



А. П. СЕМЕНОВ,  
Ю. Э. САВИНСКИЙ

# Металло- фторопластовые ПОДШИПНИКИ



Москва  
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
1976

Рецензент канд. техн. наук И. Я. Альшиц

Семенов А. П. и Савинский Ю. Э.

Металлофторопластовые подшипники. М., «Машиностроение», 1976, 192 с. с ил.

Металлофторопластовые подшипники скольжения обладают высокими антифрикционными свойствами, позволяющими применять их в широком диапазоне температур и нагрузок в условиях сухого трения и в средах, не обладающих смазочными свойствами. Они отличаются высокой конструкционной прочностью и успешно противостоят вибрационным нагрузкам. Эти качества металлофторопластовых подшипников позволяют широко применять их в многочисленных, в том числе в тяжело нагруженных и ответственных узлах трения машин и механизмов различных типов.

В книге изложены все основные вопросы, связанные с производством и применением металлофторопластовых подшипников. Кратко освещена история создания металлофторопластовых материалов, охарактеризовано их место в ряду других антифрикционных материалов. Описаны свойства основных компонентов металлофторопластовых подшипников, их эксплуатационные свойства при вращательном и колебательном (возвратно-вращательном) движении. Освещен технико-экономический эффект, полученный в результате применения металлофторопластовых подшипников в отдельных отраслях машиностроения.

Книга предназначена для инженерно-технических работников промышленных предприятий, конструкторских бюро и научно-исследовательских организаций. Она может также представлять определенный интерес для преподавателей, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

С 31302-034  
038 (01) -76 034-75

6П5.3

© Издательство «Машиностроение», 1975 г.

Александр Павлович СЕМЕНОВ

Юрий Эзекьевич САВИНСКИЙ

МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВЫЕ ПОДШИПНИКИ

Редактор издательства Н. А. Иванова

Технические редакторы Т. И. Андреева и И. В. Завгородняя Корректор А. М. Усачева  
Художник А. Я. Штаркман

Едино в набор 30/IV 1975 г. Подписано к печати 6/I 1976 г. Т-03001. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага типографская № 3. Усл. печ. л. 12. Уч.-изд. л. 13,0. Тираж 12 500 экз.  
Заказ 252. Цена 79 коп.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
193144, Ленинград, С-144, ул. Монсеенко, 10

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В некоторых случаях подшипники скольжения обладают преимуществами по сравнению с подшипниками качения (малые размеры, масса и т. п.). В первую очередь это относится к подшипникам скольжения, способным работать без смазки, т. е. в условиях сухого трения. В настоящее время уже известны материалы для «сухих подшипников», обладающие теми или иными положительными свойствами. Наиболее благоприятную совокупность свойств имеют так называемые металлофторопластовые подшипники, состоящие из прочной конструкционной основы (как правило, стальной), пористого слоя антифрикционного сплава (например, бронзы), пропитанного смесью фторопласта с наполнителем, и тонкого поверхностного слоя такого же состава. Такие подшипники могут выдерживать очень большие нагрузки и способны работать без смазки в широком диапазоне температур (от  $-200$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ ) в воздушной и других газовых средах, в вакууме, а также в жидких средах, не обладающих смазочным действием. На них не образуется статическое электричество, и они не вызывают фреттинг-коррозию и ложное бринеллирование.

В Советском Союзе основы производства таких подшипников были разработаны в Государственном научно-исследовательском институте машиноведения. В настоящее время металлофторопластовую ленту и подшипники из нее изготавливают на Климовском машиностроительном заводе; на некоторых предприятиях организовано производство индивидуальных подшипников (цилиндрических с внутренней или наружной рабочей поверхностью, сферических и др.). Металлофторопластовые подшипники нашли применение в машиностроительной, авиационной и других отраслях промышленности в ответственных узлах вращательного и колебательного (возвратно-вращательного) движения.

В настоящей книге обобщены исследования и практический опыт авторов, а также другие опубликованные

сведения о применении металлофторопластовых подшипников в СССР и за рубежом. Освещены положительные качества подшипников скольжения по сравнению с подшипниками качения и тенденции развития материалов для подшипников скольжения. Описаны строение и свойства основных разновидностей композиционных металлофторопластовых материалов и исходных компонентов (фторопласта, наполнителей, пористого металлического слоя). Приведены технологические процессы изготовления металлофторопластовых подшипников (из ленты и «индивидуальных»), стенды и методики исследования подшипников при колебательном и вращательном движении.

## ГЛАВА I

### Современные подшипники в машинах и механизмах

#### 1. Области применения подшипников качения и скольжения

Сопряжения подвижных одна относительно другой деталей имеются в любых машинах и механизмах. Одно из наиболее распространенных в наши дни соприжений ступицы колеса с шипом появилось несколько тысячелетий назад, дав впоследствии название «подшипники» всем вспомогательным устройствам, служащим для обеспечения взаимной подвижности отдельных деталей конструкции.

Длительное время были известны и применялись лишь подшипники скольжения. Подшипники качения, в близком к современному конструктивному исполнению, были изобретены в конце прошлого века. Их первым назначением было облегчить вращение велосипедного колеса. Прогресс техники сопровождался интенсивным внедрением подшипников качения, особенно в агрегаты вращательного движения. Подшипники качения позволили повысить грузоподъемность и долговечность машин, снизить потери на трение.

Непрерывно возрастающие потребности техники порождают новые типы подвижных соприжений. Для узлов, передающих колебательное движение, начинают применять упругие эластомерные подшипники. Для высоких скоростей вращения за последние десятилетия разработаны подшипники скольжения с газовой смазкой и подшипники, в которых используется магнитный подвес. В современной технике подшипники скольжения и качения являются основными типами подвижных соприжений, каждый из которых имеет свою область применения, определяемую техническими и экономическими требованиями.

При выборе одного из двух основных типов подшипников в первую очередь следует учитывать, насколько каждый из них в заданных условиях эксплуатации способен обеспечивать либо минимальный, либо некоторый определенный уровень сил трения в соприжении, а также снижать износ сопрягаемых деталей.

Трение в опорах валов, служащих для передачи механической энергии в энергетических установках, трансмиссиях и исполнительных механизмах, снижает к. п. д. машин и должно быть по возможности исключено. Подшипники скольжения обеспечивают весьма низкий уровень сил трения только при работе в режиме

гидродинамической или гидростатической смазки, когда контактирующие рабочие поверхности полностью разделены пленкой смазочной жидкости. Режим гидродинамической смазки возникает лишь при достаточно высокой скорости относительного движения, определяемой геометрией подшипникового узла, величиной передаваемой им нагрузки и вязкостью смазки. При меньшей скорости в ряде случаев подшипники качения несмотря на их большие габариты предпочтительнее, чем подшипники скольжения.

Шарниры колебательного движения во многих случаях являются примерами сопряжений, благоприятствующих использованию подшипников скольжения. Колебательное движение присуще управляющим и саморегулирующимся системам, подверженным воздействию вибрационных сил сопряжениям, амортизирующим устройствам. Во многих шарнирах этих конструкций некоторое трение, выполняя функции демпфирования вредных колебаний, является полезным. Подшипники качения в условиях колебательного движения, особенно с малыми смещениями, часто работают неудовлетворительно: при пробеге, соизмеримом по величине с диаметром отпечатка тела качения, на беговых дорожках и телах качения развиваются явления ложного бринеллирования и фреттинг-коррозии, приводящие к быстрому выходу из строя подшипника.

При выборе одного из двух типов подшипников приходится также учитывать и другие особенности, оценивая их преимущества или недостатки применительно к конкретным условиям эксплуатации.

Важными достоинствами подшипников качения являются стабильность характеристик в большом диапазоне рабочих скоростей и небольшой расход смазки. Подшипники же скольжения выдерживают большие перегрузки, бесшумны в работе, просты в изготовлении, имеют меньшие размеры в направлении действующей нагрузки. Последняя особенность подшипников скольжения иногда оказывает решающее влияние при конструировании миниатюрных и крупных узлов трения.

Область предпочтительного использования подшипников скольжения расширилась с появлением материалов, способных работать в условиях сухого трения без жидкой или пластичной смазки. Во многих конструкциях смазка является либо неэффективной, либо крайне нежелательной. Действенность смазки уменьшается или полностью исчезает при работе подшипников в глубоком вакууме, при высоких удельных нагрузках и малых скоростях относительного движения, при низких и высоких температурах. В пищевой, фармацевтической, текстильной и в других отраслях промышленности использование минеральных смазок может привести к загрязнению и браку вырабатываемой продукции. В некоторых производствах химической промышленности применение смазки сопряжено не только с возможностью загрязнения продукции, но и с опасностью взрывов, необходимость предотвра-

щения которых вызывает значительное усложнение конструкции оборудования или технологического процесса. Во многих подшипниковых узлах машин, механизмов, бытовых приборов, работающих в обычных условиях, использование подшипников скольжения, не требующих смазки, позволяет отказаться от применения сложных маслосистем, что существенно упрощает конструкцию и повышает ее надежность.

В эволюции подшипников скольжения, способных работать при сухом трении, можно выделить три главных этапа. Первый этап — это разработка и совершенствование не требующих смазки или самосмазывающихся материалов. Сначала появились углеродистые материалы и полимеры с наполнителями [6]. Существенный прогресс в создании самосмазывающихся материалов был достигнут с появлением фторуглеродных полимеров, особенно политетрафторэтилена (ПТФЭ), получившего в нашей стране название фторопласт-4 [67]. Исключительные антифрикционные свойства фторопласта, его необычайная химическая стойкость стимулировали разработку всевозможных композиционных материалов, самосмазывающая способность которых обуславливается в основном наличием фторопласта, а необходимая прочность и износостойкость — наполнителями. Свойства подшипниковых композиций во многих случаях улучшают применением в качестве наполнителей таких твердых смазок со слоистой структурой, как дисульфид молибдена, графит, нитрид бора, иодистый свинец и т. п. [5].

