**ТРИБОМАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.**

**МАТЕРИАЛЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ.**

**АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.**

*Триботехническое материаловедение* (трибоматериаловедение) представляет раздел науки о строении и свойствах материалов и является связующим звеном между результатами трибологических теоретических исследований и комплексом знаний, составляющих основы триботехники.

Важными *материаловедческими задачами* являются:

– установление взаимосвязи между физико-химическими закономерностями трения (износа) и триботехническими свойствами материалов (коэффициентом трения и износостойкостью), а также структурным составом трибоматериалов;

– рациональный выбор материалов изнашиваемых деталей с учетом их эксплуатационных свойств;

– управление структурообразованием и механическими свойствами материалов с целью уменьшения трения и износа.

*Технические требования* к конструкционным материалам трибосистем обусловлены, прежде всего, характером подвижности соединений. Различают *неподвижные и подвижные соединения* (трибосопряжения).

Технические требования к материалам элементов *неподвижных соединений* обычно предъявляются к *прочностным свойствам* самих элементов и к их способности надежно контактировать в сопряжении. Эти требования, как правило, обеспечиваются при достаточных прочности и коэффициенте трения покоя (статическом коэффициенте трения) в условиях химической совместимости (минимальная диффузионная подвижность, незначительное различие электрохимических потенциалов и т.п.) элементов соединения. В отдельных случаях применяются прокладки с целью увеличения прочности сцепления, жесткости или герметичности.

*Характерным признаком неподвижных соединений* является то, что при выполнении перечисленных требований они практически не изнашиваются.

*К материалам подвижных соединений* предъявляются более жесткие и многообразные требования, обусловленные конструкционным многообразием узлов трения и отличиями в условиях их работы в машинах.

В связи с этим в каждом конкретном случае выбора конструкционных материалов для трибосопряжения выделяются основные *факторы, которые должны быть учтены*: нагрузочные характеристики (контактное давление, скорость скольжения), заданный технический ресурс (общая продолжительность работы узла трения в часах), температурные условия эксплуатации, наличие и вид смазочного материала, характер окружающей среды (атмосферный воздух или инертный газ и их влажность, вакуум), коэффициент (момент) трения, экономические и технические возможности использования материала, ограничения по массе узла трения, радиационная стойкость материалов и др.

*Характерный признак подвижных соединений* – материалы подвижных соединений изнашиваются.

В инженерной практике *материалы* принято различать по функциональному назначению и по их работоспособности в зависимости от фрикционной совместимости. Выбор конструкционного материала трибосопряжения решается двумя путями:

– применение традиционных «триботехнических материалов» (чугуны, бронзы и др.), которые удовлетворяют многообразию технических требований в определенных рамках;

– создание триботехнических материалов с дифференцированно повышенными триботехническими свойствами применительно к конкретным условиям эксплуатации.

**Классификация триботехнических материалов**

*Природа* фрикционности и антифрикционности обусловлена двойственной природой трения (наличие молекулярной и деформационной составляющих сил трения), а также тем, что в процессе трения твердых тел участвуют лишь поверхностные слои, свойства которых (твердость, прочность на сдвиг) могут заметно отличаться от объемных свойств. Совокупность этих требований, отличающих граничный слой от объема материала, сводится к необходимости создания на контакте положительного градиента механических свойств.

*Фрикционные материалы* должны иметь высокий коэффициент трения, а *антифрикционные*, наоборот, низкий. Условно принято называть материалы с коэффициентом трения *f* > 0,2 – *фрикционными*, а с *f*< 0,2 – *антифрикционными*.

*Фрикционный материал* *обладает* низким модулем упругости при упругом контакте или низкой твердостью – при пластическом. Это обеспечивает повышение адгезионной составляющей коэффициента трения за счет увеличения фактической площади контакта и высокое значение деформационной составляющей коэффициента трения за счет низкого модуля упругости и, соответственно, более глубокого внедрения неровностей.

У *антифрикционных материалов* площадь фактического контакта невелика и, по возможности, формируется за счет упругой деформации микронеровностей. Для этого антифрикционный материал *должен иметь* достаточную твердость и высокий модуль упругости. Следует стремиться к снижению относительного внедрения (*h/R*) и гистерезисных потерь (α<<1).

Кроме того, *фрикционные материалы* в ходе торможения *не должны* загораться открытым пламенем, набухать при наличии влаги, коэффициент трения должен укладываться в интервал 0,2–0,5.

*Антифрикционные материалы должны* быть прочными, обеспечивая преимущественно упругий контакт, сохранять работоспособность узла трения при надежной смазке, хорошо смачиваться смазочными материалами и иметь низкий коэффициент трения.

**Антифрикционные материалы**

*Антифрикционными* называются материалы, которые при трении даже в тяжелых условиях нагружения имеют сравнительно небольшой коэффициент трения и мало изнашиваются.

*Антифрикционные материалы* *используются* при создании подвижных соединений с низким трением и высокой износостойкостью: подшипников качения и скольжения, шарнирных соединений, направляющих для ползунов, эксцентриковых и кулачковых механизмов и т.д.

