

## ■ 2.5. Материалы для подшипников скольжения

---

Основная деталь подшипников скольжения — это вкладыши, которые должны обладать рядом специфических свойств. Прежде всего они должны иметь низкий коэффициент трения, хорошую прирабатываемость, т. е. способность принимать форму вала за счет своей пластической деформации и износа, обладать высокой задиростойкостью, износостойкостью, высоким сопротивлением усталостному термическому разрушению и коррозии. Кроме того, эти материалы должны обладать высокой теплопроводностью и большой теплоемкостью, легко адсорбировать и прочно удерживать на своей поверхности слой смазочного материала, иметь низкую температуру плавления и низкую прочность при разрушении на срез.

Очень важно, чтобы эти материалы позволили получать высокие значения шероховатости поверхности при изготовлении деталей, которые существенно влияют на общие потери при трении.

Оценивают материалы для подшипников по коэффициенту трения, давлению в опорах ( $p$ ), скорости скольжения ( $v$ ), удельной мощности трения ( $pv$ ) и максимальной температуре нагрева поверхностного слоя подшипника.

Необходимый комплекс свойств вкладышей подшипников обеспечивается специфической гетерогенной микроструктурой используемых сплавов, которая представляет собой сочетание мягких и твердых участков. Различают два типа гетерогенной структуры: с мягкой основой и твердыми включениями, с твердой основой и мягкими включениями. Различная износостойкость мягких и твердых участков является причиной образования специфической микротопографии на поверхности вкладыша. Благода-

ря большему износу мягкая составляющая вырабатывается и уносится из зоны трения, образуя систему микроканалов, а твердая составляющая образует систему выступов (островков), на которые опирается вал. Это обеспечивает хорошие условия работы вкладыша — снижение коэффициента трения путем уменьшения площади соприкосновения вала и вкладыша, а также улучшение доступа смазочного материала в зону трения по вышеупомянутым микроканалам. Кроме улучшения циркуляции смазочного материала микроканалы способствуют выносу продуктов износа из зоны трения.

Для подшипников скольжения используют различные материалы: баббиты — сплавы на оловянной и свинцовой основе с добавками сурьмы, меди и других элементов; оловянистые и свинцовистые бронзы; сплавы на цинковой и алюминиевой основе (ЦАМ), антифрикционные чугуны. Также применяют различные композиционные материалы: многослойные (из двух, трех и более слоев), порошковые сплавы на медной и железной основе (см. подраздел 2.4.1), термореактивные пластмассы (текстолит и др.), термопластичные пластмассы (капрон, амид, фторопласт 4).

В табл. 2.27 приведено процентное содержание химических элементов, входящих в состав баббитов и их применение.

Баббиты обладают наилучшими антифрикционными свойствами среди подшипниковых сплавов, но отличаются очень низким сопротивлением усталости. Самые высокие антифрикционные свойства у оловянных баббитов, но они очень дорогие и поэтому применяются только для подшипников ответственных машин — двигателей, турбин. Свинцовые баббиты используют при изготовлении менее нагруженных подшипников.

*Процентное содержание химических элементов,  
входящих в состав баббитов и их применение*

Марка	Химические элементы				Применение
	Sn	Sb	Cu	Другие	
<b>Оловянные</b>					
Б88	88,0	7,5	3,0	1,0 Cd, 0,25 Ni	Тяжело нагруженные машины, паровые турбины, турбонасосы
Б83	83,0	11,0	6,0		
<b>Свинцовые</b>					
БН	10,0	14,0	1,75	0,5 Cd, 0,3 Ni, 0,73 As, ост. Pb	Машины средне нагруженные, автомобильные двигатели
Б16	16,0	16,0	1,75	Ост. Pb	
БС6	6,0	6,0	0,2	То же	
<b>Кальциевые</b>					
БКА	-	-	-	1,0 Ca, 0,8 Na, 0,4 Al, ост. Pb	Подшипники железнодорожных вагонов, тепловозных двигателей
БК2	2,0	-	-	0,4 Ca, 0,3 Na, 2 Sn, 0,8 Mg, ост. Pb	

Свойства баббитов повышаются путем введения в их состав никеля, кадмия и мышьяка. На железнодорожном транспорте получили распространение кальциевые баббиты. Входящие в их состав натрий, кальций и другие элементы повышают твердость.

