**Материалы и расчетные характеристики подшипников качения для условия сухого трения.**

Курсовая работа.

Студент: Трошев Р.А.

Балтийский Государственный Технический Университет им Д.Ф.Устинова.

Кафедра «Детали машин»

Санкт-Петербург

2005 г

**Подшипники качения для условия сухого трения, материалы и конструктивные особенности.**

**Введение.**

Директивами XXIII съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1966 – 1970гг. предусматривается выпуск машин и приборов новых конструкций, предназначенных для эксплуатации в условия низких температур, коррозионных сред, вакуума, а так же расширение производства специальных подшипников. Эти подшипники, способные работать в условия сухого трения, позволяют получать на обрабатывающих машинах продукцию высокой кондиционности (текстильное, обувное, пищевое, фармацевтическое и другое оборудование), удешевляют и упрощают конструкции машин и агрегатов и их обслуживание, повышают надежность и долговечность машин, работающих в тяжелых производственных условиях, что дает значительный экономических эффект.

Применение подшипников сухого трения стало возможно только с появлением новых материалов, позволяющих использовать их в трущихся парах без смазки.

**Применение подшипников сухого трения.**

Сухое трение появляться при взаимодействии поверхностей, не разделенных слоем жидкой смазки. В случае очень тонкого слоя жидкости на поверхности (порядка 0,1мк) или адсорбированных капель во время взаимодействия возникает граничное трение, переходящее с увеличением толщины смазочного слоя в полужидкостное. При полужидкостном поверхности не полностью разделены и могут касаться выступами шероховатости. С увеличением толщины смазочного слоя поверхности полностью разделяются жидкой смазкой и не вступают в контакт друг с другом. Такое трение, определяемое силами вязкости, называется жидкостным.

Работа машин и агрегатов современной техники происходит со всё возрастающими скоростями и давлениями, высокими и низкими температурами в вакууме. Повышаются требования к надежности и долговечности наряду со стремлением к упрощению и удешевлению разрабатываемых конструкций, к кондиционности вырабатываемых продуктов.

Одним и средств обеспечения работы машин в этих условиях является использование подшипников сухого трения, некоторые области применения которых рассмотрены ниже.

Известно, что масла и смазочные материалы в настоящее время работоспособны в диапазоне температур примерно –30 до +300°С. При более высоких температурах (600°С и выше) подшипники жидкостного трения не обеспечиваются смазкой. В этих условиях подшипники сухого трения, позволяющие работать с температурами свыше 400°С, значительно у прощают конструкции машин, а иногда являются единственными приемлемыми, с другой стороны конструкция машин, например насосов для перекачивания сжиженных газов, происходит при криогенных температурах (-183 … - 196°С). Криогенные жидкости (азот, кислород и т.п.) не обладают достаточными смазывающими свойствами из-за малой вязкости и низкой температуры кипения, а отсутствие лучших смазок ставит задачу использования подшипников, способных работать со смазкой сжиженными газами и режиме сухого трения.

Во время работы подшипников с высокими нагрузками нет условий для образования гидродинамической смазки. Смазочное вещество выдавливается из зоны трения, особенно когда нагрузка приближается к пределу текучести материала.

Низкие скорости в подшипнике также вызывают нарушение гидродинамической смазки, так как давление в смазочном клине оказывается недостаточным для восприятия нагрузки. Разрыв масленой пленки приводит в зацеплению микронеровностей и задирам поверхностей. В этих условиях для уменьшения задиров, улучшения приработки и снижение износа целесообразно применять подшипники сухого трения (узлы трения оборудования химической промышленности, автомобилей, прокатных станков и т.п.).

Использование обычных смазок в подшипниках, работающих в вакууме рентгеновских спектрометров, электровакуумных устройств и другой аппаратуре неприемлемо. Вследствие высокой упругости паров большинство жидкостей и смазок в вакууме испаряется и теряет свои смазывающие свойства. Действие температуры еще более усугубляет этот процесс. В данном случае никакие уплотнения не способны поддержать вакуум на определенном уровне. Поэтому применение подшипников без подвода смазок в условиях вакуума является актуальным вопросом вакуумной техники.

В ряде отраслей химической промышленности (пищевой, текстильной, химической) применение минеральных смазок приводит к загрязнению вырабатываемого продукта маслом, нарушению его стерильности.

В химической промышленности по технологическим соображениям загрязнения продукта минеральной смазкой иногда совершенно недопустимо (попадание масла в кислород, фтористый водород и т.п.)

Подшипники качения со смазкой маловязкими средами (керосин, бензин, углеводороды, вода) используются в агрегатах химической промышленности, в топливной аппаратуре и т.п. маловязкие жидкости обладают плохой смазывающей способностью. В процессе эксплуатации возможен переход к полусухому и сухому трению, что значительно снижает долговечность и надежность опорных узлов. Применение самосмазывающих подшипников в этом случае повышается работоспособность опор, позволяет использовать технологические жидкости для смазки.

Самосмазывающиеся материалы для подшипников становятся все более необходимыми, так как иногда работа современных машин протекает при экстремальных климатических условиях. Обычные смазочные масла и консистентные смазки требуют особого контроля в случае изменения температуры. Резкие суточные колебания температуры приводят к быстрому разрушению минеральных смазок, вследствие чего усложняется обслуживание машин.

Работа подшипников дорожных и сельскохозяйственных машин, автомобилей, химических аппаратов и машин и др. в агрессивной среде требует подбора износоустойчивых материалов, способных противостоять абразивному изнашиванию и поглощать абразивные частицы. К ним относятся самосмазывающиеся композиции и материалы, работающие без минеральных смазок, мало эффективных из-за загрязнения абразивной пылью.

В подшипниковых узлах оборудования атомных реакторов, работающих на трение в облучающих устройствах, бытовых машин, киноаппаратуры и т.п. повторная смазка совсем исключена ввиду невозможного доступа обслуживающего персонала во время работы или она затруднена. В этих случаях применение подшипников сухого трения облегчает эксплуатацию оборудования.

Стоимость маслосистемы для жидкой смазки может быть относительно высокой по сравнению с самой машины, а габариты сравнительно большими. Применение уплотнительных устройств для разделения рабочих и масляных полостей (газ и масло, пар и масло и т.д.) усложняет конструкцию. Это особенно относится к малогабаритным индивидуальным установкам (микронагнетателям, герметическим газодувкам и т.п.). Здесь использование подшипников сухого трения дает высоких экономических эффект от замены дефицитных материалов подшипников жидкостного трения (бронза, баббит и т.п.) на более дешевые самосмазывающиеся материалы и создание более простой конструкции машины.

Вопрос применения подшипников сухого трения затрагивает многие отрасли современного машиностроения. К нему все больше обращаются конструкторы, создающие новую технику.

**Теория сухого трения.**

Работу подшипников без смазки следует рассматривать как взаимодействие поверхностей при сухо трении. В этом случае в отличие от подшипников жидкостного трения контактирующие поверхности не разделены искусственно созданной масляной пленкой, полностью устраняющей контакт между ними. Однако нельзя считать, что не смазанные маслом поверхности вступают в непосредственный контакт друг с другом.

В реальных условиях поверхность материала адсорбирует газы, пары, влагу окружающей среды, а также зачастую бывает покрыта окисным слоем. Даже незначительно присутствие этих веществ совершенно изменяет картину трения.

Боуден с сотрудниками измерили коэффициенты трения для чистых металлов. С их поверхности атомы воздуха и окисные пленки были удалены нагреванием в вакууме. Полученные значения коэффициента трения колебались от 1 до 5, а для некоторых пар достигали 10 и выше, тогда как в обычных условиях они составляли менее 1. Поэтому при нормальных условиях работы пары трения всухую, окисные слои и адсорбированные газы предотвращают контакт, выступая в роли сухой смазки. Таким же образом действуют и специально внесенные в зону трения твердые и газообразные вещества, разделяющие контактирующие поверхности и уменьшающие трение и износ. В связи с этим сухое трение в реальных условиях следует рассматривать как взаимодействие трущихся поверхностей с твердыми и газообразными смазками, что целиком относятся к подшипникам без смазки, самосмазывающимся и подшипникам сухого трения.

