные полимеры плохо образуют слои переноса и в условиях трения без смазки интенсивно изнашиваются.

*Усталостное изнашивание.* В процессе многократного фрикционного деформирования происходит утомление материала в поверхностных слоях, в них образуются усталостные микротрещины, развитие которых приводит к микровыкрошиванию материала. Процессы фрикционно-контактной усталости развиваются в зоне, соизмеримой с зоной взаимного внедрения микронеровностей взаимодействующих поверхностей. При качении с проскальзыванием (условия работы катков, роликов, зубьев звездочек цепных передач и зубчатых колес и т. д.) усталостный микроизнос может сопровождаться «питтингом» — усталостным макровыкрошиванием отдельных участков поверхности материалов на основе полимеров.

Согласно молекулярно-механической теории трения твердых тел, минимальное усталостное изнашивание реализуется при упругом характере контакта; интенсивность усталостного изнашивания при пластическом деформировании микронеровностей на несколько порядков выше. Такое соотношение сохраняется и для материалов на основе полимеров.

***Абразивное изнашивание.*** При определенном сочетании условий фрикционного нагружения и геометрии сопряженных поверхностей напряженно-деформированное состояние достигает предельных значений, превышающих прочностные характеристики в соответствующих локальных точках взаимодействующих материалов. Происходит фрикционное разрушение материалов вследствие однократных воздействий индентора. Самым характерным проявлением абразивного изнашивания является микрорезание.

Абразивное изнашивание полимеров сопровождается трибохимическими процессами, инициируемыми в основном деструкцией.

***Эрозионное изнашивание.*** Этот вид поверхностного разрушения материалов происходит в процессе скоростного обтекания изделия жидкой и газовой, в том числе высокотемпературной, средой (явление абляции), обычно содержащей абразивные частицы в виде песка, продуктов сгорания и т. д.

Эрозионное изнашивание наблюдается при эксплуатации водяных насосов, подводных деталей судов, лопаток дымососов и т. д.

Вообще же, **характер и интенсивность изнашивания материалов на основе полимеров** определяются следующими основными факторами:

- Природой материалов;
- Поверхностными и объемными механическими, физическими и химическими свойствами фрикционно-взаимодействующих тел;
- Параметрами нагружения (величина и закон изменения нагрузки, скорость перемещения, наличие вибраций);
- Макро- и микрогеометрией (форма, волнистость и шероховатость) контактирующих поверхностей;
- Фрикционной температурой и параметрами внешней среды (температура, атмосферное воздействие, наличие смазки и химически активных реагентов, облучение, вакуум и т. д.).

В области трения и износа материалов на основе полимеров накоплен большой опыт. Но, к сожалению, приходится еще раз констатировать, что отсутствие единых методов определяет сложность сопоставления и обобщения результатов научных работ и инженерных оценок материалов, что приводит к большим потерям времени и средств.

Полимерные материалы вследствие специфики строения проявляют в процессе фрикционного взаимодействия характерные особенности, которые нужно учитывать в методах и конструкциях трибометров, при выборе основных факторов и назначении режимов исследования, а также при создании единой международной трибометрической системы.

**БЛАГОДАРЮ  
ЗА  
ВНИМАНИЕ**