К *свойствам* антифрикционных материалов предъявляются следующие требования:

– низкий коэффициент трения;

– способность в процессе приработки создавать микрорельеф истираемой поверхности;

– способность к поглощению твердых частиц (шаржироваться);

– малая склонность к схватыванию (адгезии).

Для обеспечения этих свойств *структура* антифрикционных материалов должна быть *гетерогенной*, состоящей из мягкой и пластичной основы и включений из более твердых частиц. При скольжении твердые частицы обеспечивают сопротивление изнашиванию, а мягкая основа, прирабатываясь к контртелу (валу), образует микрорельеф из выступающих твердых включений, пор и впадин шероховатости, создающих как бы «капиллярные ходы» для циркуляции смазочного материала и выноса продукта износа.

Существуют следующие *виды антифрикционных материалов*:

– металлические,

– природные,

– полимерные,

– самосмазывающиеся композиции,

– металлокерамические.

**Металлические антифрикционные материалы**

– баббиты (названы в честь автора этих сплавов – Баббита). Первые баббиты – это *сплав олова, сурьмы и меди*, затем – баббиты на *основе свинца с добавлением меди, сурьмы, мышьяка, кадмия, никеля.* Наиболее широко применяются для вкладышей подшипников баббиты типа Б-83 (83% олова, остальные – сурьма и медь), они очень хорошо прирабатываются и имеют коэффициент трения *f*≈0,005 со смазкой.

– сплавы на основе меди:

– *бронза* – это сплав меди с оловом. Бронзы до настоящего времени являются основными материалами тихоходных подшипников скольжения, венцов червячных зубчатых колес.

– *латунь* – сплав меди с цинком. Латуни используются реже.

– сплавы на алюминиевой основе имеют два вида добавок: тугоплавкие (хром, железо, марганец, кремний) и легкоплавкие (олово, сурьма, свинец, кадмий, магний).

*Преимуществами* этих сплавов являются невысокая стоимость, прочность, хорошая теплопроводность, высокая коррозионная стойкость и низкая плотность.

*Недостатки* сплавов на алюминиевой основе – значительный коэффициент теплового расширения и способность к схватыванию.

В последние годы разработаны сплавы на основе алюминия с высоким содержанием свинца или олова. Такие сплавы обладают низким схватыванием и достаточно высокой задиростойкостью.

– чугуны. К антифрикционным чугунам относятся:

– *серый чугун* с пластинчатым графитом,

– *модифицированные чугуны* с глобулярным графитом,

– *ковкие чугуны*, обладающие высокой пластичностью.

С повышением содержания графита повышаются антифрикционные свойства чугуна. *Недостаток* применения чугунов – низкая износостойкость и высокий коэффициент трения, поэтому они применяют в малоответственных узлах трения при низких нагрузках и скоростях скольжения.

Чугуны находятся на границе фрикционных и антифрикционных материалов.

**Природные антифрикционные материалы**

К числу природных антифрикционных материалов относятся:

– древесина. В чистом виде древесина применяется редко, обычно она пропитывается различными смазками и после пропитки прессуется. *Применяется* для подшипников скольжения в качестве поверхности трения поперечным срезом, на которую выходят сокопроводящие каналы. По этим каналам смазка или самосмазывающиеся добавки выходят на контакт и образуют защитный слой.

*Преимущества* пропитанной древесины – легко прирабатывается, мало изнашивается, самосмазывается, имеет невысокую стоимость. *Недостатки* – низкая твердость и теплопроводность, набухает, впитывает влагу.

*Металлизация* древесины обычно сочетается с пропиткой полимерными смолами. Разработанные композиционные материалы на основе древесины имеют низкий и устойчивый коэффициент трения, малый износ.

– драгоценные камни и т. д. Драгоценные камни успешно применяются в качестве опор скольжения в часовой промышленности. Они имеют низкий коэффициент трения и высокую износостойкость.

**Полимерные антифрикционные материалы**

*Полимерные* антифрикционные материалы изготавливаются на основе полиамидов и карбоцепных полимеров, фенолформальдегидных и эпоксидных смол, фторопласта.

Применение пластмасс позволяет увеличить надежность и ресурс машин, улучшить их эксплуатационные, технико-экономические характеристики и технологичность, отказаться от дефицитных сплавов цветных металлов и снизить стоимость машин.

Полимеры применяются в трибологии благодаря таким характерным *свойствам*, как инертность ко многим реактивам; относительно низкая склонность к схватыванию; самосмазывающие свойства и низкий модуль упругости.

Полимеры (термопластичные и термореактивные) могут использоваться в качестве антифрикционных материалов, как в чистом виде, так и в виде *композиционных материалов* с различными наполнителями.

Из полимерных материалов изготовляют зубчатые колеса, шкивы, трущиеся элементы подшипников скольжения, кулачковых механизмов, направляющих, уплотнений, сепараторы шарикоподшипников, втулки шарниров и т.д.