**Выбор материалов для подшипников сухого трения.**

Вследствие недостаточно обоснованного выбора материалов для подшипников и смазочных материалов сроки службы машин и агрегатов уменьшаются, возрастает количество ремонтных работ, а также потери вырабатываемого продукта из-за дополнительных простоев оборудования. От выбранного материала зависит конструктивное оформление подшипников скольжения. Конструкции подшипников разрабатываются исходя из свойств материалов таким образом, чтобы свести до минимума или полностью устранить вредное влияние отрицательных характеристик материала (хрупкость, низкую теплопроводность, гигроскопичность, нестабильность размеров во времени и др.) и наиболее полно использовать низкий коэффициент трения и высокую износостойкость материала. Конструктивные приемы являются эффективным средством повышения срок службы подшипников.

При выборе материала для подшипников сухого трения основное значение имеет их износостойкость, а, следовательно, срок службы. Износ опорных поверхностей подшипников сверх допустимой величины нарушает точность взаимного расположения вала с рабочими органами и корпуса, приводит его динамической неустойчивости и вибрации, возможности разрушения подшипника на ходу. Износ увеличивается с повышением давления (контактных напряжений), а коэффициент трения снижается либо остается постоянным до критического значения, соответствующего катастрофическому износу. Физико-механические свойства материала подшипника должны обеспечивать наиболее высокую износостойкость и упругий контакт при трении, минимальный коэффициент трения, отсутствие склонности к задиру, хорошую прирабатываемость. Кроме этого, материал должен обладать достаточно механической прочностью, технологичностью и стойкостью к воздействию окружающей среды.

Величина предельно допустимой температуры для выбираемого материала, при которой происходит разрушение или резкое падение механических характеристик, должна быть больше температуры окружающей среды не менее чем на 50 - 80°С. Характер динамической нагрузки должен соответствовать прочностным свойствам выбранного материала. Не допускается применение хрупких материалов, имеющих низкую ударную вязкость (менее 5кгс ⋅ см/см²) при ударных и вибрационных нагрузках. Применение материала должно быть экономически обосновано как в сфере изготовления, так и в сфере эксплуатации.

Материал подшипника должен быть малодефицитным, его технологическая обработка проста и доступна. Производство и механическая обработка некоторых материалов для подшипников сухого трения связана со сложной технологией, требующей специального оборудования. Их изготовление возможно лишь на специальных участках. Это необходимо учитывать при конструировании машин, требующих переодических ремонтов в нестационарных условиях.

Для повышения износостойкости подшипников большое значение имеют мероприятия, связанные с обслуживанием и эксплуатацией: подача смазки, отсутствие утечек (плотность системы), соблюдение теплового режима, борьба с абразивным изнашиванием в условиях сухого и граничного трения с принятием мер к устранению абразивных частиц из зоны трения. Тепловой режим должен быть связан с теплостойкостью материала и должен обеспечиваются подачей охлаждающей воды, холодного смазочного вещества, циркуляцией рабочей жидкости, тепловой изоляцией и т.п.

Материалы для подшипников сухого трения выбираются в зависимости от своей рабочей среды, её температуры и давления, от скорости скольжения по валу, от реакции в опоре (нагрузки), от теплоотвода из зоны трения и требующего срока службы в эксплуатации.

Материалы, применяемые для подшипников, подразделяются на следующие группы:

А – металлические материалы (коррозионно-стойкие стали и сплавы, углеродистые и легированные стали, чугуны, цветные металлы, наплавочные сплавы);

Б – материалы на основе углерода;

В – неметаллические высокотвердые материалы;

Г – материалы на основе полимеров, в том числе металлополимерные.

Материалы для подшипников рекомендуется выбирать в следующем порядке, произведя затем проверочный расчет подшипника. В зависимости от значения и химической стойкости в рабочей среде выбирают для элементов трущейся пары материала или группы А с коррозионной стойкостью не ниже 4 балла по ГОСТ 13819-68 (скорость коррозии 0,01 – 0,05 мм/год) или Б,В,Г у которых не более ±3% изменения массы за 1000 часов испытаний в рабочей среде (по ГОСТ 12020-72).

Не допускаются к применению материалы, которые в рабочей среде подвержены коррозионному растрескиванию, межкристаллитной, щелевой и структурной коррозии. Изменение литейных величин образца при испытаниях не должно выводить их за пределы поля допусков, предусмотренного в конструкторской документации, относительное изменение механических свойств при испытаниях в течение 1000ч не должно выходить за пределы ±10%, растрескивание образцов при испытании не допускается.

С технологической точки зрения наиболее эффективным является выбор материала шеек вала с повышенной исходной твердостью и износостойкостью поверхностного слоя, рациональной шероховатостью, высокими жесткостью и усталостной прочностью вала и сохранением соосности опор. Многочисленными исследованиями установлено, что при сухом трении и при работе на малых скоростях скольжения более твердые материалы изнашиваются меньше, чем пластичные.

Ресурс работы подшипника определяется из формулы:

Т = h/u ;

, где h – максимально допустимая величина износа подшипника, устанавливаемая при конструировании машин, мм ; u – скорость изнашивания при промышленных испытаниях, мм/ч.

К подшипникам качения, предназначенным для работы в режиме сухого трения, современная техника предъявляет особые требования. В условиях вакуума, повышенной температуры, коррозионных сред смазывание подшипников минеральными смазывающими веществам невозможно, а материалы подшипников должны дополнительно обладать коррозионной стойкостью в различных жидкостях, парах и газах, не обладающих смазывающими свойствами, но являющихся рабочими средами и проникающие к подшипникам.

**5. Основы расчета подшипников сухого трения.**

Целью расчета подшипника сухого трения является установление допустимых значений действующей нагрузки, скорости скольжения, температуры и других параметров и их соответствия физико-механическим свойствам выбранных материалов пары трения втулка — вал при принятых геометрических соотношениях, обеспечивающих наибольший срок службы и достаточно высокие антифрикционные свойства. Речь идет о том, чтобы в отсутствии смазывающего материала на трущейся поверхности получить наибольшую износостойкость подшипника и обеспечить минимальное изменение его геометрических размеров во времени с учетом действующих условий эксплуатации. При конструктивной разработке машины или агрегата производится расчет динамической системы вала, в результате которого определяются нагрузка, действующая на подшипник (реакция в опоре), N (кгс), диаметр шейки вала d (в м) и частота вращения вала п (об/мин). Кроме этих величин из технического задания на проектирование известными являются окружающая среда и ее свойства (коррозионная активность, наличие абразивных взвесей и их размеры, вязкость, радиоактивное воздействие и др.), температура окружающей среды, вид нагрузки (спокойная, ударная, вибрационная и т. п.).

Используя имеющиеся данные, а также известные физико-механические свойства материалов, которые могут применяться для подшипников сухого трения, производят предварительный выбор материала подшипника. При выборе материала подшипника руководствуются соображениями, изложенными описанными ранее. Затем определяют геометрические размеры подшипника: длину подшипника l, толщину стенки подшипника s и особенности его конструктивного устройства (вид крепления втулки, установку в металлическую обойму, фаски и т. д.).

Длину подшипника вычисляют по формуле

L=πNn/(600pv)

Полученное значение длины подшипника сопоставляют со стандартными размерами (например, по ГОСТ 1978 73). C другой стороны, длина подшипника зависит от оптимального отношения длины к диаметру l/d, которое устанавливается практикой эксплуатации подшипников.

При выборе длины l необходимо учитывать, что при её, уменьшении снижается несущая способность подшипника. С увеличением длины возрастают потери на трение, увеличивается, неравномерность распределения нагрузки по длине, происходит более сильный нагрев подшипника. Толщина стенки подшипника также выбирается по рекомендациям из соображений конструктивной прочности, технологичности изготовления и лучшего отвода тепла. Последующим расчетом отношение l/d корректируется. В настоящее время предложено несколько методов расчета подшипников сухого трения, изложенных ниже.