Из-за низкой собственной прочности ( $s_b$  от 60 до 120 МПа, НВ20...30) баббиты наносятся на прочную основу (стальную, чугунную или бронзовую) заливкой или плакированием.

Для изготовления подшипников скольжения широко используются бронзы и латуни. Среди них наиболее известны: оловянистые бронзы Бр.О10Ф1 и Бр.О10Ц2; свинцовистая бронза Бр.С30; оловянно-цинково-свинцовистые бронзы Бр.О5Ц5С5, Бр.О6Ц6С3; двухфазные латуни ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ49Мц3А.

Бронзовые монолитные подшипники применяют в турбинах, электродвигателях, компрессорах.

Латуни по антифрикционным свойствам уступают бронзе, поэтому их следует рассматривать как заменители бронз в случае невысоких нагрузок и малых скоростей скольжения.

В качестве антифрикционных применяют также *цинковые* сплавы, например, ЦАМ10-5 и ЦАМ9-1,5, которые кроме цинка содержат 9,5% алюминия, 1,5% меди и 0,03–0,06% магния. Эти сплавы могут заменять бронзы, но при условии, что температура в узле трения не будет превышать 100 °С.

Широко известны *алюминиевые* подшипниковые сплавы. В их составе основными компонентами являются Sn, Cu, Ni и Si. Антифрикционные свойства пропорционально зависят от содержания в них Sn. Однако в литых сплавах Sn не должно быть больше 10–12%, так как в противном случае образуется грубая сетка из олова, что приводит к снижению износостойкости и усталости при повышенных температурах. Для деформируемых сплавов такого ограничения нет.

Сплавы АО3-1 и АО9-2, где 3 и 9% Sn и 1 и 2% Cu соответственно используют для изготовления втулок и вкладышей толщиной более 10 мм. Сплавы АО20-1 и АН-2,5 (2,5% Ni, остальное Al) используют в виде биметаллической ленты (сталь + сплав).

Большое распространение в промышленности, в частности, в автостроении, получили многослойные подшипники скольжения. Основой вкладышей таких подшипников является стальная лента, которая обеспечивает прочность и жесткость вкладыша. Рабочий слой, обеспечивающий высокие антифрикционные свойства, изготавливают из разных материалов: олова, свинцово-оловянного сплава, бронзы и др. В ряде случаев для повышения эксплуатационных свойств применяют вкладыши с большим числом слоев. В автостроении используют трех- и четырехслойные вкладыши подшипников. Трехслойные (триметаллические) вкладыши состоят из стальной ленты, пористого промежуточного медно-никелевого или металлокерамического слоя и антифрикционного слоя из свинцового сплава толщиной не более 0,1 мм. Четырехслойные вкладыши включают стальную ленту, слой бронзы БрС30 толщиной 250 мкм, слой из никеля или латуни толщиной 10 мкм и антифрикционный слой из свинцово-оловянного сплава толщиной 25 мкм. Многослойные вкладыши в виде свертных втулок изготавливают также из металлофторопластовой ленты. Число слоев здесь четыре: первый — слой из фторопласта, запол-

Таблица 2.28

**Характеристики некоторых материалов  
для подшипников скольжения**

Материал	Коэффициент трения по стали		Допустимый режим работы		
	без смазочного материала	со смазочным материалом	Давление в опорах Р, МПа	Скорость скольжения v, м/с	Удельная мощность трения pv, (МПа· м/с)
<b>Баббиты</b>					
Б83	0,07–0,12	0,004–0,006	15	50	75
Б16			10	30	3
БК2			15	15	6
<b>Бронзы</b>					
БрО10Ф1	0,1–0,2	0,004–0,009	15	10	15
БрО5Ц5С5			8	3	12
БрС30			25	12	30
<b>Латуни</b>					
ЛЦ16К4	0,15–0,24	0,009–0,016	12	2	10
ЛЦ38Мц2С2			10,6	1	10
<b>Алюминиевые сплавы</b>					
АО9-2	0,1–0,15	0,008	25	20	100
<b>Комбинированные материалы</b>					
Железо–графит	0,08–0,12	–	8	1	–
Бронза — графит	0,04–0,1	–	6	1	–
Металлофторопластовая лента (МФПл)	0,03–0,1	–	–	–	150

ненного дисульфидом молибдена в количестве 0,25%, толщиной 0,01 – 0,05 мм; второй — из спеченной порошковой бронзы БрО10Ц2, поры которой наполнены смесью фторопласта и 20% Рb, толщиной около 0,3 мм; третий — медный толщиной 0,1 мм для обеспечения прочного соединения второго слоя с четвертым; четвертый — стальная лента из стали 08кп толщиной 1 – 4 мм.