Отличительной особенностью второго этапа является нанесение относительно мягкого антифрикционного слоя на твердую конструкционную основу. Такие комбинированные двухслойные подшипники, например, в виде стальных втулок с тонким полимерным покрытием, значительно увеличили предел допустимых для самосмазывающихся подшипников удельных нагрузок. Исследования показали, что прочностные свойства тонких пленок, нанесенных на твердую основу, и их износостойкость повышаются с уменьшением толщины пленки. Однако при этом уменьшается и величина допустимого линейного износа комбинированного подшипника, что ограничивает его долговечность.

Возникшее противоречие было устранено на третьем этапе созданием материалов со структурами, в которых расходуемая антифрикционная пленка постоянно пополняется и обновляется поступающим в зону трения самосмазывающимся материалом, содержащимся в порах каркаса, образованного спеканием металлических порошков. Материал такого типа впервые описал английский ученый Ф. Боуден [72], пропитавший политетрафторэтиленом поверхностный слой пористой меди. Дальнейшее совершенствование такого материала предусматривало нанесение губчатого бронзового каркаса на конструкционную стальную основу [87]. Этот материал, состоящий из пористого бронзового каркаса, пропитанного фторопластом (или фторопластом с наполнителем)

и стальной основы, назовем металлофторопластовым материалом.

В СССР металлофторопластовый материал изготавливают в виде ленты, а также в виде неразрезных металлофторопластовых подшипников повышенной прочности и точности.

## 2. Общие сведения о самосмазывающихся подшипниках

Существующие в настоящее время самосмазывающиеся подшипники скольжения подразделяют на монолитные и комбинированные. Монолитные подшипники имеют однородный по всем направлениям состав, простой или композиционный, в зависимости от того, образован ли он одним материалом или материалом со специальным наполнителем. Комбинированные подшипники состоят из отдельных слоев различной структуры с разными свойствами. В их числе можно выделить подшипники, рабочий слой которых имеет однородный состав, в отличие от металлофторопластовых подшипников, имеющих рабочий слой сложного строения.

Монолитные подшипники простого состава изготавливают обычно из чистого фторопласта или какого-либо антифрикционного графитового материала. Они обладают хорошими антифрикционными свойствами, но для ряда условий применения недостаточными прочностью и износостойкостью. Поэтому подшипники из чистого фторопласта или графитового материала применяют сравнительно редко. Более часто монолитные подшипники изготавливают из композиционных материалов.

Наибольшее распространение получили композиционные материалы на основе фенолоформальдегидных и эпоксидных смол, полиамидов, углеграфитов и фторопласта. Введение графита позволяет придать свойства самосмазываемости текстолитам, в которых в качестве связующего используется фенолоформальдегидная смола. На основе эпоксидных смол созданы такие композиционные материалы, как маслянит, состоящий из эпоксидной смолы, алюминиевой пудры, полиэтилена, полиамида, ксилола и минерального масла, и эпосилит, состоящий из эпоксидной смолы, бронзовой стружки, древесных опилок и графита. Для работы при сухом трении используют также полиамиды—поликапролактam, нейлон, смолы П-68 и АК-7, наполненные твердыми смазками, большей частью такими, как дисульфид молибдена и графит.

Углеграфитовые материалы используют и в качестве основы композиций. Повышение прочности графитовых материалов достигают, в частности, пропиткой их полимерами и металлами. Материалы такого вида выпускаются как в СССР [51], так и за рубежом [56]. На основе графита разработаны новые композиционные материалы: нигран, получаемый из искусственного графита, каменноугольного пека и нитрида бора; углеситалл; силицированный графит, состоящий из углерода, карбида кремния и кремния [51].

Непрерывно увеличивается количество композиционных материалов, в которых в качестве основы используют фторопласт. В СССР изготавливают наполненные фторопласты марок ФКН-7 (графит и дисульфид молибдена), ФКН-14 (графит, дисульфид молибдена и рубленое стекловолокно), АФГМ (графит и дисульфид молибдена), 7В-2А (графит), АФГ-80ВС (графит) и другие. Из зарубежных фторопластовых материалов наиболее известными являются материал марки «DQ», выпускаемый английской фирмой «Гласир», состоящий из фторопласта, графита, оловянной бронзы и небольшого количества свинца [38], а также разработанные американской фирмой Дюпон материалы марок тефлон-1305, -1346, -1371, -1374, в которых в качестве наполнителей использованы стекловолокно, бронза, графит и дисульфид молибдена [28].

Повышение теплопроводности и снижение теплового расширения подшипников достигается применением пористых металлических материалов, пропитанных фторопластом. Металлический пористый каркас изготавливают спеканием обычных дендритных порошков металлов, полученных электролитическим способом, или спеканием порошков антифрикционных сплавов сферической формы. Обычно используют порошки высокооловянной бронзы, иногда — железа, меди или серебра [5]. Примером такого материала является материал типа «Полислип» [89, 92].

Перспективными для тяжелых условий работы без смазки являются комбинированные самосмазывающиеся материалы, в которых композиционный антифрикционный рабочий слой нанесен на твердую конструкционную основу. В ГДР разработан комбинированный материал марки «Спрелафлон», представляющий собой композиционный слой из фторопласта, свинца и фенолоформальдегидной смолы с добавками, нанесенный на стальную основу [86]. Несколько более высокими механическими свойствами обладает применяющийся в США и других странах материал в виде фторопластовой ткани, приклеенной к стальной основе [74], [94]. В СССР, Англии и других странах широко применяют комбинированный металлофторопластовый материал, обладающий высокими прочностными и антифрикционными свойствами [56], [88]. Технологией изготовления металлофторопластового материала предусматривает спекание на омедненной стальной основе тонкого пористого слоя из частиц сферической формы высокооловянной бронзы с последующей пропиткой пор слоя чистым фторопластом или фторопластом с наполнителем. Процесс пропитки осуществляют таким образом, чтобы антифрикционный материал, заполняющий пустоты бронзового слоя, несколько выступал за его пределы для образования поверхностного, так называемого прирабочного слоя. Стальная основа придает металлофторопластовому материалу высокую прочность, бронзовый пористый каркас обеспечивает быстрый отвод тепла, возникающего при трении, и служит резервуаром для твердой смазки, роль которой

играет фторопласт или фторопласт с наполнителем; поверхностный слой антифрикционного материала предотвращает износ сопряженной с подшипником детали и уменьшает трение.

При работе металлическая поверхность контртела и бронзовые частицы металлофторопластового материала разделены тонким слоем полимера или наполненного полимера. Этот слой постепенно изнашивается, утоняется, и в отдельных местах разрушается, так, что возникает контакт между отдельными бронзовыми частицами и сопряженной с подшипником поверхностью. Трение металла о металл является кратковременным, поскольку оно приводит к местному повышению температуры, вследствие которого фторопласт, обладающий высоким коэффициентом теплового расширения, выталкивается из пор бронзового каркаса, восстанавливая и поддерживая целостность полимерного слоя.

В Англии металлофторопластовые подшипники производит фирма «Гласир». Подшипники, в которых для пропитки пористого слоя применяют чистый фторопласт, имеют марку «DP», подшипники, использующие фторопласт, наполненный свинцом, — марку «DU». В СССР при изготовлении металлофторопластового материала и металлофторопластовых подшипников для заполнения пористого бронзового слоя в основном применяют фторопласт с наполнителем в виде дисульфида молибдена.

### 3. Критерии работоспособности несмазываемых подшипников скольжения

Работоспособность подшипников скольжения, работающих без смазки и при ограниченной смазке, проследим по графикам, изображенным на рис. 1 [90]. Наклонная прямая, ограничивающая зону значений скорости и нагрузки, в которой подшипники работоспособны, представляет собой геометрическое место точек, имеющих постоянные значения произведения  $pV$  или  $f pV$  (где  $p$  — удельная нагрузка,  $V$  — скорость скольжения,  $f$  — коэффициент трения). При постоянном коэффициенте трения произведение удельной нагрузки на скорость скольжения характеризует мощность трения или тепловыделение. Другими словами, рассматриваемая линия соответствует предельно допустимому значению температуры на поверхности трения. Горизонтальная ли-

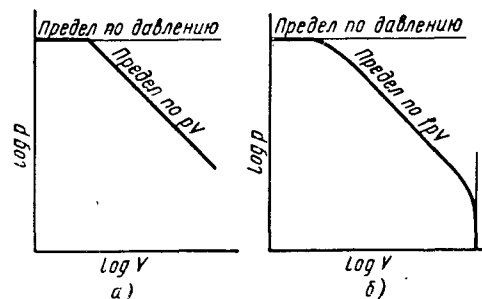


Рис. 1. Характеристики работоспособности подшипников: а — работающих без смазки; б — пористых, пропитанных смазкой

Рис. 1. Характеристики работоспособности подшипников:

а — работающих без смазки; б — пористых, пропитанных смазкой

ния представляет собой предельное значение нагрузки, выше которой подшипники не работоспособны. Вертикальная линия ограничивает максимально допустимые значения скорости скольжения.