**5.1 Расчет по критерию прочности.**

Этот расчет заключается в обеспечении необходимой прочности подшипника, материал которого подвергается объемному сжатию под действием нагрузки. К таким материалам относятся, например, пластмассы.

За критерий прочности или несущую способность подшипника принимают среднее давление

p = N/S,

где S — расчетная площадь контакта, условно принимаемая равной площади проекции подшипника, см2,

S = ld.

Подставляя (1е) во (2е), имеем

p = N/(ld).

Несущая способность подшипника — величина условная, так как контакт подшипника и вала происходит на дуге менее 180° и фактическая площадь контакта меньше значения, принимаемого в расчете. Точно определить ее расчетным путем сложно из-за ряда факторов, которые трудно учесть в инженерном расчете.

Для подшипников сухого трения с твердосмазочными покрытиями Ю. Н. Дроздовым и С. Л. Гафнером получена формула для определения среднего давления с учетом действительной протяженности контактной зоны подшипника и вала:

P=(N/ld)⋅(1/sinϕо)

где ϕо — средний полуугол контакта, ... °,

ϕо=(ϕон+ϕок)/2

где ϕон — начальный полуугол контакта, определяемый по начальным геометрическим размерам подшипника; ϕок —конечный полуугол контакта, определяемый из условия увеличения радиального зазора на толщину изношенного слоя.

Пренебрегая упругими свойствами покрытия из-за малой его толщины, средний полуугол контакта определяют по формуле



ϕо=

где μ1 и μ2 — коэффициенты Пуассона для подшипника и вала соответственно; ε — радиальный зазор (назначается по ходовой посадке 2-го класса точности);

ψ = E1/E2

где E1, E2 — модули упругости для подшипника и вала соответственно; k — показатель степени определяется по следующим формулам:

При 10 > ψ > 0,1

k = m1μ1 + m2μ2 + n0,

где m1 = 0,08 — 0,05 lg ψ>; m2 = 0,20 + 0,21 lg ψ; n0 — коэффициент, определяемый по графику;

при ψ >10 k = 0,41 μ2 +0,448;

при ψ <0,1 k = 0,16 μ1+ 0,554.

Критерий прочности (кгс/см2) определяется зависимостью

p≤[p]

где [p] — предельно допускаемое давление для выбранного материала подшипника.

Величина предельно допускаемого давления для каждого

материала определяется экспериментально и характеризует начало катастрофического разрушения, сопровождающегося интенсивным износом при принятой постоянной скорости скольжения. Как показывают испытания с увеличением скорости скольжения предельно допускаемое давление падает в основном из-за повышения температуры в зоне контакта и изменения, вследствие этого, физико-механических свойств материала. Поэтому несущая способность подшипника ограничивается также предельно допускаемой скоростью скольжения [v]. Несущая способность р = 0, когда скорость скольжения

v ≥ [v].

Величина [v] для каждого материала также определяется экспериментально и наряду с [p] характеризует его антифрикционные свойства. Для нормальной работы подшипника сухого трения необходимо соблюдение условия

v ≤ [v].

где скорость скольжения (м/с) на поверхности шейки вала

V = πdn/60

Если вал совершает колебательное движение, то скорость скольжения описывается уравнением

v= vαsinωt

где va — амплитудное значение скорости скольжения; ω — угловая частота колебаний, 1/с,

ω = πn/30

Амплитудная скорость скольжения определяется по формуле

va = αω d/2,

где α — угловая амплитуда колебательного движения.

Значения [р] и [v] задаются в виде справочных данных.

5.2. Расчет по критерию износостойкости.

Связь между допустимой скоростью скольжения [v] и сроком службы подшипника Г молено установить, используя формулу И. В. Крагельского для интенсивности изнашивания трущейся поверхности, определяемой как объем материала ΔV, удаленный с единицы номинальной поверхности на единице пути трения,

Ih=ΔV/(AαL), (\*)

где Аα — фактическая площадь контакта подшипника и вала; L — путь трения;

ΔV/Aα = Δh (\*\*)

где Δh — средняя толщина изношенного слоя подшипника. При равномерном вращении вала:

Ih=Δh/L

L = [v]T. (\*\*\*)

Подставляя значения величин из этих формул (\*\*), (\*\*\*) в формулу (\*), получим для срока службы подшипника (ч) выражение

T = Δh/(Ih·[v])

В формуле этой принимают Δh за линейный износ, характеризующийся изменением размера подшипника в направлении, перпендикулярном валу.

Обычно предельное значение величины [Δh] известно, исходя из допустимых зазоров в подшипнике, влияющих на точность работы машины в целом. Интенсивность изнашивания Ih для данной пары трения материалов устанавливается эксперементально на машинах трения в условиях, максимально прибилиженных к эксплуатационным или в промышленных условиях при испытаниях оборудования.

Инженерная методика расчета на долговечно путем использования закономерностей процесса изнашивания во времени и физических закономерностей износа материалов.

В качестве примера использования этой методики показаны закономерности износа Δh опорных поверхностей червячных прессов (гильз, фильтрующих стержней) в зависимости от времени работы t, полученные автором в результате промышленных испытаний на химических комбинатах, проведенных при следующих условиях работы: температура 140—200 °С, скорость скольжения до 1,5 м/с, пара трения стеллит — стеллит работает в суспензии (крошке) синтетического каучука.

В период I изнашивания происходит приработка червячного вала и опорных поверхностей гильз (подшипников) с изменением шероховатости поверхности и износом Δhп. После приработки следует период II установившегося (нормального) износа Δhн, который заканчивается интенсивным износом — (период III), приводящим к потере производительности. Для рассматриваемых машин [Δh] = 2,5 мм, при котором червячный пресс перестает выполнять свое назначение.

В период нормальной эксплуатации скорость изнашивании остается постоянной:

u = Δhн/t.

Скорость изнашивания определяется в основном давлением p скоростью скольжения v. Для абразивного изнашивания по М. М. Хрущову линейный износ пропорционален давлению на поверхности трения р и пути трения L

Δhн = КрL = Kpvt

или, используя формулу,

u = Kpv

где K — коэффициент износа, характеризующий износостойкость материалов и условия работы пары трения.

Для изнашивания без абразива зависимость скорости изнашивания может быть выражена степенной функцией

u = Kpmvn.

Срок службы подшипника (ч) может быть вычислен по формуле

T=([Δh] – Δhп)/u

Расчет на изнашивание производят по величине износа и форме изношенной поверхности. Форма изношенной поверхности рассчитывается в каждом конкретном случае, исходя из геометрических соотношений изнашиваемого сопряжения.

И. В. Крагельским предложен метод расчета интенсивности изнашивания I сопряжения, позволяющий в некоторых случаях не проводить длительных и дорогостоящих испытаний. Интенсивность изнашивания может быть приближенно определена по формуле:



где t — параметр кривой фрикционной усталости; kx — коэффициент, определяемый геометрической конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на поверхности твердого тела (k1 = 0,18 ÷ 0,22); ра - давление на площадь, ограниченную внешним контуром соприкосновении трущихся деталей; Е — модуль упругости материала; Δ - микрогеометрический комплекс; kp — коэффициент, характеризующий напряженное состояние и зависящий от вида материала (ориентировочно для хрупких материалов kp = 5, для высокоэластичных kp = 3. ζ - коэффициент трения; σВ — предел прочности материала. Следует отметить, что формула эта неприменима для случая, когда защитная втулка вала и подшипника полнена из одного материала с одинаковым модулем упругости.