Кроме того, используют самосмазывающиеся подшипники, получаемые методом порошковой металлургии.

Характеристики типовых материалов для подшипников скольжения приведены в табл. 2.28.

## ■ 2.6. Резиновые материалы

---

Резины представляют собой пластические массы, в которых связующими являются высокопластичные полимеры — натуральные (НК) или синтетические (СК) каучуки. Чистый каучук, благодаря линейности и слабой разветвленности его молекул, которые располагаются зигзагообразно, об-

ладает высокой пластичностью. При комнатной и особенно при повышенной температуре каучук проявляет ползучесть, что не позволяет изготавливать детали непосредственно из него. Однако после специальной обработки — вулканизации — это становится возможным. При вулканизации в каучук вводятся специальные вещества (сера, оксиды цинка или магния, пероксиды, нитросоединения), которые образуют поперечные химические связи между макромолекулами каучука. Таким образом, резина является пластмассой с редкосетчатой молекулярной структурой. В зависимости от числа поперечных связей резина бывает мягкой, средней твердости и твердой. В мягкой резине содержание вулканизаторов составляет 5—7%, в твердой (эбоните) оно доходит до 30%.

Для ускорения процесса вулканизации используют тиурам, каптакс, оксиды свинца. В связи с тем, что основным вулканизатором является сера, резину определяют еще как продукт вулканизации смеси каучука и серы с различными добавками.

Кроме вулканизаторов в состав резины входят: наполнители, пластификаторы, противостарители и красители.

*Активные наполнители* (сажа, оксид кремния) повышают прочность, твердость и износостойкость резины.

*Инертные наполнители* (тальк, мел и др.) вводят в состав резин с целью их удешевления.

*Пластификаторы* добавляют для облегчения переработки, повышения эластичности и морозостойкости резины. На долю пластификаторов приходится 8—30% от общего объема резины. В качестве пластификаторов используют технический вазелин, парафин, стеариновую кислоту, минеральные и растительные масла и т. д.

*Противостарители* препятствуют процессу присоединения к молекулам каучука кислорода, в результате которого происходит укорочение этих молекул и потеря эластичности резины. В результате резина охрупчивается и на ее поверхности появляется сетка трещин. Поэтому применяют противостарители химического и физического действия. Первые (альдол, неозон) взаимодействуют с кислородом и нейтрализуют его, вторые (парафин, воск) затрудняют диффузию кислорода, образуя поверхностные пленки.

*Красители* (охра, ультрамарин) наряду с выполнением декоративных функций задерживают старение резины, вызываемое действием солнечного света.

Определяющая роль в основных свойствах резины принадлежит каучукам. Натуральный каучук получают из сока каучуковых деревьев — латекса, в котором содержится 30—37% каучука. Синтетический каучук получают из спирта, природного газа, нефти, попутных газов нефтедобычи и т. д. Основные свойства натуральных и синтетических каучуков, используемых при производстве резины, приведены в табл. 2.29.

Технологический процесс изготовления резиновых смесей (сырой резины) включает следующие операции: подготовка ингредиентов, приготовление их смеси, получение полуфабрикатов. Резиновая масса проходит каландрирование, в результате которого сырая резина приобретает форму листов или лент определенной толщины. Срок хранения сырой резины в таком виде при 5—20°C не более трех месяцев, специальных — шесть месяцев.