При пользовании критерием  $pV$  надо помнить о следующем: а) значения коэффициента трения, как правило, зависят от скорости скольжения, что сказывается на тепловыделении в зоне трения и, следовательно, на температуре поверхностей трения, б) условия теплоотвода для сопряжений с разной геометрией и различным коэффициентом взаимного перекрытия (отношением площадей трущихся поверхностей) различны, что также сказывается на температуре трущихся поверхностей. Несмотря на указанные несовершенства критерия  $pV$ , при правильном учете условий работы трущегося сопряжения использование его вполне допустимо.

При оценке величины удельной нагрузки следует учитывать геометрию сопряжения. В плоских упорных шайбах средние и фактические удельные нагрузки совпадают. Фактические удельные нагрузки в зоне контакта цилиндрических и шарнирных подшипников с сопряженными деталями в общем случае распределяются сложнее. При одной и той же внешней нагрузке  $P$ , действующей на подшипник с определенными размерами, наибольшая величина удельной нагрузки, возникающей на контактирующих поверхностях, может изменяться в значительных пределах в зависимости от геометрии узла трения, модуля упругости и твердости материалов и величины зазора между подшипником и валом. Поскольку определение фактических удельных нагрузок является задачей, для которой пока нет достаточно простого инженерного решения, нагруженность подшипника обычно оценивают по величине удельной нагрузки  $p$ , вычисляемой по отношению внешней нагрузки к номинальной площади касания  $S$  подшипника. Номинальную площадь касания подшипника определяют, как площадь проекции его опорных поверхностей на плоскость, перпендикулярную направлению действия внешней нагрузки:

для радиальных подшипников с внутренней рабочей поверхностью

$$S = dl,$$

где  $d$  — диаметр внутренней цилиндрической поверхности;  $l$  — длина подшипника;

для радиальных подшипников с внешней рабочей поверхностью

$$S = Dl,$$

$D$  — диаметр внешней цилиндрической поверхности; для шарнирных подшипников

$$S = db,$$

$d$  — диаметр сферической поверхности внутреннего кольца,  $b$  — ширина наружного кольца;

для упорных шайб

$$S = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2),$$

$D$  и  $d$  — наружный и внутренний диаметры шайбы.

При взаимодействии радиального подшипника из полимерного материала со стальным валом отношение максимальной величины фактической удельной нагрузки  $p_{\max}$  к удельной нагрузке  $p$  возрастает с повышением твердости полимерного материала, увеличением относительного зазора и уменьшением диаметра вала, и может достигать значений от 3 до 5. Фактические удельные нагрузки возрастают также из-за неравномерности нагружения подшипника по его длине, особенно вследствие недостаточной жесткости узла трения (появление сильных краевых эффектов). По указанным причинам удельная нагрузка может служить достаточно надежным критерием работоспособности подшипников только при сопоставлении результатов испытаний, проведенных в сходных условиях. В других случаях следует учитывать влияние, которое могла оказать на результаты испытаний величина фактической наибольшей удельной нагрузки.

Скорость скольжения для вращательного движения

$$V = \frac{\pi n r}{30},$$

где  $n$  — частота вращения, об/мин;  $r$  — радиус, по которому происходит трение.

При гармоническом колебательном движении скорость скольжения является переменной величиной, которую можно описать выражением

$$V = V_{\alpha} \sin \omega t,$$

где  $V_{\alpha}$  — амплитудное значение скорости скольжения;  $\omega$  — угловая частота колебаний, 1/с;  $t$  — время, с.

Амплитудное значение скорости скольжения определяют по формуле

$$V_{\alpha} = \alpha \omega r,$$

где  $\alpha$  — угловая амплитуда колебательного движения.

Частота колебательного движения  $\nu$  (Гц) и угловая частота колебаний  $\omega$  связаны соотношением

$$\omega = 2\pi\nu.$$

Если среднюю скорость скольжения  $V_{\text{ср}}$  при колебательном движении принять равной отношению пути трения  $L$  ко времени работы подшипника  $\tau$ , то соотношение между амплитудной и средней скоростями скольжения дает выражение

$$V_{\alpha} = \frac{\pi}{2} V_{\text{ср}}.$$

Поскольку при колебательном движении скорость скольжения является переменной величиной, то величина произведения удельной нагрузки на скорость скольжения также переменна. Поэтому в качестве критерия работоспособности подшипников, работающих при колебательном движении, в дальнейшем будет использовано амплитудное значение произведения  $pV$ . При статической внешней нагрузке его определяют как произведение удельной нагрузки на амплитудное значение скорости скольжения. При наличии динамической составляющей внешней нагрузки в качестве критерия работоспособности подшипников используют максимальную величину амплитудного значения произведения удельной нагрузки на скорость скольжения, определенную с учетом сдвига фазы между колебаниями нагрузки и скорости скольжения.

Важным критерием работоспособности подшипников скольжения является коэффициент трения  $f$ . Чрезмерное возрастание коэффициента трения свидетельствует о начале разрушения подшипника, которое в отдельных случаях может привести к опасному возрастанию уровня дополнительных нагрузок в конструкции. В некоторых случаях уменьшать силы трения ниже некоторого определенного значения нежелательно. Для вычисления коэффициента для каждого конкретного условия эксперимента в дальнейшем использован закон Амонтона, в соответствии с которым коэффициент трения равен отношению силы трения к внешней нагрузке, нормальной к поверхности скольжения. Применительно к подшипникам коэффициент трения вычисляют, как отношение момента трения  $M$  к произведению внешней нагрузки на радиус трения, причем для упорных плоских шайб в качестве радиуса трения принимают средний радиус шайбы.

В некоторых узлах трения работоспособность подшипников скольжения ограничивается величиной их линейного износа  $\Delta h$ . Наиболее жесткие ограничения допустимого износа подшипников существуют в шарнирных соединениях, работающих под воздействием знакопеременных нагрузок, а также в узлах, где требуется высокая точность центрирования вала. В подобных случаях в качестве критерия долговечности подшипника используют величины, характеризующие темп изнашивания: интенсивность линейного износа  $I_h$  и скорость изнашивания  $I_v$ . Интенсивность линейного износа характеризуется отношением толщины изношенного слоя к пути трения

$$I_h = \frac{\Delta h}{L}.$$

Скорость изнашивания представляет собой отношение толщины изношенного слоя к времени работы подшипников

$$I_v = \frac{\Delta h}{\tau}.$$

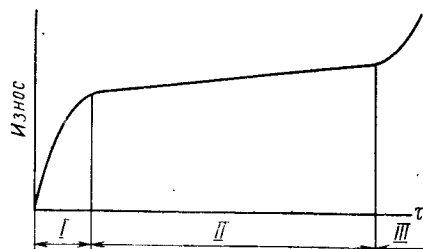


Рис. 2. График изменения износа во времени

Эти характеристики связаны соотношением

$$I_h = \frac{I_t}{V}.$$

В некоторых случаях для оценки износа служат объемный  $\Delta v$  или массовый износ  $\Delta m$ .

Важным параметром, определяющим условия теплопередачи в узле трения, является коэффициент взаимного перекрытия. При торцовом трении кольцевых образцов коэффициент взаимного перекрытия равен единице. При испытаниях радиального подшипника по схеме «вращающийся вал—неподвижная втулка» с нагрузкой, фиксированной по отношению к валу, этот коэффициент имеет значения 0,2—0,4. В случае, когда по диску трутся пальчиковые образцы, коэффициент взаимного перекрытия приближается к нулю.

Кривая зависимости линейного износа металлофторопластового подшипника от времени его работы состоит из трех основных участков (рис. 2). На участке I происходит приработка, в процессе которой изнашивается поверхностный слой фторопласта. Интенсивность линейного износа при этом сравнительно велика. Обнажение первых участков бронзы (вершин сферических частиц) определяет начало участка II, характерного для нормальной работы подшипников с низким темпом изнашивания. Для материала с наполненным свинцом фторопластом при работе без смазки оптимальная площадь, занимаемая на поверхности бронзой, лежит в пределах 1—15% [94]. В этом диапазоне износостойкость такого металлофторопластового материала максимальная. При превышении верхнего предела площади, занимаемой бронзой на поверхности трения, происходит переход к периоду интенсивного изнашивания, представленному участком III.

Для некоторых применений поверхностный слой металлофторопластового подшипника утолщают с тем, чтобы за время эксплуатации подшипника его износ не выходил за пределы, ограниченные участком I. При этом участок I и поверхностный слой металлофторопластового подшипника условно называют «приработочными».

## ГЛАВА II

### Свойства компонентов антифрикционных фторопластовых материалов

#### 1. Фторополимеры (или фторопласты)

**Фтор и фторуглероды.** Основным элементом, входящим во фторополимеры, является фтор [24]. В природе фтор встречается главным образом в виде соединений с кальцием и алюминием. Значительное количество фтора содержится в фосфоритах и апатитах.

Фтор в свободном виде впервые удалось получить лишь в 1886 г. А. Муассану. По своим свойствам фтор напоминает другие галогены, но и имеет от них существенные отличия. Отрицательная валентность фтора — элемента VII группы периодической системы — равна единице. Положительной валентности фтор, в отличие от других галогенов, не проявляет.

Фтор обладает наибольшей реакционной способностью среди неметаллических элементов, являясь даже более сильным окислителем, чем озон. Он активно взаимодействует почти со всеми веществами (получены соединения и с инертными газами). Фтор при нагреве энергично взаимодействует даже с металлами платиновой группы. Реакции с фтором отличаются высоким тепловым эффектом, что является свидетельством высокой энергии образующихся связей.