Таблица . Значения параметра t кривой фрикционной усталости при упругом контакте

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Материал при трении  по стали без смазки | σв,  кгс/см' | t |
| Фторопласт-4  Полиамид  Поликарбонат Полиформальдегид  Ретинакс  Резина на основе бутадиеннитрильного каучука  Резина на основе бутадиенстирольного каучука  Графит  Сталь 20  Сталь 40  Серый чугун  Чугун ЧНМХ | 630  1800  8400  1 470  11800  220  160  2 500  6600  8 200  8 000  6 600 | 5,0  2,0  2.9  1,3  2 - 3  4 - 8  3 - 4  6,9  10  10 - 12  5 - 6  4 - 5 |

Таблица . Значение микрогеометрического комплекса Δ для различных видов обработки и шероховатости поверхности

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вид обработки поверхности трения подшипника | Класс шероховатости по ГОСТ 2789-73 | Δ |
| Круглое шлифование | 7  8  9 | 1,52  0,42  0,10 |
| Внутреннее шлифование | 7  8  9 | 1,25  0,35  0,12 |
| Доводка цилиндрических поверхностей | 10  11  12  13 | 0,045  0,015  0,0035  0,0009 |
| Приработка | 9  10  11 | 0,02  0,012  0,002 |

Момент сил трения в подшипниках сухого трения зависит от угла контакта φ шейки вала и подшипника, длины l и диаметра d и функции распределения давления р. При уменьшении каждой из этих величин трение шейки вала уменьшается. Приближенно значение момента трения может быть определено по формуле:

Мтр= (π/2)fN(d/2) = fцN (d/2)

где fц — приведенный коэффициент трения, который для практических расчетов принимается по формуле

fц = (1,1 ÷ 1,3)·f

Моменты сил трения в опорах на центрах, в опоре со сферическим концом вала и других конструкциях приведены в литературе. К. П. Явленским показано, что момент сил трения существенно зависит от вибрации. Вибрация уменьшает момент сил трения при трогании, увеличении зазора в опоре и частоты возмущающей силы. Разработаны конструкции опор, в которых осуществлено принудительное движение подшипников относительно шейки вала или колебание подшипника в направлении вращения вала. В таких опорах величина момента сил трения может быть снижена до 200 раз. Момент сил трения может быть уменьшен также тщательной приработкой, применением специальных шарикоподшипников, введением жидкого смазочного материала.

**5.3 Расчет по критерию теплостойкости.**

Нормальный тепловой режим при установившейся работе подшипника обеспечивает стабильность физико-механических свойств материалов пары трения геометрических размеров подшипника и является основным фактором надежности, долговечности и необходимого срока службы.

Количество выделившегося при работе подшипника тепла находится по формуле

Q1 = F·v/427

где F— сила трения, кгс; v — скорость скольжения шейки, м/с; 1/427 — тепловой эквивалент механической энергии, ккал/(кгс-м).

Q1 = (l·df/427)pv

Если принять, что коэффициент трения при установившемся движении величина постоянная, то из этого выражения следует

Q1 = C·p·v

где

С = (l·df/427) = const

Из формулы видно, что важным критерием при расчете подшипников сухого трения является критерий теплостойкости — допускаемое значение произведения давления на скорость скольжения [pv], кгс·м/(см²·с), которое характеризует увеличение температуры вследствие тепловыделения во время трения. При повышенной температуре подшипники допускают меньшие давления и скорости, их срок службы уменьшается.

Следовательно, критерии теплостойкости [pv] определяет долговечность работы подшипника.

Поскольку количество тепла Q1, пропорционально длине подшипника l, то для уточнения выбранной длины l требуется соблюдение условия

pv ≤ [pv].

Значение [pv] получают экспериментально в определенных условиях теплоотвода и при соответствующей им температуре подшипника. Испытания образцов материалов и подшипников производят на машинах трения и специальных стендах со ступенчатым повышением нагрузки при постоянной скорости скольжения. С увеличением нагрузки наступает такой момент, когда не могут быть получены устойчивые значения температуры в зоне контакта или коэффициента трения при продолжении эксперимента или наблюдаются признаки катастрофического изнашивания. Максимальное давление, умноженное на скорость скольжения, принятую в данном эксперименте, соответствует допускаемой величине критерия теплостойкости [pv], в связи с чем эта формула действительна только при соблюдении, подобных условий теплоотвода для проектируемого подшипника. Значение [pv] для каждого материала обычно приводится в виде справочных данных для расчета. При расчете подшипника, используя некоторые соотношения, корректируют размеры подшипника I и d в указанных пределах l/d, оптимальные значения которых определены из практики эксплуатации. Если оптимальные соотношения l/d не выполнены для выбранного материала подшипника, материал подшипника подбирается заново и расчет повторяется.

Есть метод расчета срока службы Т подшипника с использованием критерия [pv] и эмпирических коэффициентов. Этот метод расчета основан на использовании результатов испытаний подшипников сухого трения па износ в стендовых условиях максимально приближенных к производственным испытаниям. На основании проведенных испытаний устанавливают эмпирическую связь между долговечностью подшипника до выхода из строя и величиной допустимого значения коэффициента [pv].

Эмпирические формулы для расчета долговечности (ч) металлофторопластовых подшипников, изготовленных из спеченной ленты, в зависимости от условий работы в режиме сухого трения имеют следующий вид:

в условиях колебательного движения

T = A / [pv]2

,где A - эмпирический коэффициент (А = 2000 для упорных шайб и тяжело нагруженных радиальных подшипников А = 5000 для небольших мало нагруженных радиальных подшипников); [pv] = 1,4 - 2,2 кгс-м/(см2с) (меньшие качения для тяжело нагруженных подшипников); в условиях вращательного движения

Т = 250/(pv),

где pv > 2,86 кгс·м/(см2·с) для давлений р = 0,84 ÷ 22,4 кгс/см2 и скоростей скольжения 0,2-2,5 м/с; на более легких режимах при pv ≤ 2,07 кгс·м/(см2·с)

в условиях вращающейся относительно подшипника нагрузки при pv > 3,2 кгс·м/(см2·с)

T = (5/ pv)8

при pv < 3,2 кгс·м/ (см2·с)

T = (4,5/ pv)16

А. Д. Мошковым выведены эмпирические формулы для. расчета пористых подшипников из материала на основе железа при их работе без подвода смазывающего вещества извне, но с пропиткой маслом индустриальное 20 в диапазоне скоростей скольжения 0,5—3,0 м/с. Расчет произведен исходя из установившегося режима работы (теплового баланса) с учетом температуры подшипника, не превышающей 60—70 °С, и допустимого коэффициента [pv], равного 7,0 кгс·м/(см2·с). Для отношения l/d = 1 (диаметр подшипников составлял 25—50 мм) допустимое давление на вкладыш вычисляется по формуле

[р] = 3,67d0,165 v-0,962

где d — внутренний диаметр вкладыша, мм; v — скорость скольжения, м/с.

Внутренний диаметр вкладыша

d = 0,38· 10-3 p6,06 v5,83

где р — давление на вкладыш, кгс/см2.

Коэффициент трения определяется из формулы

f = 6-1 d-0,485 v0,376

В большинстве случаев условия отвода тепла для проектируемого подшипника отличаются от условий, имевшихся при проведении эксперимента. Кроме того, может быть неизвестно, при какой температуре подшипника величина [pv] была получена. Поэтому необходимо произвести дополнительный тепловой расчет проектируемого подшипника, поскольку температура его трущейся поверхности определяется соотношением выделенного и отведенного тепла.

**5.4. Расчет теплового баланса подшипника.**

Тепло, выделившей и в подшипнике без смазки, может быть отведено во внешнюю среду через корпус подшипника и вал в случае, если материалы вала и подшипника обладают высокой теплопроводностью. Поскольку теплоотвод через корпус подшипника значительно выше, чем через вал, то в расчете ограничиваются вычислением теплоотвода через корпус. Такой же расчет производят, когда шейка вала выполнена из материала с низкой теплопроводностью. Если же вкладыш подшипника толстостенный и выполнен из материала, плохо проводящего тепло, то отводимое тепло рассчитывают через вал.

Количество тепла, отводимое через корпус подшипника, в общем виде находят по формуле:

Q2 = k(tп - tв)F',

где k — коэффициент теплопередачи, ккал/(м2·ч·°С); tn — температура рабочей зоны подшипника, °С; tв — температура окружающей среды, °С; F' — наружная теплоотдающая поверхность корпуса подшипника, м2.

Коэффициент теплопередачи может быть определен так:



где δi — толщина слоя материала подшипника, м; λi —коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности подшипника в окружающую среду, ккал/(м2·ч·°С).