*Основные свойства и области применения  
натуральных и синтетических каучуков*

Каучук	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Рабочая температура, °С	Температура хрупкости, °С	Применение
<b>Натуральный каучук (НК)</b>				
Непределенный углерод	0,91–0,94	80–130	–70	Резины с высокими значениями прочности, эластичности, электроизоляционных свойств
<b>Синтетический каучук (СК)</b>				
Бутадиеновый (СКБ) — продукт полимеризации бутадиена (дивинила)	0,90–0,92	80–150	–50	Специальные резины
Бутадиенстирольный (СКС) — продукт полимеризации бутадиена со стиролом	0,94	80–130	–70	Автомобильные шины, резиновые рукава и др.
Изопреновый (СКИ) — продукт полимеризации изопрена	0,91–0,92	130	–70	Шины, амортизаторы, электроизоляционные и вакуумные резины
Хлоропреновый (наирит) — продукт эмульсионной полимеризации хлоропрена	1,2	100–130	–35	Резины для шлангов, прокладок, защитные оболочки кабельных изделий
Бутадиеннитрильный (СКН) — продукт полимеризации бутадиена и нитрила акриловой кислоты	0,94–0,98	100–177	–50	Резины для топливных и масляных шлангов, прокладок и мягких топливных баков
Силоксановый теплостойкий (СКТ) — продукт полимеризации циклических силоксанов	1,7–2,0	250–325	–70	Резины для изоляции электрических кабелей, для герметизирующих и уплотняющих прокладок
Фторсодержащий (СКФ) — продукт полимеризации ненасыщенных фторированных углеводородов	1,8–1,9	250–325	–25	Резины для уплотнения и герметизации деталей, работающих в топливах и маслах при температурах до 300°С



Детали и изделия из сырой резины изготавливают прессованием, методом литья под давлением и на специальных (дорновых) станках. При использовании первого метода детали производят на гидравлических прессах при давлении 5–10 МПа. Прессование может быть холодным, после чего изготовленные детали подвергают вулканизации, или горячим, тогда процессы формования и вулканизации протекают одновременно. Прессованием изготавливают уплотнительные кольца, клиновые ремни, муфты.

При литье детали изготавливают из разогретой резиновой смеси под давлением 30–150 МПа. При необходимости для упрочнения резиновых изделий их армируют проволокой, нитями разного вида, сетками.

На специальных станках изготавливают сложные изделия, которые, по сути, состоят из композиционного материала, созданного на основе резины. К таким изделиям относятся покрышки колес транспортных машин, рукава, бронированные шланги. Они изготавливаются путем последовательной намотки на полый металлический стержень слоев резины, изолирующих и армирующих материалов, например, тканей, проволок.

Вулканизация может быть горячей и холодной. В первом случае процесс осуществляется в котлах или прессах, машинах и аппаратах непрерывного действия при 130–150°C под давлением в среде горячего воздуха, водяного пара, горячей воды, расплава соли. Во втором случае детали и изделия изготавливают из сырой резины, в которой отсутствует сера. Она вводится в обрабатываемую деталь из раствора или паров дихлорида серы или из сернистого газа.

В таблице 2.30 приведены значения показателей физико-механических свойств некоторых резин [6].

Основное свойство резин — обратимая деформация при низких напряжениях, определяется характером их структуры. Из-за свернутости макромолекул деформация под нагрузкой развивается медленно, отставая от напряжений по фазе. После снятия нагрузки макромолекулы резины возвращаются к исходному зигзагообразному расположению. После цикла нагружение — разгрузка резина обладает остаточной деформацией, кото-

рая представляет собой сумму замедленной деформации и деформации, вызванной текучестью от разрывов поперечных химических связей и определяет амортизационные свойства резины.

При испытаниях по площади петли гистерезиса можно судить о величине внутреннего трения и степени разогрева резины при циклическом характере работы изделия, например, шины или амортизатора.

Эксплуатационные свойства резиновых изделий в значительной степени зависят от температуры и воздействия света, озона и кислорода. Нагрев снижает их прочность, а охлаждение до отрицательных температур приводит к полной потере эластичных свойств резины и переходу ее в стеклообразное состояние, причем это проявляется в основном при деформациях сдвига.

Различают следующие классы резиновых деталей:

- уплотнительные;
- вибро- и звукоизолирующие, противоударные;
- силовые (зубчатые колеса, шарниры, муфты);
- опоры скольжения (подпятники и др.);
- трубы, гибкие компенсационные проставки (сильфоны, патрубки, муфты);
- противоизносные (протекторные кольца, катки);
- фрикционные детали и инструменты (колеса, шлифовальные диски);
- несиловые и защитные (ковры, ручки, педали);
- декоративные (полосы, шнуры);
- шины.