**Термопластичные материалы**

*Антифрикционные материалы на основе термопластов* отличает высокая технологичность, низкая себестоимость, хорошие демпфирующие свойства. Детали из термопластов изготовляют высокопроизводительными методами – литьем под давлением и экструзией; крупногабаритные детали – центробежным литьем, ротационным формованием, нанесением антифрикционных покрытий из расплавов, порошков, дисперсий.

В качестве *антифрикционных термопластичных* материалов наиболее широко используют:

– *полиамиды* (капрон, П68, П6, П12 и др.), обладают низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью и работающие при температуре от –40 °С до +80 °С.

К *недостаткам* полиамидов следует отнести их относительно высокое водо- и маслопоглощение. Деталям из полиамидов свойственна хорошая сопротивляемость воздействию циклических нагрузок, возможность работы без смазки в паре с закаленной сталью. Коэффициент трения полиамидов по стали без смазки 0,1–0,2, со смазкой маслом – в пределах 0,05–0,10.

Для повышения механических свойств полиамиды *армируют* волокнистыми и другими материалами (мелкорубленное стекловолокно или измельченное углеродное волокно), а для улучшения антифрикционных свойств в них вводят различные *твердосмазочные графитоподобные* компоненты (графит, дисульфид молибдена, тальк, термоантрацит).

Температурный коэффициент линейного расширения и водопоглощение наполненных полиамидов в 1,5–4,0 раза меньше, коэффициент трения без смазки в 1,2–2,0 раза больше, а интенсивность изнашивания в 2–5 раз ниже, чем у ненаполненных полиамидов. Полиамиды применяют также в качестве тонкослойных покрытий металлических деталей.

– *ароматические полиамиды* (фенилон) применяются для изготовления деталей узлов трения, как в чистом виде, так и в виде *композиционных материалов*, наполненных фторопластом, графитом, дисульфидом молибдена и другими твердыми смазочными материалами.

Детали из ароматических полиамидов отличаются высокой прочностью и теплостойкостью, их изготавливают методами компрессионного и литьевого прессования.

*Фенилон* используют для изготовления подшипников скольжения, подпятников, уплотнений, зубчатых колес, сепараторов шарикоподшипников, деталей клапанов, кулачков и т.д.

– *фторопласты.* В приборо- и машиностроении для изготовления деталей узлов трения широко применяют *фторопласты* и *композиционные материалы* на их основе.

Фторопласты отличаются высокой химической стойкостью, высокой температуростойкостью (до 300 °С), а также сохраняют работоспособность, не охрупчиваясь при охлаждении до –250 °С. На фторопласты практически не действуют кислоты, окислители, щелочи, растворители. Коэффициент трения фторопластов, особенно фторопласта-4 (0,03–0,05) находится на уровне значений коэффициента трения металлических пар в гидродинамическом режиме скольжения.

Применение фторопластов в чистом виде без наполнителей весьма ограничено вследствие низкой прочности и износостойкости. В машиностроении используются в основном *композиционные**материалы*. Введение различных *наполнителей* (кокс, графит, дисульфид молибдена, металлические порошки, стекловолокно, углеродное волокно) в количестве 15–45% по массе позволяет значительно повысить прочность и износостойкость (в 10–100 раз и более).

*Использование* фторопластов в виде лаков, паст, суспензий для изготовления антифрикционных наполнителей для различных композиционных материалов на основе термопластических и термореактивных полимеров значительно снижает коэффициент трения и интенсивность изнашивания многих узлов трения.

В табл. представлены свойства и состав некоторых материалов на основе фторопластов.

– *поликарбонат* применяют в машино- и приборостроении, в радио- и электротехнической промышленности, для изготовления деталей точных станков, приборов, вычислительных машин и т.д. Поликарбонат стоек к атмосферным воздействиям, воды, водных растворов минеральных кислот и солей, окислителей, масел, в то же время он растворяется в ряде углеводородов (ацетон, толуол и др.), набухает в бензине.

Таблица

Характеристики материалов на основе фторопласта

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка  материала | Состав,  % | Плотность  ρ, кг/м3 | Прочность  σв, МПа | Твердость  НВ,  кг/мм2 | Тепло-проводность,  С*р*,  Вт/(м⋅к) | Коэффициент  трения,  ƒ | Интенсив-ность  изнашивания,  Jh ⋅109 |
| Ф-4 |  | 2,18÷2,21 | 14,0–35,0 | 30–40 | 0,2 | 0,04 | 80–100 |
| Ф4К20 | Ф-4, 80 Кокс, 20 |  |  |  |  | 0,06 | 0,75–1,0 |
| Ф4М15 | Ф-4, 85 MoS2,15 | 2,25 | 13,5 | 50 | — | 0,07 | 0,5–1,8 |
| Ф4С15 | Ф-4, 85 Стекло-волокно рубл. 15 | 2,20 | 11–14 | 50–60 | — | 0,08–0,09 | 1,7–2,0 |
| Ф4К15М5 | Ф-4, 80 Кокс, 15  MoS2, 5 | 2,19 | 14 | 40 | — | 0,08–0,09 | 1,7–2,0 |
| АМИП-15М  ФН-202 | Ф-4, Ситал, MoS2 Ф-4, никель, Нитрид бора, MoS2 | 2,25  2,40 | 10–14  11–18 | 46–80  40–70 | 0,35  0,30 | 0,1–0,12  0,12–0,15 | 1,8–2,1  28–32 |
| КРИОЛОН-3 | Ф-4, 82 Углеродное волокно, 5 MoS2, 3 | 2,21 | 22–25 | 55–60 | 0,36 | 0,08–0,1 | 0,5–0,7 |