Для подшипников с металлическими вкладышами величина



пренебрежимо мала по сравнению 1/αв, поэтому можно принимать k = αв. При охлаждении корпуса подшипника воздухом для необдуваемых подшипников, к = 8 ÷ 14 ккал/(м2·ч·°С), меньшие значения относятся к подшипникам с затрудненным теплоотводом, а для обдуваемых — к = 14 √vв, vв —скорость воздуха, м/с.

При установившемся режиме Q1 = Q2 температура в рабочей зоне подшипника будет



При отводе тепла из рабочей зоны подшипника через вал температура в рабочей зоне подшипника будет



где G и F' — масса (кг) и площадь поверхности (м2) той части длины вала, которая расположена по обе стороны от подшипника и равна (3 ÷ 4) d; с— теплоемкость материала вала [для стали принимают 0,12 ккал/(кг·°С)]; k —коэффициент теплопередачи к воздуху [принимают в пределах 8—12 ккал/(м·ч· С) в зависимости от подвижности воздуха]; Т1, — общее время работы подшипника в течение смены (с перерывами), ч; Т — время работы подшипника, ч.

Температуру tп (°С) сравнивают с предельно допустимой температурой [t] для выбранного материала так, чтобы выдерживалось соотношение

tп ≤ [t]

Если это условие не соблюдается, то необходимо усилить теплоотвод от подшипникового узла путем увеличения теплоотдающей поверхности или применения искусственного охлаждения, например водой.

Значения допускаемых величин [р], [v], [рv] н [t] для различных подшипниковых материалов при сухом трении приведены в таблице.

Допускаемый режим работы и области применения подшипниковых материалов при сухом трении.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | | [p]  кгс/см3 | | [v],  м/с | [pv]  кгс·м/  (см2·с) | [t], °С | Область применения |
| Графит  Графит, пропитанный металлами  Графит, пропитанный смолами  Углепластик | | 3 - 5  5 - 10  10 – 35  – | | 1,5  2,5 – 3  1.5  1,5 - 2 | 10  15  –  – | 400  200-300  140  200 | Подшипники центробежных  и ротационных газодувных машин, дымососов, электрошпинделей, а также подшипники механизмов, работающих в среде агрессивных жидкостей и газов при высоких температурах без вибрационных и ударных  нагрузок. |
| Полиамидные смолы | | 30 | | 0,2 | 1-1,5 | 75 | Втулки, ролики ленточных транспортеров, вкладыши редукторов, подшипники сельскохозяйственных, швейных, текстильных  и бытовых машин |
| Полиамидные покрытия с наполнителями | | 50-70 | | 0,5 | 1.5 | 140 |
|  | |  | |  |  |  |
|  | |  | |  |  |  |
|  | |  | |  |  |  |
|  | | | | | | |
| Фенолформальдегидная смола, армированная волокнами и с  Наполнителями | | 5,0 | | 1,0 | 10 | 40 - 80 | Подшипники дорожных и сельскохозяйственных машин в условиях жаркого климата и запыленности, дендвудные подшипники судов, подшипники для химического оборудования и прокатных станов |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | |  | |  |  |  |
|  | | | | | | |
| Фторопласт | | 5—7 | | 0.5 | 0,4—0 6 | 120 | Подшипники насосов, аппаратов с перемешивающими устройствами в среде агрессивных жидкостей и газов, подшипники для приборов, оборудования для криогенных жидкостей, медицинской техники,  текстильных машин. |
| Фторопласт с наполнителем | | 10—25 | | 1,0 | 2—4 | 120 |
| Фторопластовая облицовка (ткань) при вклеивании | | 50 | | 1,0 | 3 - 5 | От -25  до +135 |
|  | |  |  |
|  | |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | | | | |
| Металлокерамика, пропитанная фторопластом | | 100-300 | | 5 | 1,5 - 2 | От -200  До +200 | Подшипники автомобильных подвесок и систем управления, сельскохозяйственных и текстильных машин, бытовых приборов, электродвигателей, в узлах  трения вертолетов и самолетов. |
|  | |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
| Металлокерамика, пропитанная маслом | | 180-250 | | 4-6 | 7-10 | 70—80 |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
| Металлокерамика на стальной основе (металлофторопластовая лента) | | 100-300 | | 5 | 4 | От-200  до +280 |
|  | |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
|  | |  |  |  |
| Металлокерамические твердые сплавы | | 300 | | 15 | 10—15 | 300 | Подшипники погружных герметических насосов, реакторов и других механизмов химического оборудования |
|  | |  |  |  |
| Минералокерамика | | 5 | | 2 | 10 | 500 |
| Карбидокремниевые композиции | | 60 | | 15 |  | 400 |
| Прессованная древесина, пропитанная маслом | | 30 | | 1 | 25 | 80 | Втулки, вкладыши, подпятники для сельскохозяйственных машин и оборудования пищевых производств, бегунки транспортеров, дейдвудные подшипники  судов, подшипники лебедок |
| Прессованная древесина, непропитанная | | 25 | | 0,5 | 12 | 50 |
|  | |  | |  |  |  |
|  | |  | |  |  |  |
|  | |  | |  |  |  |
|  | |  | |  |  |  |
|  | |  | |  |  |  |
| Твердые смазочные покрытия на металле | До предела текучести металла | | 2,5 | | 0,5 - 3 | 250—300 | Подшипники для приборов бытовой и вакуумной техники и др. |

**5.5. Расчет оптимальных зазоров.**

Важным условием нормальной работы подшипника без смазки является выбор оптимального зазора между сопрягаемыми поверхностями подшипника и вала. От правильно выбранного зазора во многом зависит его работоспособность.

При увеличенных зазорах повышается износ подшипника и неуравновешенность вала, снижается точность работы. Уменьшенные зазоры вызывают повышенный разогрев подшипника, что может привести к превышению допускаемого значения [рv] и заклиниванию вала на ходу.

Как правило, оптимальные величины зазоров для подшипников из различных материалов устанавливаются экспериментально, либо на основе эксплуатационных данных по аналогии с существующими конструкциями с учетом физико-механических свойств материалов (теплопроводность, коэффициент линейного расширения и др.).

Значение [σ]k и Е2 для пластмасс

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Наименование пластмасс | Допускаемое контактное напряжение [σ]k, кгс/см2 | Модуль упругости Е2,  кгс/см2 |
| Капрон  Полиамидная смола  Текстолит  Волокнит  Стекловолокнит  Полиформальдегид  Фторопласт | 40  50  120  70  70  55  50 | 5 000-7 000  23 000  40 000-55 000  150 000-200 000  350 000-500 000  –  4 700-8 500 |

В случае отсутствия опытных данных эксплуатационные зазоры εmax и εmin (с учетом натяга в соединении) для пластмассовых подшипников ориентировочно можно определить по следующим соотношениям:

Значения коэффициента



|  |  |
| --- | --- |
| Диаметр вала d. | Коэффициент Ав, мм |
| 10-18  18-30  30-50  50-80  80-120  120—180 | 0,010-0,019  0,010-0,023  0,023-0,027  0,027-0.030  0.030-0.035  0,035-0,040 |

где [σ]k —допускаемое контактное напряжение пластмассового вкладыша; Епр — приведенный модуль упругости,



где Е1 и Е2 — соответственно модули упругости материалов вала и подшипника. Значение [σ]k и E2 даны в таблице.

Эксплуатационные зазоры определяются по диаметру вала из следующей формулы:

εmin = εmax – 0.1∙ 3^√d

где εmin — минимальное значение эксплуатационного зазора.

Ориентировочное значение установочного диаметрального зазора для графитовых подшипников диаметром более 10 мм, работающих при нормальных температурах.

Δεуст = 0,0012d + Aв

где Δεуст — установочный диаметральный зазор между валом и вкладышем подшипника, мм; Aв — коэффициент. Значения коэффициента Aв приведены в таблице.

Оптимальные зазоры в подшипнике зависят от перекосов шейки вала. Перекосы в подшипниковых узлах возникают из-за технологической несоосности посадочных гнезд при монтаже из-за прогиб вала под нагрузкой, а также податливости самих опорных узлов. Они вызывают снижение работоспособности подшипников, сокращение срока их службы. С увеличением перекоса возрастают давления у кромки подшипника, что может привести к его разрушению или заклиниваю.