Свободный фтор — газ бледно-желтого цвета, имеющий резкий раздражающий запах. При  $-187^\circ\text{C}$  фтор переходит в ярко-желтую жидкость. Плотность жидкого фтора составляет  $1,513\text{ г/см}^3$ . Простейшим является соединение фтора с водородом — фтористый водород. Он служит исходным продуктом синтеза самых различных фтороорганических соединений. Начиная с 30-х годов химия фтороорганических соединений начала бурно развиваться и в настоящее время выросла в самостоятельную область органической химии. Твердые фтороорганические полимерные материалы оказались чрезвычайно стойкими к действию окислителей, щелочей, кислот, жидких металлов (кроме щелочных), высоких и низких температур, микроорганизмов [9, 24, 30, 67, 96]. В химическом отношении они оказались почти столь же устойчивыми, как и благородные металлы.

Строение фторуглеродов имеет внешнее сходство со строением углеводородов, однако свойства их коренным образом отличаются. Для насыщенных фторуглеродов характерны исключительная химическая инертность и высокая термическая стойкость. Объяс-



няют это тем, что фтор с атомами углерода образует прочную связь. Разложение фторуглеродов, связанное с отделением атомов фтора, требует больших затрат энергии, чем соответствующее разрушение углеводородов (связей С—С и С—Н). Ниже приведены данные о средних величинах энергии связи различных элементов, входящих в состав углеводородов и их производных и фторуглеродов [9]

Связь	С—С	С—Н	С—F	С—О	С—Cl
Энергия связи (ккал/моль)	82,9	98,7	100,2	85,5	79,2

Высокую стабильность фторуглеродов объясняют еще и тем, что более крупные атомы фтора (по сравнению с атомами водорода) надежно экранируют углеродную цепочку, а следовательно и молекулу фторуглерода от воздействия инородных молекул и атомов.

Длительное время полимеры на основе фторуглеродов не были известны. Толчком к их исследованию и практическому применению послужила случайно открытая в 1938 г. в США полимеризация тетрафторэтилена<sup>1</sup>. В 1957 г. мировое производство фторополимеров составило (без СССР) уже 5000 т. На долю политетрафторэтилена падает более 90% от этого количества. Масштаб производства фторополимеров к настоящему времени многократно увеличился.

В СССР промышленное производство политетрафторэтилена (фторопласта-4 и фторопласта-4Д) началось в 1949 г.

**Тетрафторэтилен и его полимеризация.** Исходным мономером для получения политетрафторэтилена (ПТФЭ) является тетрафторэтилен  $\text{CF}_2=\text{CF}_2$ , который представляет собой бесцветное газообразное вещество без запаха. Температура плавления тетрафторэтилена—142,5° С, температура кипения—76,3° С, плотность при температуре кипения 1,519 г/см<sup>3</sup>. Под воздействием тепла тетрафторэтилен разлагается, образуя тетрафторметан, углерод и высшие фторуглероды.

Другой представитель непредельных фторуглеродов — гексафторпропилен ( $\text{CF}_2=\text{CF}-\text{CF}_3$ ), применяют для приготовления сополимеров с тетрафторэтиленом и фтористым винилиденом. Температура плавления гексафторпропилена—156,2° С, температура кипения — 29,4° С и плотность при температуре — 40° С равна 1,583 г/см<sup>3</sup>.

Можно осуществить блочную полимеризацию тетрафторэтилена и полимеризацию в растворе. Однако наиболее удобным методом полимеризации тетрафторэтилена, нашедшим применение в промышленности, является полимеризация в водной среде (водно-эмульсионная полимеризация) в присутствии катализаторов при начальном давлении 50 кгс/см<sup>2</sup>. Процесс полимеризации сопровождается выделением теплоты (25 ккал на 1 моль тетрафтор-

<sup>1</sup> Из баллона неожиданно прекратилась подача газообразного тетрафторэтилена. При вскрытии баллона обнаружилось, что он заполнен белым порошком, оказавшимся полимером тетрафторэтилена.

этилена). Полученный полимер, представляющий собой рыхлый, волокнистый, легкокомкующийся порошок белого цвета имеет

формулу  $\left( \begin{array}{cc} \text{F} & \text{F} \\ | & | \\ -\text{C} & -\text{C}- \\ | & | \\ \text{F} & \text{F} \end{array} \right)_n$ . Средний молекулярный вес промышлен-

ных образцов политетрафторэтилена колеблется в пределах 390 000—89 000 [9], имеются сведения о политетрафторэтилене с молекулярным весом более миллиона.

**Политетрафторэтилен.** Промышленное производство политетрафторэтилена под различными торговыми названиями организовано во многих странах [9, 59]. В СССР его выпускают под названием фторопласт-4, в США — тефлон<sup>1</sup> (фирма «Дюпон»), в Англии — флуон (фирма «Империял Кемикал Индастриз», в Италии — алгофлон (фирма «Монтекатини»), во Франции — гафлон (фирма «Резинс флоурс»), в ФРГ — гостафлон (фирма «Фарбверке Хехст»), в Японии — полифлон (фирма «Дайкин Когу Компани»).

В СССР выпускают также фторопласт-4Д, представляющий собой модификацию политетрафторэтилена с несколько меньшим молекулярным весом и высокой дисперсностью [67]. Метод производства фторопласта-4Д, разработанный в НИИПП [68], существенно отличается от метода производства фторопласта-4. В результате полимеризации получается его водная дисперсия, которая или коагулируется для получения порошка и смазанных паст, или концентрируется для получения стабильных суспензий.

**Свойства политетрафторэтилена.** Несмотря на то что политетрафторэтилен (фторопласт-4)<sup>2</sup> относится к разряду термопластичных смол, он не плавится и не течет в обычном понимании этого слова [67, 96]. При комнатной температуре он обладает высокой степенью кристалличности и даже процесс закалки не может препятствовать его кристаллизации. Из фторопласта-4 можно приготовить образцы со степенью кристалличности (содержание в полимере вещества в кристаллическом состоянии в процентах) от 50 до 70%, в виде же порошка (волокнистые частицы), получающегося в результате полимеризации, фторопласт-4 может иметь степень кристалличности 93—97%. Из тонкодисперсного фторопласта-4Д можно получить изделия со степенью кристалличности до 80—85%. Следует, однако, учитывать, что при степени

<sup>1</sup> В нашей литературе фторопласт-4 иногда неправильно называют тефлоном (тефлон — торговая марка политетрафторэтилена, выпускаемого в США фирмой «Дюпон»).

<sup>2</sup> Политетрафторэтилен отечественного производства в дальнейшем изложении будет называться фторопласт-4 или просто фторопласт (что строго говоря не вполне точно, так как термин фторопласт относится и к другим фторосодержащим полимерам). Для полимеров зарубежного происхождения хранено название политетрафторэтилен или сокраще

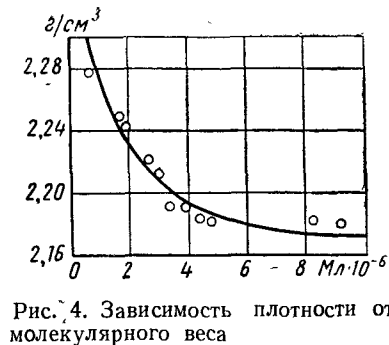
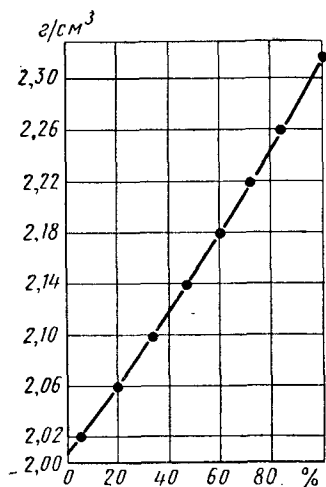


Рис. 4. Зависимость плотности от молекулярного веса

Рис. 3. Зависимость плотности от степени кристалличности фторопласта-4

кристалличности выше 85% изделия или образцы из фторопласта становятся хрупкими.

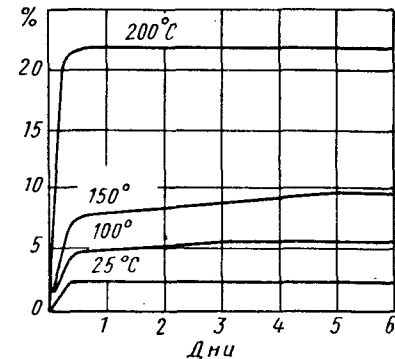
Рассчитанная по размерам элементарной ячейки фторопласта-4 плотность кристаллической фазы равна 2,31 г/см³. Плотность реального беспористого материала в зависимости от степени кристалличности меняется от 2,15 до 2,28 г/см³. Зависимость плотности от степени кристалличности изображена на рис. 3 [67]. При определении степени кристалличности по плотности следует обязательно учитывать пористость полимера, зависящую от способа его изготовления.

Плотность фторопласта зависит также и от молекулярного веса, причем увеличение последнего ведет к снижению плотности (рис. 4). Это является следствием того, что полимеры с большим молекулярным весом при нагреве выше температуры плавления имеют большую вязкость расплава, вследствие чего они кристаллизуются медленнее и степень кристалличности (а, следовательно, и плотность) у них получаются ниже.