Поликарбонат пригоден для работы в условиях низких и сверхнизких температур, в среде газообразного и жидкого азота, водорода и гелия при температуре до –253°С. Он обладает высокой ударной прочностью и стабильностью размеров деталей, малой ползучестью, однако плохо сопротивляется циклическим воздействиям нагрузки и имеет низкую усталостную прочность.

Для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости в поликарбонат вводят специальные наполнители и твердые смазки. Промышленность выпускает поликарбонат – *дифлон*, наполненный 25% по массе стекловолокном (дифлон СТН) и наполненный фторопластом (*дифлон* ДАК 8). Введение дисульфида молибдена, графита или 15-20% фторопласта - 4 снижает коэффициент трения в 2-3 раза.

К недостаткам поликарбоната следует отнести склонность к образованию микротрещин в поверхностном слое под влиянием остаточных напряжений после механической обработки и вследствие инородных включений и микропор.Поликарбонат перерабатывают литьем под давлением и экструзией.

Материалы на основе поликарбоната применяют в несмазываемых узлах трения для деталей уплотнений, клапанов и других элементов, работающих в вакууме, в инертной газовой и других средах при температурах –50–110°С.

В табл. приведены состав и свойства некоторых материалов на основе поликарбоната.

– *полиолефины*. Расширяется применение *полиолефинов* (*полиэтилен высокого давления, полипропилен)* в качестве антифрикционных материалов как в чистом виде, так и в композициях с наполнителями.

Термопластичный полиэтилен используется в качестве полимерной основы композиционных самосмазывающихся материалов благодаря своей низкой адгезионной способности, достаточно высокой механической прочности, химической инертности и хорошей технологичности. Наибольшее применение получил полиэтилен низкого давления (ПЭНД), имеющий более упорядоченную структуру макромолекул, более высокие степень кристалличности (75-85%), плотность, механическую прочность, модуль упругости при изгибе и теплостойкость.

Для улучшения триботехнических характеристик в ПЭНД вводят фторопласт-4, гексафторэтилен, дисульфид молибдена, графит, пентапласт, поликарпоамид, металлы.

В табл. 5.10. приведены основные физико-механические и триботехнические характеристики ПЭНД.

Таблица 5.8

Материалы на основе поликарбонатов

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка  материала | Основные компоненты | Плотность, г/см3 | Прочность, МПа | Ударная вязкость, кДж/м2 | Твердость НВ,  кг/мм2 | Предельная рабочая температура, °С | Метод  переработки |
| ДАК-8 | Поликарбонат, фторопласт-4 | 1,23 | 50÷55 | 105 | 87 | 115 | Литье под давлением |
| Эстеран-29 | Поликарбонат, МоS2 | 1,30 |  | 6 | 200 | 110 | Прессование |
| Эстеран-35 | Поликарбонат, МоS2 | 1,41 | 52 | 30÷70 | 140 | 110 | Литье под давлением |
| Эстеран-51 | Поликарбонат, МоS2 | 1,25 | 60 | 100÷200 | 100 | 110 | Литье под давлением |
| ДАК-12-3BN | Поликарбонат, BN | 1,20 | 55 |  | 90 | 110 | Литье под давлением |
| ДАК-УП5Д | Поликарбонат, графит | 1,25 | 90 |  |  |  | Литье под давлением |

*Таблица 5.10.*

Характеристики ПЭНД

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Плотность,  кг/м3 | Прочность,  МПа | Относи-тельное удлинение, % | Модуль упруости при растяжении, Мпа | Удар-  ная вяз-кость, кДж/м3 | Твердость  НВ,  кг/мм2 | Теплопроводность, Вт/(м⋅К) | Интенсивность изнашивания, ⋅10-9 | Коэф-фициент трения |
| 0,95 | 24÷42 | 50÷12000 | 650÷750 | 2÷120 | 49÷60 | 0,42÷0,44 | 1,75 | 0,1÷0,15 |

Экспериментальные исследования композиционных материалов на основе полиэтилена показывают, что повышение износостойкости в ряде случаев приводит к снижению прочности и модуля Юнга.

На основе полиолефинов создают *композиционные материалы*, вводя различные наполнители (сажу, каучук, стекловолокно, древесные опилки и т.д.), что позволяет получать материалы, обладающие высокой износостойкостью и коэффициентом трения 0,1–0,15.