Наибольший перекос шейки вала в цилиндрическом подшипнике из геометрических соотношений можно представить по формуле

Δ = l · tgθ

где θ – угол поворота поперечного сечения вала в опоре под действием нагрузки Р, вызывающей прогиб вала,

θ = ( 4/π ) · (PL3/ Ed4)

где L — расстояние между опорами вала; Е—модуль упругости

материала вала.

Зазор emin с учетом микрогеометрии подшипника и вала при перекосах должен удовлетворять следующему соотношению:

emin = Rzв+ Rzn+ l·tgθ

где Rzв, Rzn — параметры шероховатости вала и подшипника соответственно.

Поскольку перекосы в подшипниковых узлах неизбежны, то для нормальной эксплуатации необходимо обеспечение возможности самоустановки подшипников при монтаже вала с последующей его фиксацией в этом положении и, что более эффективно, в работе прецессирующего вала.

Практически зазоры назначают в зависимости от выбора той или иной посадки, чаще всего ходовой и широкоходовой 2 и 3-го классов точности (СТ СЭВ 144—75, посадки Е8, Е9 и Д8, Д9).

**5.6. Последовательность расчета подшипников следующая.**

1. Производят предварительный выбор материала подшипника исходя из коррозионных, абразивных и других свойств окружающей среды, ее температуры, характера динамической нагрузки.

2. Рассчитывают длину подшипника l и корректируют ее в зависимости от отношения l/d для выбранного материала и выбирают толщину стенки s по справочным рекомендациям.

3. Подсчитывают несущую способность подшипника р сравнивают с предельно допускаемым, давлением [р]

4. Вычисляют скорость скольжения на поверхности шейки вала v сравнивает с предельно допустимой скоростью скольжения для выбранного материала

5. Определяют значение pv и сравнивают с предельно допускаемым \pv\ по соотношению.

6. Уточняют размеры подшипника l и d , не выходя за пределы рекомендованных отношений l/d.

7. Подсчитывают температуру подшипника сравнивают с предельно допускаемой температурой [t] для выбранного материала.

8. Уточняют материал подшипника.

9. Выбирают величину оптимального зазора в соединении.

После проведения указанного расчета используют рекомендации по конструктивному оформлению подшипникового узла, нормативные документы и имеющиеся отраслевые стандарты, например на подшипники из силицированиого графита — ОСТ 26-06-760—73, вкладыши металлокерамические — ТУ 16-509.015—75 и др.

В случае невозможности разработки подшипников сухого трения из известных материалов для экстремальных условий вновь создаваемого оборудования, выбор новых, не изученных ранее антифрикционных материалов и пар трения производят путем проведения специальных исследовательских работ с учетом конкретных условий эксплуатации подшипникового узла. Другим решением является использование подшипников жидкостного трения с усложнением конструкции (вынос подшипниковых узлов из зоны высоких температур, применение уплотнительных устройств для отделения коррозионной среды и т. п.).

Методика расчета подшипников жидкостного трения изложена в трудах М. И. Яновского, А. К. Дьячкова, М. В. Коровчинского, Д. С. Коднир, М. Г. Ханович и др., а также в работе С. А. Чернавского.

Особое место занимают опоры трения приборов. От их правильного выбора с минимальными моментами трения в значительной мере зависит точность приборов и усилия, действующие на их подвижные детали. Наиболее широкое распространение получили опоры с одноразовым смазыванием маслом при сборке или ремонте. В опорах скольжения приборов применяют и твердые смазки, а также самосмазывающиеся композиционные материалы Описание типовых конструкций опор скольжения и качения приборов, методики их расчета и рационального выбора материалов пар трения изложены в специальной литературе.

**6. Работа подшипника качения в условиях сухого трения**

К подшипникам качения, предназначенным для работы в специальных условиях, современная техника предъявляет особые требования. В условиях вакуума, повышенной температуры, коррозионных сред смазывание подшипников минеральными смазывающими веществами невозможно, а материалы подшипников должны дополнительно обладать коррозионной стойкостью в различных жидкостях, парах и газах, необладающих смазывающими свойствами, но являющихся рабочими средами и проникающими к подшипникам.

Известно, что для уменьшения трения и лучшего отвода тепла от трущихся поверхностей обычные подшипники качения смазывают жидкими или пластинчатыми нефтяными смазывающими веществами, так материалы шариков, колец и сепараторов не обладают достаточной антифрикционностью в режиме сухого трения. Это подтверждается многочисленными фактами из практики эксплуатации, а также данными специальных исследовании.

В МИЭМ (Московский институт электронного машиностроения) была изучена работа на долговечность стандартных шарикоподшипников 36205 с массивными сепараторами из различных материалов в условиях работы без смазки в атмосфере при частоте вращения 8500 об/мин, радиальной нагрузке 10 кгс, осевой нагрузке 1 кгс. Подшипники без сепаратора при данном режиме работали 2 ч. В связи с резким увеличением температуры испытания были прекращены. Подшипники с сепараторами из бронзы БрАЖМцЮ-3-1,5 работали со смазкой удовлетворительно, а без смазки 10 мин. При нагреве до 31 °С подшипник заклинивался (начальная температура 17°С). Такие же неудовлетворительные результаты получили для подшипников с сепараторами из латуни ЛС59-1. Долговечность их составила от 23 мин до 1 ч 35 мин. После испытания шарики и дорожки качения были покрыты тонким слоем латуни, что искажало размеры желобов, быстро уменьшало рабочий зазор и подшипники заклинивали. Отрицательные результаты подшипники с сепараторами из стали Ст3, у которых через 20 мин работы появлялся сильный шум (свист), затем следовало их заедание. Подшипники с сепаратором из текстолита работали 2,5 ч. Подшипники с сепаратором из бронзы БрОЦС5-5-5 проработали 45ч. При разборке обнаружено большое количество продуктов износа в виде бронзовой пыли. Сепараторы имели также большой износ в гнездах и в местах трения их о борта наружного кольца. Шарики и дорожки качения оказались покрытыми тонким слоем бронзы, что способствовало увеличению срока службы по сравнению с другими материалами из-за избирательного переноса меди на поверхности трения стальных деталей.

Испытания показали, что основной причиной быстрого выхода стандартных шарикоподшипников при работе без смазки в атмосфере является механическое разрушение сепараторов (разрыв по перемычкам, обрыв заклепок) или защемление вследствие попадания продуктов износа между трущимися поверхностями в рабочие зазоры.

В США фирма «Шелл» испытывала шарикоподшипники 206 со штампованным стальным сепаратором при температуре 315°С без смазки при радиальной нагрузке 13,6 кгс и 10 000 об/мин. Подшипники на этом режиме выходили из строя через несколько секунд. Быстрый выход из строя стандартных подшипников наблюдается и при их работе в жидких средах, не обладающих смазывающими свойствами. Автором испытывались шарикоподшипники 308 со штампованным клепаным стальным сепаратором в рабочих условиях реактора при 1570 об/мин и контактных напряжениях не выше 10 000 кгс/см2. Смазывание подшипников осуществлялось исходным сырьем рабочего процесса реактора — углеводородными фракциями типа 55-125 крекинг-бензина Б –70.

После 79 ч работы, в течение которых было 30 пусков и остановов, появился звук, характерный для подшипника, близкого к заклиниванию. Подшипник вышел из строя через 86ч вследствие, заклинивания от попадания в зазоры мелких частиц металла, образовавшихся при изнашивании сепаратора.

Второй подшипник проработал в этих условиях 107 ч. На внутреннем и особенно на наружном кольце наблюдались натиры, имеющие вид блестящего желобка. Остальные места колец и другие детали были покрыты бурым налетом. Наблюдался ярко выраженный износ подшипника при сухом трении с отделением микрочастиц металла (шелушение) и химическим превращением железа в окисел, выпадающий в осадок. Частицы интенсивного коррозионно-механического изнашивания, попадая в зазоры подшипника, заклинивали его.

В результате этих испытаний был сделан вывод о том, что подшипники из стали ШХ15 со штампованными стальными сепараторами непригодны для работы в условиях смазывания жидкими углеводородами легких фракций. Их срок службы даже при низких контактных напряжениях (менее 10 000 кгс/см3) не превышает 100 ч.