Известны три кристаллические модификации фторопласта-4 [9]. При температурах ниже 20° С элементарная ячейка имеет псевдогексагональную структуру с размерами  $a = b = 5,54 \text{ \AA}$ ;  $c = 16,8 \text{ \AA}$ ;  $\gamma = 119,5^\circ$ . Молекулярные цепи винтообразно закручены. В интервале 20—30° С существует гексагональная элементарная ячейка с параметрами  $A = 5,61 \text{ \AA}$ ,  $C = 16,8 \text{ \AA}$ ,  $\gamma = 120^\circ$ . Упорядоченность структуры при этом меньше, решетка расширяется (с увеличением специфического объема на 1%). При температурах выше 30° С стабильной становится псевдогексагональная решетка с  $A = 5,64 \text{ \AA}$ .

Монолитный фторопласт способен к закалке, заключающейся в сохранении в полимере значительного количества аморфной

Рис. 5. Зависимость деформации фторопласта-4 от продолжительности действия нагрузки (в днях) и температуры



фазы при резком охлаждении полимера, нагретого выше температуры плавления кристаллитов (+327° С). Закалка снижает твердость фторопласта, но сильно увеличивает его относительное удлинение при разрыве. При закалке необходимо обеспечить быстрое охлаждение в интервале температур 327—250° С, так как уже при температуре 250° С скорость кристаллизации фторопласта мала и ею можно пренебречь. Температура стеклования аморфных участков равна приблизительно —120° С.

При нагревании выше 327° С фторопласт-4 превращается в аморфный прозрачный гель, и эта температура, как уже указывалось, считается температурой его плавления. Однако для фторопласта-4 при этом не наблюдается переход из высокоэластического состояния в вязкотекучее, что свойственно другим термопластам. Даже в гелеобразном состоянии фторопласт-4 не обладает высокой текучестью, и без разрушения может быть достигнута деформация лишь ограниченной величины. Однако при этой и несколько более высоких температурах фторопласт обладает высокой адгезионной способностью, и отдельные его частицы могут соединяться при небольших давлениях, на чем основано получение фторопластовых изделий из порошков.

Способность фторопласта-4 менять форму под действием нагрузок при невысоких температурах называть хладотекучестью неправильно, так как наблюдаются характерные для каждой температуры конечные величины остаточной деформации [67]. Причиной такого псевдотечения фторопласта-4 является процесс рекристаллизации, начинающийся в образце при достижении напряжения определенной величины, которую можно назвать пределом псевдотекучести. С повышением температуры предел псевдотекучести резко снижается. На рис. 5 приведена зависимость деформации фторопласта-4 от продолжительности действия нагрузки [67] при различных температурах и напряжении сжатия 70 кгс/см². Предел псевдотекучести при растяжении в зависимости от температуры имеет следующие значения:

$t^\circ \text{C}$	25	50	75	100	150	200	250
$\sigma_p$ , кгс/см²	142,4	106,5	83,5	67,2	46,6	35,5	28,6

Фторопласт-4 имеет совершенную «пластическую память» или тенденцию к восстановлению первоначальной формы при нагревании выше той температуры, при которой производилось деформирование. Это свойство необходимо учитывать при изготовлении

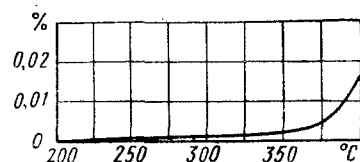


Рис. 6. Зависимость потери массы фторопласта-4 (вследствие деполимеризации) от температуры

из него изделий деформированием при повышенных температурах (температура деформирования должна быть выше рабочих температур).

Фторопласт производят в виде порошка и в виде водных суспензий [68]. Монолитный фторопласт получают из порошков прессованием при комнатной температуре с последующим спеканием при температуре 360—380° С. В данном случае имеется полная аналогия с получением монолитных металлических деталей методами порошковой металлургии. Как и для металлов возможна переработка порошков методом горячего прессования и выдавливания.

При обычных температурах фторопласт-4 представляет собой смесь участков с кристаллическим строением и аморфным, причем соотношение объемов определяется условиями (скоростью) охлаждения. При комнатной температуре фторопласт-4 относительно мягок (НВ 3—4). При повышении температуры твердость кристаллических участков изменяется мало, в то время как аморфные участки, находящиеся в высокоэластическом состоянии, размягчаются очень быстро.

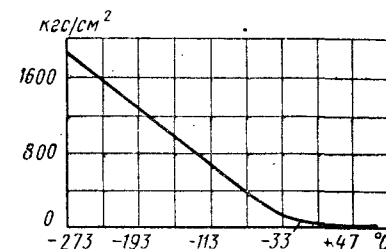
Значения механических свойств фторопласта-4 в диапазоне температуры от —60 до +120° С [67] приведены в табл. 1.

Нагревание даже до температуры 415° С не переводит фторопласт-4 из высокоэластического состояния в вязкотекучее. Фторо-

Таблица 1  
ЗАВИСИМОСТЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФТОРОПЛАСТА-4 ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура, °С	Модуль упругости при сжатии (незакаленный образец), кгс/см <sup>2</sup>	Модуль упругости при изгибе образца, кгс/см <sup>2</sup>		Предел прочности при растяжении образца, кгс/см <sup>2</sup>		Относительное удлинение при разрыве образца, %	
		закаленного	незакаленного	закаленного	незакаленного	закаленного	незакаленного
—60	18 000	13 200	27 800	—	—	—	—
—40	17 000	11 300	23 900	500	350	100	70
—20	15 000	9 800	23 300	440	325	160	100
0	11 000	7 400	18 100	330	300	190	150
+20	7 000	4 700	8 500	250	200	400	470
+40	4 500	4 000	5 100	240	180	500	650
+60	3 300	2 900	4 800	—	—	—	—
+80	2 400	2 180	3 800	200	135	500	600
+100	1 700	—	—	190	115	480	540
+120	—	1 100	2 450	—	—	—	—

Рис. 7. Зависимость предела текучести фторопласта-4 при сжатии от температуры [9]



пласт-4 при нагреве очень стабилен и при столь высокой температуре, как 300° С, уменьшение его массы в результате деполимеризации ничтожно, составляя приблизительно 0,002% за 1 ч (рис. 6). При нагревании выше 415° С начинается разложение (пиролиз) фторопласта-4, ускоряющееся при дальнейшем повышении температуры. Лишь при температуре 600° С происходит быстрая деполимеризация, конечным продуктом которой является главным образом мономер.

Хотя элементарный фтор и многие его соединения токсичны, фторопласт-4 в нормальных условиях не оказывает никакого физиологического действия на кожные покровы или внутренние органы человеческого организма. Продукты разложения и окисления фторопласта-4 при температурах выше 300° С могут быть сильно токсичными.

Фторопласт-4 не становится хрупким даже при температуре ниже температуры стеклования (около —120° С) и вплоть до температуры жидкого гелия (—269,3° С) [67]. Данные по изменению механических свойств фторопласта при низких температурах приведены в табл. 2.

Предел текучести при сжатии фторопласта резко повышается при снижении температуры (рис. 7).

Разрушающее напряжение и модуль упругости фторопласта-4 при повышении температуры изменяются значительно меньше, чем у других термопластичных полимеров (полиэтилена, нейлона). Относительное удлинение при повышении температуры до 50° С быстро растет [30], а затем остается практически постоянным вплоть до температуры плавления. Все это позволяет применять фторопласт-4 при повышенных температурах.

Таблица 2  
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФТОРОПЛАСТА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ [67]

Температура, °С	Сопротивление сжатию (при деформации 0,2%), кгс/см <sup>2</sup>	Модуль упругости (с точностью до 10%), кгс/см <sup>2</sup>
—269,3	1 750—1 960	70 000
—233,3	1 554	—
—193,3	1 260	—
—153,3	980	—
—123,3	—	52 500
—93,3	350	—

Ниже приведены физико-механические свойства фторопласта-4 по данным, содержащимся в работах [30, 67].

#### Физико-механические свойства фторопласта-4

Плотность закаленного материала, г/см <sup>3</sup> (степень кристалличности около 50%)	2,15
Плотность незакаленного материала, г/см <sup>3</sup> (степень кристалличности 65%)	2,20
Плотность кристаллитов, г/см <sup>3</sup>	2,35
Плотность аморфных участков, г/см <sup>3</sup>	2,007
Температура плавления кристаллов, °С	+327
Температура стеклования (кристаллизации) аморфных участков, °С	—120
Температура наибольшей скорости кристаллизации, °С	310—315
Температура разложения (пиролиза), °С	Выше 415
Теплопроводность, кал/(см·с·°С)	(5,9—6,0)·10 <sup>-4</sup>
Удельная теплоемкость, кал/(г·°С)	0,25
Водопоглощение за 24 ч, %	0,00
Предел прочности образцов при растяжении, кгс/см <sup>2</sup> :	
незакаленных	140—250
закаленных	160—315
Относительное удлинение при разрыве, %	250—500
Остаточное удлинение, %	250—350
Предел прочности при статическом изгибе, кгс/см <sup>2</sup>	110—140
Модуль упругости при изгибе, кгс/см <sup>2</sup> :	
при +20° С	4 700—8 500
при —60° С	13 200—27 800
Удельная ударная вязкость, кгс·см/см <sup>2</sup>	100
Нагрузка на 1%-ную деформацию при 23° С, кгс/см <sup>2</sup> :	
кратковременная	70
длительная	42
Деформация (%) при 50° С для нагрузок:	
84 кгс/см <sup>2</sup> (24 ч)	4—8
140 кгс/см <sup>2</sup> (24 ч)	25
Твердость по Бринеллю <i>HВ</i>	3—4
Удельное объемное электрическое сопротивление Ом·см	>10 <sup>17</sup> (до 10 <sup>20</sup> )
Электрическая прочность при толщине 4 мм, кВ/мм	25—27
Горючесть	Не горит

Коэффициент линейного расширения  $\alpha$  фторопласта-4, определенный на образцах, предварительно освобожденных от внутренних напряжений, высок и имеет сложную зависимость от температуры (рис. 8). При температурах около 20° С наблюдается ярко выраженное изменение величины коэффициента.