К *недостаткам* свойств полиолефинов следует отнести низкую теплоемкость, так как детали узлов трения могут длительно эксплуатироваться при температуре не выше 60°С (кратковременно до 80°С). Это снижает возможность применения полиолефинов в машиностроении.

– *полиарилаты* – термопластичные полимеры, перерабатываются литьем под давлением или литьевым прессованием. Детали узлов трения из полиарилата могут работать длительно при температуре 160–180°С, кратковременно – при температуре 230°С. Наряду с высокой теплостойкостью полиарилат обладает высокой сопротивляемостью ионизирующим излучениям, хорошими диэлектрическими свойствами, достаточной химической стойкостью, морозостойкостью (могут работать при температуре до –100°С).

Для улучшения антифрикционных свойств полиарилаты *наполняют* твердыми смазочными материалами. Упомянутые свойства полиарилатов показывают, что это весьма перспективный материал для деталей узлов трения, особенно для несмазываемых.

Широкое применение в машино- и приборостроении находят антифрикционные самосмазывающиеся материалы на основе полиарилатов для изготовления деталей подшипников скольжения и качения, предназначенных для работы в глубоком вакууме без смазки.

Полиарилаты марок Ф-1, Ф-2, Д-3, Д-4 и др. в чистом виде имеют высокий коэффициент трения (0,35–0,40) и относительно невысокую износостойкость. С целью улучшения триботехнических характеристик и повышения теплостойкости в полиарилат добавляют фосфор, дисульфид молибдена, медь и серебро. Например, композиционный материал Делан-524 на основе полиарилата ДВ-101 с добавкой 15%масс дисульфида молибдена обладает самой высокой теплостойкостью среди полимерных материалов, перерабатываемых литьем под давлением.

Чистый полиарилат марки ДВ имеет нестабильные триботехнические характеристики из-за высокой величины адгезионной составляющей силы трения в результате наличия гидроксильных групп и макромолекул.

**Термореактивные полимеры**

*Термореактивные полимеры* обрабатываются преимущественно методами компрессионного и литьевого прессования, они более прочны и термостойки. Порошкообразные термореактивные композиции наносят на трущиеся поверхности деталей в виде тонких покрытий.

*В качестве антифрикционных термореактивных материалов* наиболее широко используют:

*– полиимиды* – это теплостойкие *термореактивные полимеры*, применяющиеся в качестве связующего при изготовлении композиционных антифрикционных материалов.

На основе полиимидов выпускают композиты, наполненные дисульфидом молибдена и графитом. В последние годы разработаны материалы, наполненные углеродным волокном. Эти материалы обладают высокой радиационной и химической стойкостью, прекрасными триботехническими свойствамии могут длительно эксплуатироваться при температуре 220–260°С. Изделия из таких материалов получают в основном прессованием с последующим спеканием.

Подшипники, изготовленные из наполненного полиимида с хаотично ориентированными графитированными волокнами имеют износостойкость в 7 раз большую, чем в случае ориентации графитовых волокон вдоль направления скольжения. Для работы в области криогенных температур применяют полиимиды, наполненные бронзой.

Недостатком материалов на основе полиимидов является большая скорость газовыделения, что в некоторых случаях ограничивает их использование в вакуумной технике, а также хрупкость, предъявляющая особые требования к технологии обработки деталей. Кроме того, эти материалы имеют высокую стоимость. Поэтому их применяют лишь для изготовления ответственных деталей подвижных сопряжений, работающих в экстремальных условиях.

Некоторые свойства полиимидов представлены в табл.

*– полиформальдегидные смолы* – термореактивные полимерные материалы, применяемые для изготовления деталей узлов трения в машиностроении (шестерни, втулки, муфты сцепления, подшипники, сепараторы и др.). Эти материалы обладают высокой стойкостью по отношению к органическим растворителям, действию горячей воды, растворов солей, морской воды, щелочей, растворов органических кислот.

Таблица 5.6.

**Характеристики материалов на основе полиимида**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка  материала | Состав | Плотность,  ρ, кг/м3 | Прочность  σв, МПа | Удельная  вязкость  КС, кДж/м3 | Твердость  НВ,  кг/мм2 | Предельная рабочая  температура, єС |
| ПА 6-1-203 | ПА, графит | 1,15 | 60÷72 | 18÷50 | 130 | -60 ÷ 165 |
| ЛАМ-1 | ПА, графит, алюминевая пудра | 1,18 | 53 | 20 | 200 | -60 ÷ 165 |
| ПА12-11-13 | ПА, MoS2 | 1,03 | 49 | 3-7 | 85 | -60 ÷ 165 |
| ПА66ПЭ | ПА, полиэтилен | 1,13 | 70 | 4 | 110 | - 40 ÷ 80 |
| ПА610-1-103 | ПА, графит | 1,12 | 55 | 50÷80 | — | до 120 |
| ПА610-1 | ПА,  стекловолокно, MoS2 | 1,35 | 125 | 20÷50 | — | до 120 |
| САМ-3 | ПА, добавки | 1,30 | 55 | 40÷50 | 130 | до 100 |
| САМ-5 | ПА, графит,  добавки | 1,16 | 47 | 35÷51 | 95 | до 100 |
| ПНС610-Т10 | ПА, тальк | 1,16 | 50÷60 | 50÷80 | — | до 120 |
| МАСЛЯНИТ  КСПЭ | ПА, стекловолокно, полиэтилен, медь | — | — | 30 | 80 | -50 ÷ 200 |

Изделиям из полиформальдегидов свойственна высокая жесткость, стабильность размеров, высокая износостойкость, стойкость к старению; их можно эксплуатировать при температуре до 120°С. Коэффициент трения чистого полиформальдегида по стали без смазки – 0,30–0,35.