К таким же результатам приводят испытания стандартных подшипников в дистиллированной воде. По данным шведской фирмы СКФ их долговечность снижается в 10 раз, а по экспериментам ВНИПП, — иногда в 100раз. Отсюда использование в режиме сухого трения стандартных шарикоподшипников невозможно.

В последние годы во ВНИПП проф. Н. А. Спицыным и его учениками были разработаны конструкции и исследованы опытные партии шарикоподшипников, способных работать достаточно долговечно без подвода нефтяных смазывающих веществ при сухом трении в нормальных условиях в атмосфере и в вакууме при повышенных температурах и частотах вращения. Сотрудниками ВНИПП и автором были исследованы новые шарикоподшипники для работы в коррозионных средах без смазки.

К решению проблемы создания таких шарикоподшипников подходят несколькими путями. Одним из них является разработка конструкции подшипников, смазываемых в процессе работы твердыми смазывающими веществами, другим — изыскание конструкционных самосмазывающихся материалов для сепараторов, способных в условиях сухого трения обеспечивать смазывание трущихся элементов подшипника твердыми пленками. Кроме того, важным этапом разработки шарикоподшипников без смазки является исследование и применение новых коррозионно-стойких и жаропрочных подшипниковых сталей и сплавов для колец и шариков. К шарикоподшипникам, имеющим постоянный запас смазывающего материала на весь период эксплуатации, относятся также стандартные шарикоподшипники с двусторонними встроенными уплотнениями по ГОСТ 8882—58, которые здесь не рассматриваются.

**Материалы и конструктивные особенности подшипников качения для режима сухого трения в вакууме.**

Использование обычных смазок в подшипниках, работающих в вакууме рентгеновских спектрометров, электровакуумных устройств и другой аппаратуре неприемлемо. Вследствие высокой упругости паров большинство жидкостей и смазок в вакууме испаряется и теряет свои смазывающие свойства. Действие температуры еще более усугубляет этот процесс. В данном случае никакие уплотнения не способны поддержать вакуум на определенном уровне. Поэтому применение подшипников без подвода смазок в условиях вакуума является актуальным вопросом вакуумной техники.

Разработка шарикоподшипников для вакуума до 10-9мм.рт.ст. с температурой от –100 до +500 ºС при воздействии магнитных полей и индуктивных электрических токов, вибраций с высокими частотами вращения и нагрузок представляет собой трудности. В этих условиях нефтяные смазочные материалы оказываются совершенно неработоспособными, а попытки применения шарикоподшипников с твердосмазочными покрытиями не увенчались успехом из-за недостаточного срока службы. Одним из путей создания подшипника качения без смазки в этих условиях является использование самосмазывающихся сепараторов. Эти подшипник качения имеют особенности в конструкции самого подшипника, а также в подборке антифрикционных композиционных материалов для сепараторов, обеспечивающих возможность работы без вводимого извне смазочного материала, фактически являющихся твердой смазкой для подшипника.

В качестве твердосмазочных покрытий для шарикоподшипников могут быть использованы металлические пленки из золота, серебра, свинца, висмута и других мягких материалов. Особенно такие покрытия эффективны в вакууме из-за низкой упругости паров.

Трущиеся поверхности шарикоподшипников могут также покрываться фторопластом и различными композиционными покрытиями с металлическими и иными добавками.

1 – золото

2 – серебро

3 – серебро с дисульфидом молибдена

4 – серебро с сульфидной пленкой

5 – свинец

6 – свинцовый висмут

8 – фторопласт

Подшипник 1 вышел из строя.

Подшипники 2,3,4 работа прекращена из-за резкого возрастания момента трения.

Подшипники 5 вышел из строя через 1000ч.

Подшипник 6 вышел из строя через 1650ч.

Подшипник 7 опыт прекращен через 1240ч, мог работать и больше.

Подшипник 8 опыт прекращен через 2200, мог работать и больше.

Твердосмазочные покрытия для шарикоподшипников не получили широкого распространения вследствие невозможности их восстановления в процессе эксплуатации, а так же из-за ограничения по частотам вращения и нагрузкам.

В качестве материалов для работы в глубоком вакууме, исследовались большое количество различных композиций на основе фторопласта с наполнителями марок МС-13 (с медью и дисульфидом молибдена) и других композиций по ОСТ В 6-05-5018-73, а так же металлополимерные материалы на основе капрона с дисульфидом молибдена и других материалы на основе фторопласта-4: металлофторопластовые марки ФН-202 (ОСТ В 6-05-5018-73), содержащий никель и дисульфид молибдена, графитофторопластовой марки АФГ-80ВС по ОСТ 48-75-73, содержащий графит, а также группа материалов АМАН на основе материалов с высоким содержанием дисульфида молибдена (АМАН-6, АМАН-24, ТЕСАН-2) и бронзовая металлокерамика ВАМК-24 с дисульфидом молибдена. Применяют самосмазывающиеся сепараторы из композиций фторпласт-4 + дисульфид молибдена + стекловолокно (Ф4Г20М5С10 и Ф-4С15).

Шарикоподшипник 36205 с сепараторами из фторопласт-4, фторопласт-40 м бронзой (Ф40Б70). Например однорядный радиальный подшипник с материалом сепаратора – стальной штампованный без смазки с покрытием дисульфидом молибдена, работает до 400ºС, или корончатый массивный бронзовый (БрАЖМц 10-3-1,5 с ………. Дисульфидом молибдена), до 400ºС. АМАН-24, ФН-202 до 500ºС. Для радиально-упорного подойдут АМАН-24, ФН-202, до 250ºС.

На основе ШХ-15:

АМАН-4 (материал на основе термостойкой смолы и дисульфида молибдена)

Пористая бронза металлокерамики марки ВАМК-1, пропитанный дисульфидом молибдена.

Бронза БрАЖМц 10-3-1,5 с запрессованной смазкой (50% - фторопласт-4 + 50% дисульфид молибдена)

Ф40К20 (фторопласт-40 с 20% коксовой муки)

Ф40Б30 (фторопласт-40 с 30% бронзовой пудры)

Подшипники качения с самосмазывющимися сепараторами для работы в жидких агрессивных средах.

Подшипники должны быть (или или):

С защитой подшипниковых узлов герметичными уплотнениями и обеспечением шарикоподшипниковой или циркуляционной системой.

С применение коррозионно-стойких шарикоподшипников со смазывающей рабочей средой (или одним из её компонентов) без уплотнительных устройств.

Для 1-го подойдет ШХ-15.

Для 2-го - Нержавеющая сталь 95Х18Ш :

с сепараторами из бронзы БрАЖМц 10-3-1,5 , где скорость вращения до 1000 об/мин.

с сепараторами из текстолита и фторопласта-4, где скорость вращения до 3000об/мин.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал детали радиального или радиально-упорного шарикоподшипника | | Агрессивная среда | Смазывающее вещество | Контактное напряжение,  δmax, кг/см2 | κ |
| кольца | сепараторы |
| Сталь  95Х18 | БрАЖМц 10-3-1,5 | Вода дистиллированная | Пластичная смазка | 10000-30000 | 0,25 |
| 95Х18 | Сталь  12Х18Н9 | Влажный воздух с попадание воды | Влагостойкой минеральное масло | – | 0,8 |
| ШХ-15 | Бронза или текстолит | Водяной пар | Влагостойкой минеральное масло | 12000 | 1,0 |
| 95Х18 | Фторопласт-4 + 15% стекловолокна (Ф4С15) | Криогенные жидкости (кислород, водород) | Криогенные жидкости | 15000 | 0,15 – 0,2 |
| ШХ-15 | БрАЖМц 10-3-1,5 | Керосин Т-1 , Т-2 | керосин | До 20000 | 1,0 |
| ШХ-15 | Бронза с запрессованной твердой смазкой (50% фторопласт-4, 50% дисульфид молибдена) | Воздух | Без смазки | 10000 - 18000 | 0,1 – 0,3 |
| Х32Н8 | Фторопласт-4 | Азотная кислота | Азотная кислота | 10000 | 0,1 |