Химическая стойкость фторопласта превышает даже стойкость золота и платины. На фторопласт-4 действуют только расплавленные щелочные металлы и растворы их в аммиаке, трехфтористый хлор и элементарный фтор, причем действие их проявляется лишь при высоких температурах. Крепкие и разбавленные кислоты, концентрированные растворы щелочей и самые сильные окисли-

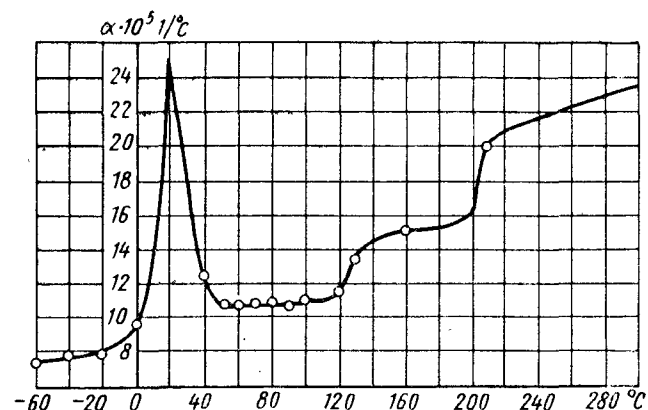


Рис. 8. Зависимость коэффициента линейного расширения  $\alpha$  фторопласта-4 от температуры

тели не действуют на фторопласт-4. Он не смачивается водой и не набухает ни в одном из растворителей, даже во фторированных органических веществах.

Под действием внешней нагрузки фторопласт-4 начинает течь, что приводит к остаточным деформациям конечной величины. Чем выше температура, тем при меньшей нагрузке начинается течение. Под действием высоких давлений остаточная деформация фторопласта-4 без нарушения целостности может быть очень большой (при прокатке можно обжать фторопласт в 3—3,5 раза). При этом прочность его резко возрастает, а удлинение снижается. При нагревании выше температуры, при которой производилось деформирование фторопласта, начинается восстановление формы и свойств деформированных образцов фторопласта, завершающееся при достижении +327° С.

Характер деструкции полимера при действии ионизирующего облучения зависит от соотношения прочности связей в главной и боковых цепях. Если прочность связей главной цепи выше, то происходит сшивание молекул полимера. У политетрафторэтилена же прочность связи С—С главной цепи ниже прочности связи С—F, поэтому при ионизирующем облучении фторопласта-4 в первую очередь разрушаются связи С—С, что приводит к деструкции молекул полимера. Молекулярный вес при этом уменьшается и материал становится хрупким. Фтористые полимеры уже после относительно небольшой дозы облучения на воздухе вначале твердеют, а затем превращаются в порошок [30].

Ниже для различных полимеров, применяющихся в качестве материалов для подшипников скольжения, приведены дозы радиации, снижающие в 2 раза прочность на разрыв или вызывающие чрезмерное охрупчивание полимера [94]:

Полимер	Доза радиации, снижающая прочность на 50% (мегарад)
Эпоксидная смола	2000
Полиэфирная смола	1250
Фенолоформальдегидная смола	500
Нейлон	250
Полиэтилен	250
Политетрафторэтилен	100
Полиацетальная смола	<10

Следует, однако, принимать во внимание, что фторопласт, входящий в состав металлополимерных подшипников, до некоторой степени защищен от действия радиации металлическими основой и корпусом подшипника. Кроме того, имеются данные, что его стойкость против действия ионизирующего облучения в вакууме и инертных средах выше, чем на воздухе [94].

**Суспензии политетрафторэтилена.** Для ряда применений целесообразно иметь политетрафторэтилен в виде тонкодисперсных стабильных суспензий. Состоят они из коллоидных частиц полимера, удерживаемых во взвешенном состоянии каким-либо поверхностно-активным веществом. Так, для этой цели в суспензии, производимые в СССР, добавляется концентрат ОП-7 [68]; в некоторые суспензии, производимые за рубежом, добавляют состав, именуемый «Тритон 100Х» [96]. Суспензии применяют для нанесения покрытий, изготовления тонких пленок, пропитки пористых изделий и получения композиций с различными наполнителями. Водные суспензии фторопласта состоят из отрицательно заряженных гидрофобных частиц, средним диаметром порядка 0,3 мкм. Они стабилизированы смесью неионогенных и анионогенных смачивающих поверхностно-активных веществ.

В СССР выпускают три разновидности суспензий [68]: 1) фторопласта-4ДВ, стабилизированную добавкой 3% (к весу полимера) поверхностно-активных веществ; 2) фторопласта-4Д, стабилизированную добавкой 9—12% поверхностно-активных веществ; 3) фторопласта-4ДП, стабилизированную добавкой до 12% поверхностно-активных веществ.

Все эти суспензии содержат около 60% фторопласта по массе (40% по объему), имеют плотность порядка 1,5 г/см<sup>3</sup> и вязкость около 15 сП. Суспензии без стабилизатора (смачивателя) не выпускают, так как они быстро коагулируют в результате столкновения частиц при их броуновском движении. Даже при наличии стабилизатора суспензии легко коагулируют при сильном взбалтывании, энергичном перемешивании, замораживании, кипячении, прибавлении электролитов или смешивающихся с водой органических растворителей (спирты, ацетон).

Суспензии фторопласта при длительном хранении слегка оседают, и должны периодически диспергироваться аккуратным покачиванием или встряхиванием. В отдельных случаях необходимы суспензии меньшей концентрации и вязкости. Для этого они могут быть разбавлены дистиллированной водой. Соотноше-

Таблица 3  
СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ И ПЛОТНОСТЬЮ СУСПЕНЗИИ

Содержание твердого вещества, % (по массе)	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание фторопласта в 1 см <sup>3</sup> , г
35	1,24	0,436
40	1,29	0,515
45	1,34	0,601
50	1,38	0,693
60	1,5	0,900

ния между содержанием фторопласта в суспензии и ее плотностью даны в табл. 3 [96].

**Другие фторосодержащие полимеры.** В последние годы разработано большое количество фторосодержащих полимеров [9], молекулы которых кроме углерода и фтора содержат и другие элементы (хлор, водород и т. п.). К этим полимерам относятся: политрифторхлорэтилен или фторопласт-3 ( $-\text{CF}_2-\text{CFCl}-$ )<sub>n</sub>, поливинилфторид ( $-\text{CH}_2-\text{CHF}-$ )<sub>n</sub>, поливинилиденфторид ( $-\text{CH}_2-\text{CF}_2-$ )<sub>n</sub>; сополимеры тетрафторэтилена с гексафторпропиленом, фтористым винилом, олефинами типа изобутилена и пропилена, стиролом, фтористым и хлористым винилиденом, винилацетатом, сополимеры фтористого винилидена, например, с гексафторпропиленом, которые могут подвергаться вулканизации, и т. д. Некоторые из этих полимеров выпускаются в СССР [9] под марками: фторопласт-40, фторопласт-42, фторкаучук СКФ-32 и фторкаучук СКФ-26.

Полимеры эти обладают рядом ценных свойств фторопласта-4 и многие из них могут перерабатываться как обычные термопластичные полимеры. Однако по химической стойкости, термостойкости и антифрикционным свойствам они, как правило, несколько уступают фторопласту-4.

Кроме фторопласта-4 из атомов только углерода и фтора состоят молекулы сополимера тетрафторэтилена и гексафторпропилена ( $-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}-$ )<sub>n</sub>. Этот полимер, отлича-

ющийся от политетрафторэтилена наличием боковых групп  $\text{CF}_3$ , так же как и последний, обладает высокой химической стойкостью к действию различных агрессивных сред, высокой стойкостью к термоокислительным воздействиям, а также к термическому воздействию (в инертных средах и в вакууме). В отличие от политетрафторэтилена этот сополимер под воздействием ионизирующего облучения не подвергается деструкции, а «сшивается».

К сожалению, наличие боковых групп  $\text{CF}_3$  ухудшает «врожденные» антифрикционные свойства политетрафторэтилена [93].

## 2. Наполнители фторопласта

Для повышения механических свойств и износостойкости фторопласта-4 в него вводят различные мелкодисперсные наполнители. Наиболее часто для этого используют твердые вещества, обладающие высокими антифрикционными свойствами, так называемые твердые смазки. Металлические наполнители повышают теплопроводность композиционных материалов на основе фторопласта, механические свойства и износостойкость. Неорганические неметаллические наполнители вводят главным образом для повышения механических свойств и износостойкости при сохранении высоких изоляционных свойств. Коэффициент трения при этом может несколько повышаться.