Фенолформальдегидные полимеры (ФФП) широко применяют при создании антифрикционных полимерных материалов вследствие их повышенной термической и химической стойкости и износостойкости. Для повышения износостойкости и улучшения антифрикционных свойств полиформальдегид *наполняют* стекловолокном, фторопластом, дисульфидом молибдена, углеродным волокном, коксом, сажей, графитом. Введение в сополимер полиформальдегида 15–20% фторопласта снижает коэффициент трения в 1,5–2 раза, интенсивность изнашивания – в 3–4 раза.

Известны самосмазывающиеся материалы на основе ФФП следующих марок: АТМ-1, АТМ-1Т, Вилан-9Б, Синтек-2, АМАН-24. Материал марки АТМ-1 обладает высокой износостойкостью и теплопроводностью, но он хрупок, и поэтому его применяют в узлах трения, не работающих при ударных нагрузках. Для устранения этого недостатка используют волокнистые наполнители (углеродные и органические волокна) или ткани, например, в материалах марки Синтек.

Композиционные материалы на основе *эпоксидных смол* нашли применение для деталей трибосопряжений вследствие хорошей адгезии эпоксидных полимеров к металлам и другим материалам, высокой механической прочности, малой усадки и водопоглощения.

Наряду с традиционными наполнителями (графит, кокс, дисульфит молибдена, оксиды металлов, различные волокнистые материалы и т.п.) в эпоксидные смолы вводят олигомеры, полиэтилен, кремнийорганические смолы, двуокись титана и другие специальные добавки, что значительно увеличивает твердость, жесткость, нагрузочную способность и износостойкость композиционных материалов. Свойства некоторых антифрикционных материалов на основе эпоксидных смол приведены в табл. 5.11.

Наиболее широкое применение получили композиционные материалы марок АМС-1, АМС-3, АМС-5М, отличающиеся высокой механической прочностью, износостойкостью, термостойкостью и низким коэффициентом трения. Из этих материалов изготовляют поршневые кольца компрессоров, работающих без смазки, торцевые уплотнения, подшипники скольжения для узлов сухого трения с нормальной влажностью при повышенных температурах, лопатки воздушных ротационных насосов.

*Таблица 5.11*

**Материалы на эпоксидной основе**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка  материала | Основные  компоненты | Плотность,  кг/м3 | Предел прочности МПа | Номинальное контактное давление, МПа | Скорость скольжения, м/с | Интенсивность изнашивания, 10-8 | Коэффициент  трения |
| АМС-1 | Эпоксикремний - органич. смола, кокс, нитрид бора | 1,77 | — | 5,0 | 0,5 | 0,1 | 0,08 |
| АМС-3 | Эпоксикремний – орга-  нич. смола, электродный графит, кристаллический графит | 1,79 | — | 5,0 | 0,5 | 0,22 | 0.10 |
| АМС-5М | Эпоксикремний - органич. смола, углеродная ткань | 1,23 | — | 2,0 | 0,5 | 0,05 | 0,11 |
| ЭДМА - 10 | Эпоксидная смола,  наполнитель | 1.90 | 8,0 | 2,0 | 0.06 | 2.0 | 0,23 |
| Э10Н5 | Эпоксидная смола,  графит, никель | 1,35 | 9.5 | 0,65 | 1,0 | 1,2 | 0,35 |

Антифрикционные полимерные материалы на основе реактопластов являются одним из самых перспективных конструкционных материалов.

**Самосмазывающиеся полимерные композиционные материалы**.

В машиностроении разработан целый ряд конструкций подшипников, передач, направляющих и уплотнений, в которых смазывание обеспечивается благодаря специальным элементам конструкции (деталям), изготовленным из так называемых полимерных самосмазывающихся материалов.

По составу все полимерные самосмазывающиеся материалы можно разделить на следующие группы:

– композиции, содержащие главным образом антифрикционные наполнители, полимерные связующие и пластификаторы (дополнительные смазочные материалы);

– композиции с комплексными наполнителями, улучшающими физико-механические и триботехнические свойства материалов;

– комбинированные самосмазывающиеся материалы типа металлополимерной ленты, в которой совмещаются преимущества составных частей металла, как несущей и теплопроводной основы и полимера, как антифрикционного самосмазывающегося слоя, обеспечивающего надежную защиту поверхности трения от схватывания.