Ф40С15М1,5 ; Ф40М30 ; Ф40Г20 ; Ф40Б70 – композиции фторопласта-40П с ситалитом, дисульфидом молибдена, графитом, бронзой

Материалы подшипников скольжения.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Наименование | Марка | T max |
| Текстолит | ПТК,ПТМ1, ПТМ2 | 130-140 |
| Фторопласт | Ф-4  Ф-40 | 250  160 |
| Фторопластовая  композиция | Ф-4К20  7В-2А | 200  250 |
| Углепластик | АМС-1 | -60-200 |
| Графит | АГ-1500  2П-1000 | 300  400 |
| Чугун | АЧС-1  АЧВ-1 | 350 |
| Бронза | БрОЦС5-5-5  БрОФ10-1 | 250 |

При высокой температуре подшипники минералокерамические исходное сырье окись алюминия Al2O3 из которой получают корундовую керамику ЦМ-332 и окись магния и кремния MgO,S,O2 из которых получают стеатитовую керамику ТК-21.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Смазочный материал | Материал пар трения | Износ, мм | Коэф.тр. |
| масло | Бронза БрАЖ9-4  Сталь 45 | 1,7  0,7 | - |
| Масло с  Абразивом | Бронза БрЖ9-4  Сталь 45 | 112,0  45,5 | 0,015-0,02 |
| масло | С2  С2 | 1,1  0,5 | 0,06-0,09 |
| Масло с  Абразивом | С2  С2 | 1,3  1,8 | 0,16 |

Наиболее коррозионно-стойкими в химических средах являются твердые сплавы ВК2, ВК3 и ВК6, содержащие более 6% кобальта.

В условиях смазывание водой или другими жидкостями более целесообразно применять пропитанные металлами углеродные материалы:

АГ-1500, АГ-1500-3, АГ-1500-С05, АГ-1500-Б83.

(подшипники насосов, дымоходов)

АПГС (элементы скольжения в газовых средах)

Высокотемпературные смазочные материалы для подшипников скольжения.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Наименование | Способ нанесения на поверхность | Условия применения |
| Окись свинца (PbO) | Металлизационное напыление на хромоникелевую поверхность с последующим окислением пленки толщиной до 0,025мм | Температура до 650ºС  Вакуум до 10-6мм рт ст |
| Окись свинца. (95%) + двуокись кремния или 5%-ная окись кремния (PbO+SiO2) | Распыление водной суспензии нагрев до 90ºС  Охлаждение пленки толщиной 0,025 – 0,05 мм | Температура до 650ºС |
| Фталоцианин меди (С32Н12N8Cu) | Окунание при 250 - 300ºС и спекание в среде азота при 500ºС | Температура до 500ºС |
| Серебро + палладий (Ag + Pa) | Гальваническое покрытие на металлическую основу | Температура от –67 до 815ºС  Вакуум до 10-6мм рт ст  Давление до 840 кгс/см2 |
| Жидкие металлы галлий, индий, висмут, кадмий | Окунание, шаржирование, диффузионное покрытие в вакууме при высокой температуре | Температура от 400 до 2000ºС  Только в вакууме до 10-9 мм рт ст  Или в инертной среде |

Твердо-смазочные порошки

|  |  |
| --- | --- |
| Графит | До 540ºС в среде агрессивных газов |
| Дисульфид молибдена | - 180 до 525 ºС |
| Нитрид бора (белый графит) | До 200ºС  В виде окиси бора до 1250ºС |
| Дисульфид вольфрама | Воздух до 500ºС  Вакуум до 1250ºС |
| Диселенид вольфрама | В вакууме при контактном давлении до 13000 кгс/см2 |
| Окись свинца, сернистый висмут, хлористая медь | Температура до 650ºС  Давление до 7000 кгм/см2 |

**Подшипники качения в вакууме.**

Использование обычных смазок в подшипниках, работающих в вакууме рентгеновских спектрометров, электровакуумных устройств и другой аппаратуре неприемлемо. Вследствие высокой упругости паров большинство жидкостей и смазок в вакууме испаряется и теряет свои смазывающие свойства. Действие температуры еще более усугубляет этот процесс. В данном случае никакие уплотнения не способны поддержать вакуум на определенном уровне. Поэтому применение подшипников без подвода смазок в условиях вакуума является актуальным вопросом вакуумной техники.

Разработка шарикоподшипников для вакуума до 10-9мм рт ст с температурой от –100 до +500ºС при воздействии магнитных полей и индуктированных электрических токов, вибраций с высокими частотами вращения и нагрузок представляет собой трудности. В этих условиях нефтяные смазочные материалы оказываются совершенно неработоспособными, а попытки применения шарикоподшипников с твердыми покрытиями не увенчались успехом из-за недостаточного срока службы. Одним из путей создания подшипников качения без смазки в этих условиях является использование самосмазывающихся сепараторов. Эти подшипники качения имеют особенности в конструкции самого подшипника, а так же подборе антифрикционных материалов для сепараторов, обеспечивающих возможность работы без вводимого извне смазочного материала, фактически являющиеся твердой смазкой для подшипника.

**Подшипники скольжения для рабочих сред и для вакуума.**

Графит теряет смазывающую способность в вакууме. Значительно увеличивается коэффициент трения. Особенно сильно изнашиваются графитовые опоры в жидких средах. Коэффициент трения увеличивается в 5-10 раз.

В условиях смазывания водой или другими жидкостями (бензин, керосин, масло, спирт и т.п.) целесообразно применять пропитанные металлами углеродные материалы АГ-1500, АГ-1500-3, АГ-1500-С05, АГ-1500-Б83, АПГС.

Подшипники из полиамидов нашла широкое применение в подшипниковых узлах, работающих без смазывания, при проникновении в них технологических жидкостей (химических, пищевых, морская вода и т.п.), в запыленных (абразивных средах), а так же при вибрационных и ударных нагрузках. К полиамидам, используемым для изготовления подшипников, относятся литьевой полиамид П-610, полиамид П-12Л, литьевые полиамиды П-АК-93/7, П-АК-80/20, П-АК-85/15 и другие.

Материал АТМ-2 используется как уплотнение в рабочей среде, стоек к действию керосина, бензина, масел, слабых кислот и т.п. АТМ-2 материл на основе капроновой смолы, термоантрацита и графита.

Текстолиты химически стойки к действию разбавленной соляной кислоты, к растворам уксусной и фосфорной кислот, к действию разбавленных щелочей. Не стойки к действию концентрированных кислот и щелочей.

Стойки к воздействию органических растворителей, масел, углеводородов, спиртов.

Фторопластовые подшипники обладают химической стойкостью, способностью работать в вакууме, в большом диапазоне температур –200 до +250ºС без смазки. На фторопласт-4 не действуют даже при высоких температурах крепкие и разбавленные кислоты и щелочи, органические растворители, агрессивные среды и другие химические среды. Фторопласт-4 не стоек в расплавленных щелочных металлах, фторе и трехфтористом хлоре.

Металлокерамические подшипники, пропитанные маслом, применяют в условиях, когда масло не подвергаются воздействию высоких температур, коррозионных сред, способны работать в вакууме.

Силицированные графиты – высокая износостойкость, а особенно в абразиво-содержащих средах.

Самосмазывающиеся подшипники из прессованной древесины. ДПК-П и ДПК-ПИ работают в сухой или сильно запыленной среде. (Прессованная древесина в виде сплошных и полых цилиндров). ДПГ-ПТ (прессованная древесина в виде втулок и вкладышей) работает во влажной среде и воде.

К металлическим материалам, используемым для подшипников в агрессивных средах относятся коррозионно-стойкие чугуны ЧНХТ, ЧН1МШ и другие.

**Список литературы**

Воронков Б.Д., «Подшипники сухого трения», Ленинград 1968г

Воронков Б.Д., «Подшипники сухого трения, издание 2-е», Ленинград 1968г.

Подольский М.Е., «Подшипники качения», Ленинград, 1968г

Самойлова Н.П., «Подшипники сухого трения (без смазки)», Москва 1969г