Твердой смазкой является любой твердый материал, уменьшающий механическое взаимодействие между поверхностями, находящимися в относительном движении при действии нормальной нагрузки. Идеальная твердая смазка должна удовлетворять следующим требованиям:

а) иметь низкую прочность на срез в направлении скольжения и высокую прочность на сжатие в направлении действия приложенной нагрузки, т. е. физические свойства материала должны быть анизотропны (это позволяет получить низкие значения коэффициента трения);

б) адгезия к материалу основы должна превышать прочность на срез самой смазки, в противном случае твердая смазка будет быстро удалена из зоны трения (по этой причине тальк и слюда не являются хорошими твердыми смазками);

в) когезия между частицами должна быть большой, во всяком случае достаточной для образования на поверхностях трения относительно толстого ориентированного слоя смазки;

г) для правильной ориентации частиц твердой смазки между поверхностями трения размеры их в направлении низкого сопротивления срезу должны быть наибольшими;

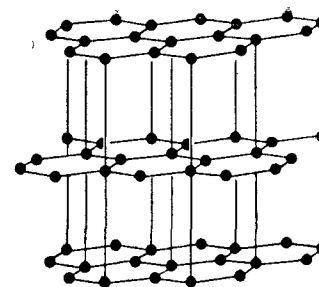
д) смазка не должна претерпевать пластическую деформацию и выдавливаться под действием больших действующих перпендикулярно направлению скольжения нагрузок.

Как правило, не все приведенные требования могут быть удовлетворены одновременно.

По сравнению с жидкими смазками, анизотропные твердые смазки могут работать лишь с более высокими коэффициентами трения (0,05—0,16) и, соответственно, с большими затратами работы. Однако во многих практических случаях определяющим фактором является заданная длительность работы той или иной детали или узла, а не потребляемая на преодоление сил трения мощность.

Наиболее широко применяются две твердые смазки — графит и дисульфид молибдена, в которых анизотропия свойств сочетается с хорошей адгезией к подложке (основе). Ниже при-

Рис. 9. Кристаллическая структура графита



ведены свойства этих, а также других представляющих интерес (с точки зрения применения в качестве наполнителей для фторопласта) твердых смазочных веществ. Исследование слоистых материалов, применяемых в качестве твердых смазок, началось с графита, и многие положения, полученные при этих исследованиях, были применены впоследствии к дисульфиду молибдена.

Графит является одной из двух кристаллических модификаций углерода, наиболее устойчивой при обычных условиях [4, 91, 73]. В отличие от другой модификации — алмаза, графит кристаллизуется в гексагональной сингонии. Кристаллическая решетка графита слоистая. Слои образованы рядом параллельных плоских сеток (рис. 9) — плоскостей базиса, представляющих собой атомы углерода, расположенные в вершинах правильных шестиугольников. Расстояние между атомами в плоскости базиса составляет 1,42 Å, а расстояние между плоскостями — 3,35 Å.

Атомы углерода имеют 2s- и 2p-электрона в наружной электронной оболочке. В кристаллической решетке графита происходит гибридизация 2s- и 2p-орбиталей (тригональная гибридизация). Благодаря этому возникают три эквивалентные орбитали под углом 120° одна к другой, лежащие в одной плоскости. Эти орбитали, взаимодействуя с орбиталями соседних углеродных атомов, образуют прочные ковалентные связи (сигма связи) в плоскости базиса. Остаточный электрон образует часть облака  $\pi$ -электронов, которое находится между любыми двумя соседними плоскостями базиса и существенно влияет на связь между слоями (усиливая относительно слабое вандерваальсовское взаимодействие). Энергия связи между атомами в плоскостях базиса близка 100 ккал/на грамм-атом, энергия же связи между слоями составляет всего несколько килокалорий. Это является причиной весьма большой анизотропии свойств графита в параллельном и перпендикулярном слоям направлениях. Кристаллы его легко расслаиваются по плоскости базиса. Твердость графита в направлении слоев приближается к твердости алмаза (энергия связи между атомами углерода в кристаллической решетке алмаза близка энергии межатомной связи в плоскости базиса), в перпендикулярном же направлении она очень мала. Вследствие этого графит считается очень мягким веществом (твердость по Моосу равна единице). Теплопроводность и электропроводность кристаллов графита в направлении слоев и перпендикулярно им отличаются в несколько раз, а коэффициент термического расширения — на два, три порядка.

Кристаллиты графита и других веществ со слоистой структурой отличаются анизотропией геометрических размеров. Толщина  $t$ , измеряемая перпендикулярно к плоскости базиса ( $c$  — ось), меньше, чем длина  $L$ , измеряемая вдоль плоскости базиса ( $a$  — ось). Для графита «коэффициент формы»  $L/t$  может изменяться по крайней мере на порядок (приблизительно от 1 до 10). Если  $L/t > 1$ , то создаются условия для ориентации кристаллитов между скользящими поверхностями, что с теоретических позиций является идеальным для смазки.

Высокая энергия связи между атомами углерода в кристаллической решетке графита обуславливает чрезвычайно высокую температуру плавления графита ( $3850 \pm 50^\circ \text{C}$ ). Плотность графита составляет  $2,21\text{--}2,25 \text{ г/см}^3$ . Графит и графитовые материалы обладают малой химической активностью. Они стойки в большинстве кислот и щелочей, растворах солей и органических растворителях. Графит практически не вступает в химическое взаимодействие с веществами, воздействующими на него в направлении, перпендикулярном плоскости базиса. В направлении же вдоль плоскостей многие вещества могут внедряться в межплоскостное (межбазисное) пространство графита. При этом расстояние между плоскостями увеличивается.

В промышленности применяют как натуральный графит, так и искусственный (синтетический). Графит, встречающийся в природе, как правило, содержит большое количество минеральных примесей. Руду для превращения в технический графит подвергают обогащению. Искусственный графит получают нагреванием угля до  $2200\text{--}2500^\circ \text{C}$  в электрической печи. При этом происходит перекристаллизация (графитизация) угля и испарение зольных примесей. В результате можно получить очень чистый графит.

Коллоидальные синтетические графиты отличаются большой удельной поверхностью, нередко превышающей  $100 \text{ м}^2/\text{г}$ . Способы измельчения графита разработаны давно. Графитовые коллоидные препараты выпускает фирма «Ачесон» (США) с 1904 г. В СССР такие препараты выпускаются Воскресенским химкомбинатом. Технология измельчения графита изложена в работе [62].

Максимальная рабочая температура, при которой графит может применяться в качестве твердой смазки, сильно зависит от внешних условий и режимов работы. При непрерывной работе порошкообразного графита на воздухе температура, при которой начинается интенсивное окисление, зависит от удельной поверхности, состава газообразной атмосферы и скорости подъема температуры. Результаты термогравиметрического анализа порошка графита с удельной поверхностью  $170 \text{ м}^2/\text{г}$  в атмосфере сухого кислорода при повышении температуры со скоростью  $3^\circ \text{C}$  в минуту приведены на рис. 10 [91].

Изменение температуры окисления в сухом кислороде с увеличением удельной поверхности синтетического графита приведено на рис. 11 [91]. При увеличении удельной поверхности

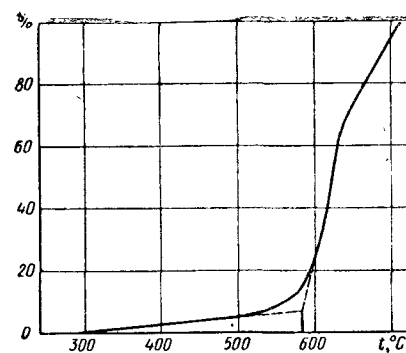


Рис. 10. Зависимость потери массы от температуры: удельная поверхность  $170 \text{ м}^2/\text{г}$ , атмосфера — сухой кислород; скорость повышения температуры  $3^\circ \text{C}/\text{мин}$ ; температура окисления  $585^\circ \text{C}$

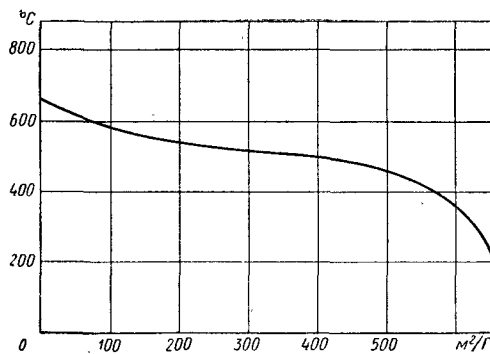


Рис. 11. Зависимость температуры окисления синтетического графита от удельной поверхности (в атмосфере сухого кислорода)

свыше  $500 \text{ м}^2/\text{г}$  начинается резкое снижение температуры окисления и порошок в конце концов становится пирофорным.

Представления, высказанные еще В. Л. Брэггом, что относительно большое расстояние между плоскостями является результатом низкой адгезии между ними и что этим объясняется смазочное действие графита, чересчур упрощены. Оценочные значения энергии связи между слоями колеблются от 1 до 20 ккал/моль, по сравнению с  $85 \text{ ккал/моль}$  для связей между атомами в пределах каждой плоскости. Сила, необходимая для среза графита вдоль плоскостей базиса, зависит не только от прочности единичной связи, но и от количества одновременно разрушаемых связей. Срез одновременно по всем связям между плоскостями требует приложения очень больших сил и практически нереален. Соображения, основанные на рассмотрении энергии связи, свидетельствуют о том, что разделение кристаллитов по плоскости базиса в большинстве случаев происходит «раскалыванием» с края, при котором одновременно разрушаются лишь несколько связей. Справедливость такой точки зрения подтверждается наблюдаемым влиянием внешней среды на смазочные свойства графита.