В самосмазывающиеся материалы включают обычно в качестве основного компонента графит и дисульфиды, диселениды, дителуриды металлов и другие соединения.

Все перечисленные твердые смазки имеют слоистое строение. Поэтому слои материалов легко скользят относительно друг друга. На практике наибольшее распространение получили материалы на основе графита и дисульфида молибдена. Из молибденита и графита в смеси с другими компонентами изготавливают сложные комбинированные самосмазочные композиции (в России ПАМ-15- 69, ПАМ-15-67). Одна из американских фирм выпускает материал, состоящий из графита, молибденита, золота и силиката натрия.

Высоким качеством обладают антифрикционные материалы типа АМАН. Эти материалы являются композицией полимерных смол с твердосмазочными компонентами и металлами. Они изготавливаются методом прессования и эпоксидными клеями приклеиваются к несущей поверхности деталей узлов трения. Эти материалы имеют высокие ме-

Таблица 5.7.

Характеристики материалов на основе полиимида

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка  материала | Состав  материала | Плотность ρ, г/см3 | Прочность,  σв, МПа | Ударная вязкость КС, кДж/м2 | Твердость НВ,  кг/мм2 | Предельная рабочая  температура, °С |
| Полиар-2 | ПМ-67, МоS2 | 1,3 | — | 50 | 140 | -196 ÷300 |
| Тесан-38 | ПМ-69, МоS2 | 1,3 | — | 30 | 140 | -196 ÷ 250 |
| ПМ-67-ДИ-3 | ПМ-67, МоS2 | 1,43 | 90÷130 | 20÷70 | 210÷310 | -196 ÷ 250 |
| ПМ-69-ДМ-3 | ПМ-67, МоS2 | 1,45 | 85÷120 | 30÷50 | 210÷280 | до 250 |
| ПМ-67-Г10 | ПМ-67,  графит | 1,45 | 70÷98 | 8÷30 | 230÷330 | до 250 |
| ПМ-69-Г5 | ПМ-69,  графит | 1,47 | 70÷90 | 20÷40 | 220÷330 | до 250 |
| ПАМ 15-67 | ПМ-67,  графит | 1,42 | 80÷100 | 16÷30 | 300 | -196 ÷ 250 |
| ПАМ 15-69 | ПМ-69,  графит | 1,42 | 65÷80 | 7,8 | 330 | -196 ÷ 250 |
| ПАМ 50-67 | ПМ-7, графит,  нитрид бора | 1,62 | 44÷45 | 1,5÷5,0 | 270÷300 | -196 ÷ 250 |
| ПАМ 50-69 | ПМ-69, графит,  нитрид бора | 1,5÷1,6 | 30÷38 | 5,0 | 300 | -196 ÷ 250 |

ханические, тепловые, антифрикционные характеристики и применяются широко в машиностроении в качестве подшипников и т.д.

В табл. 5.7. приведены составы и основные свойства самосмазывающихся композиционных материалов на основе полиимидов. Коэффициент трения этих материалов с увеличением скорости скольжения снижается. Детали узлов трения получают горячим прессованием. Для изготовления пористых изделий, например подшипников, к полиимиду добавляют полиформальдегид.

**Металлокерамические антифрикционные материалы**

Одним из направлений получения антифрикционных материалов является создание порошковых антифрикционных композитов. Изделия (втулки, вкладыши подшипников) получают методом порошковой металлургии. Сначала составляется смесь из порошков необходимых веществ, которая после тщательного перемешивания прессуется в виде изделия и спекается. Если это необходимо, то осуществляется механическая отделочная обработка изделия и насыщение пор смазкой. Наиболее распространены материалы на основе меди и железа.

Антифрикционная металлокерамика обладает малым коэффициентом трения и высокой износостойкостью, может работать без смазки в условиях загрязнения твердыми частицами.

Выпускаются пористые сплавы на основе:

–железа и графита (железографит), Железографит наиболее распространен и выдерживает давление до 15 МПа при температуре 80–100°С.

– бронзы и графита (бронзографит),

– алюминия и графита (алюминографит),

– серебра и меди с графитом и др.

Вместо графита могут использоваться и другие твердые (слоистые) смазки: молибденит, диселениды металлов, нитрид бора.

Сплавы на основе железа, меди и других металлов *пропитывают* различными полимерами, в основном фторопластом. Используются такие материалы при тех же условиях, что и железографит при температурах до 150°С в виде двухслойных (свинцовая бронза) или трехслойных лент. При трении при достаточно податливой основе на поверхности металлокерамического материала образуется слой, обладающий положительным градиентом механических свойств с низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. Из этих материалов изготавливают подшипники скольжения, сепараторы, уплотнения, подвижные электрические контакты и т.д.

Материалы на основе меди получили широкое применение из-за хороших антифрикционных свойств и высокой электропроводности, например, в скользящих электроконтактах в щётко-коллекторных узлах электродвигателей и генераторов и т.д. Типичным представителем этой группы являются *медно-графитовые компоненты* с содержанием графита до 75 %.

В качестве подшипникового материала также используются пористые *оловянные бронзы*. Они применяются в подшипниках, работающих в легком режиме при небольших скоростях скольжения (менее 1,5 м/с) и номинальных давлениях (0,5 – 1 МПа). Благодаря смазке, содержащейся в порах, они могут работать без наполнения маслом до 5000 ч при температуре от –60ºС до 120ºС с коэффициентом трения 0,01–0,04. Эти подшипники используются в маломощных электромоторах и генераторах, пусковых установках ДВС. В табл. 5.2 приведены сведения о некоторых оловянистых бронзах.

Таблица 5.2.

Свойства оловянистых бронз

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка | Массовая  доля Sn, % | Плотность, кг/м3 | Пористость,  % | Предел  прочности σв, МПа | Твердость  НВ, МПа |
| Бр010 | 10 | 6–7 | 20–30 | 20–35 | 60–75 |
| Ст100 США) | 9,5–10,5 | 6,4–7,2 | – | 40–50 | 100–120 |
| SM500 (ФРГ) | 10 | 5,6–11 | – | – | – |

В подшипниках мотоциклов, тракторов, насосов и др. используются бронзографитные материалы. Они выдерживают большие нагрузки и скорости скольжения, чем бронзы.

В двигателях грузовых автомобилей, судовых и железнодорожных дизелях в России и ведущих странах зарубежья используются свинцовистые бронзы.

В последнее время в России и за рубежом используются металлофторопластовые материалы. Они обладают широким диапазоном эксплуатационных свойств, способны работать без смазки в агрессивных средах, в вакууме, при температуре от –200ºС до 300ºС. Подшипниковые вкладыши состоят из стальной основы, тонкого припеченного слоя высокооловянистой бронзы (до 0,3 мм), поры которого заполнены смесью фторопласта с дисульфидом молибдена.

Помимо сплавов на медной основе все больше распространяются антифрикционные *алюминиевые сплавы*. Технология изготовления вкладышей такая же, как при применении медных сплавов. Поры пропитываются маслом. Используются твердосмазочные добавки.

Наиболее распространены в общем машиностроении (сельхозмашины, дорожно-строительные механизмы и т.д.) материалы на основе *железа*. В шихту, также как и у медных сплавов, вводится графит, сернистый цинк, дисульфид молибдена, нитрид бора. Поры спрессованного материала заполняются маслом. Чаще всего применяются железографитовые втулки. С ростом содержания графита улучшаются антифрикционные свойства, однако падает прочность. Содержание графита обычно не превышает 10 % от общей массы. В качестве легирующих элементов к железу добавляют медь, серу, фосфор. Медь повышает прочность и улучшает спекаемость. Её содержание колеблется от 0,5 до 20 %.

Применение железографитовых подшипников позволяет экономить большое количество сплавов цветных металлов, бронзы, баббита. В ряде случаев железографитовые подшипники скольжения могут успешно заменить шариковые и роликовые подшипники качения. Наличие графита и запас жидкой смазки в порах придают металлокерамическим подшипникам свойства самосмазывающихся, что уменьшает опасность выхода из строя узлов трения из-за недостаточной смазки.

В настоящее время решена задача изготовления металлокерамических поршневых колец для двигателей внутреннего сгорания. Такие поршневые кольца имеют более высокую износостойкость по сравнению с обычными чугунными. Они работают до выхода из строя на 30-45 тыс. км пробега автомашин больше, чем чугунные, и на 30 % меньше изнашивают цилиндры двигателя.

Расширяется также применение пористых спеченных подшипников, пропитанных фторопластом. Такие подшипники весьма перспективны для несмазываемых опор скольжения благодаря высоким антифрикционным свойствам фторопласта. Коэффициент трения подшипников, пропитанных фторопластом, без смазки составляет примерно 0,05. Они надежно работают при температурах до 280 ºС в кислых и щелочных средах.

Разработаны антифрикционные спеченные материалы для подшипников газовых и паровых турбин, работающих при высоких температурах. Для получения этих деталей используют порошки хромоникелевых сталей типа Х18Н15, Х3Н18 с добавками в шихту дисульфида молибдена. Спеченные материалы имеют плотность, превышающую 90 %. Более низкая стоимость пористых спеченных подшипниковых материалов по сравнению с бронзой и баббитом стимулирует дальнейшее развитие этого направления разработки триботехнических материалов и технологий.

**Антифрикционные покрытия**

В современной технике получили широкое применение *антифрикционные покрыт*ия,наносимые на поверхность деталей трибосопряжения.

Покрытия могут быть полимерными, металлическими, из твердых смазок, из оксидов или других соединений. Они обычно не нуждаются в смазке.

Пленка должна иметь высокую адгезию к поверхности детали и близкий к материалу детали коэффициент теплового расширения, хорошую теплопроводность, низкий коэффициент трения и высокую износостойкость.

Технологии покрытий довольно сложны и постоянно совершенствуются.