П. Дж. Брайант и другие исследователи [91] измеряли энергию связи между слоями (плоскостями базиса) в кристаллитах графита в различных газовых атмосферах. Методика измерения заключалась в раскалывании кристалла графита по плоскости спайности (образовании начальной трещины). После того как система приходила в равновесие, в камеру медленно подавали газ. Если энергия связи при этом уменьшалась, то равновесие нарушалось и трещина распространялась далее. Энергия связи, измеренная в вакууме, составляла  $1750 \text{ эрг/см}^2$  ( $6,6 \text{ ккал/моль}$ ),



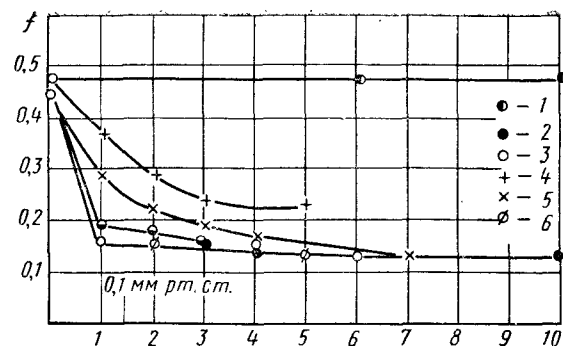


Рис. 12. Влияние газовой среды на коэффициент трения спектрально чистого графита:

1 — азот; 2 — кислород; 3 — гептан; 4 — водород; 5 — пары воды; 6 — этиловый спирт

что находится в хорошем соответствии с теоретическим значением, найденным на основе квантово-механических расчетов (2500 эрг/см<sup>2</sup> или 9,4 ккал/моль) и на порядок выше, чем значения, полученные для графита в воздушной среде. Было установлено, что воздух, кислород и пары воды снижают энергию связи. Влияние кислорода обусловлено взаимодействием неспаренных электронов газовых молекул и  $\pi$ -электронов графита. Авторы пришли к заключению, что графит сам по себе не является хорошей сухой смазкой и лишь присутствие адсорбированных газов и паров приводит к снижению трения и износа графита.

Влияние среды на трение графита исследовал Р. Х. Сэвидж [73]. Он установил, что трение графита по графиту или металлу в вакууме, при тщательном обезжиривании и удалении адсорбированных газов высоко ( $f$  до 0,8). Высокое трение сопровождается интенсивным изнашиванием даже в том случае, когда плоскость базиса расположена параллельно поверхности скольжения. Это привело Р. Х. Сэвиджа в общем к правильному заключению, что для обеспечения смазочного действия графита необходимо уменьшить поверхностную энергию адсорбцией. Это представление распространяется им и на ненасыщенные валентные связи углерода у краев кристаллитов, возникшие при разрушении кристаллической решетки (дроблении кристаллов).

В сравнительно недавней работе Г. В. Роу, изучавший в различных газовых атмосферах трение одноименных графитовых образцов [91] после предварительной их очистки прокаливанием в вакууме при температуре 1100° С, получил близкие описанным выше результаты. В вакууме коэффициент трения высокий (рис. 12), но при низких давлениях кислорода, паров воды и других легко конденсирующихся газов снижается до 0,15.

Резкое повышение коэффициента трения графита в вакууме после прокаливания при высоких температурах наблюдалось

и в наших экспериментах [61]. Значение коэффициента трения при комнатной температуре составляло примерно 0,8. Повышение температуры выше 500° С приводило к постепенному снижению коэффициента трения до 0,2—0,15. Аналогичная картина наблюдалась и в инертных газовых средах. Это свидетельствует о большой роли адсорбционных слоев в обеспечении низкого трения при комнатной и невысоких температурах. При высоких температурах роль адсорбции снижается и низкое трение может быть объяснено ослаблением межплоскостных связей.

Дж. Спрэдборо [97] с помощью электронного микроскопа обнаружил, что при скольжении медного ползуна по поверхности базиса естественного или синтетического графита происходит разделение слоев вследствие скола, и отделившиеся плоские частицы сворачиваются в ролики. Низкое трение графита он пытался объяснить тем, что ролики играют роль тел качения и при их образовании трение скольжения переходит в трение качения.

С этих позиций повышение трения в вакууме Спрэдборо объясняет тем, что вследствие повышения энергии связи между слоями ролики не образуются. Эта гипотеза не подтвердилась.

Для практического применения графита (а также и дисульфида молибдена) в качестве твердой смазки важен установленный факт [78], что лучшими антифрикционными свойствами обладают порошки, частицы которых имеют большую площадь по плоскости спайности и малую площадь полярных кромок (образующихся при разрушении частиц в процессе дробления перпендикулярно плоскостям спайности). Оптимальные свойства имеют порошки, полученные при дроблении на шаровой мельнице в среде  $n$ -гептана.

**Дисульфид молибдена ( $\text{MoS}_2$ ),** или молибденит, был известен еще древним грекам и его часто принимали за свинец или графит. Молибденит, являющийся основным сырьем для изготовления молибдена, добывается в очень больших количествах. Смазочные свойства дисульфида молибдена известны давно, но интенсивно применять его в качестве смазочного материала начали лишь в последние десятилетия [4, 5, 32, 62, 73, 78]. В настоящее время природный дисульфид молибдена используют в качестве добавки к маслам и пластичным смазкам, как составную часть композиционных антифрикционных материалов (на основе полимеров и металлов), а также в виде поверхностных антифрикционных покрытий, отличающихся как применяемым связующим и добавками, так и способом нанесения. Кристаллы дисульфида молибдена имеют металлический блеск. Цвет его изменяется от синевато-черного до черного. Плотность  $\text{MoS}_2$  составляет 4,8 г/см<sup>3</sup>, твердость по Моосу — 1,0—1,5. Электрическое сопротивление большое при низком напряжении и падает с увеличением напряжения. Появление проводимости в  $\text{MoS}_2$  вызывается как нагревом проходящим током, так и действием самого электрического



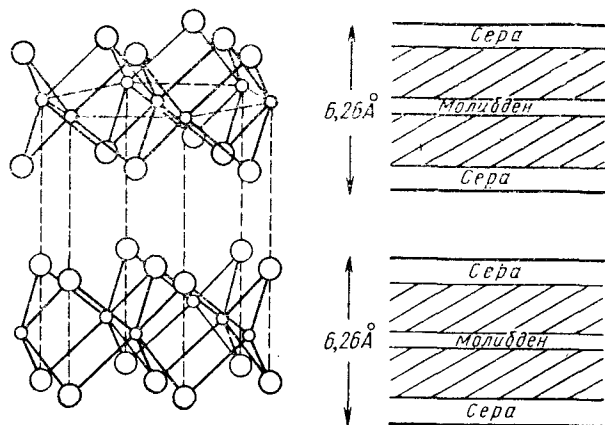


Рис. 13. Кристаллическая структура природного дисульфида молибдена (молибденита)

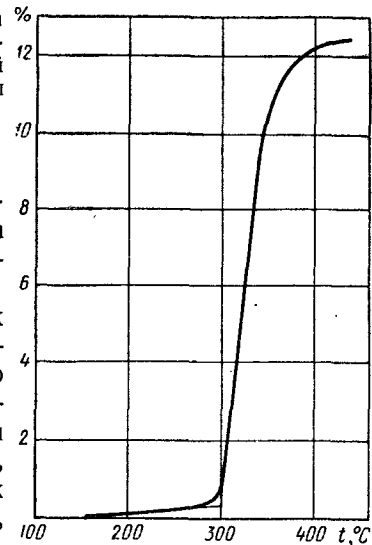
поля. При температурах выше  $850\text{--}900^\circ\text{C}$  он становится хорошим проводником.

Дисульфид молибдена  $\text{MoS}_2$  во многом напоминает графит. Он также имеет слоистую гексагональную структуру (рис. 13), в которой связи между атомами молибдена и серы сравнительно короткие, а расстояния между слоями серы — большие. Для синтетического дисульфида молибдена характерна ромбоэдрическая структура [91].

Углы между связями  $\text{S—Mo—S}$  свидетельствуют о их ковалентном характере. Энергия связи в слоях, содержащих единичные комплексы  $\text{S—Mo—S}$ , велика. Связь между соседними слоями атомов серы мала, поэтому кристаллы дисульфида молибдена легко расщепляются по плоскостям спайности. Поверхностная энергия этих плоскостей низкая. Кромки или торцы кристаллов имеют высокую поверхностную энергию и в воздухе, по-видимому, легко вступают в реакцию (в первую очередь с кислородом). В этом случае состав кромок соответствует окислу молибдена, относительно стабильному в обычных условиях.

Дисульфид молибдена обладает очень высокой радиационной стойкостью — каких-либо изменений не наблюдается даже при дозе радиации  $5 \cdot 10^9$  рад [4]. Это позволяет применять его в условиях высокой искусственной или естественной радиации (атомная промышленность, космические исследования). Дисульфид молибдена химически мало активен. Он энергично реагирует с фтором, при нагревании реагирует с хлором, образуя  $\text{MoCl}_5$ , а с бромом практически во взаимодействие не вступает. Дисульфид молибдена растворяется в царской водке, окисляется в контакте с горячей серной или азотной кислотами, образуя окисел  $\text{MoO}_3$ . При высоких

Рис. 14. Зависимость потери массы порошка дисульфида молибдена от температуры, удельная поверхность  $3,7 \text{ м}^2/\text{г}$ ; атмосфера — сухой кислород; скорость повышения температуры  $3^\circ\text{C}/\text{мин}$ ; температура окисления  $298^\circ\text{C}$ .



температурах водород может восстанавливать  $\text{MoS}_2$  до чистого металла без образования каких-либо промежуточных соединений.

В вакууме и инертных газовых средах дисульфид молибдена стабилен и обеспечивает низкое трение до температур  $1100\text{--}1150^\circ\text{C}$ . При нагреве на воздухе  $\text{MoS}_2$  окисляется до  $\text{MoO}_3$  и серы или  $\text{SO}_2$ . Считают, что образование окисных пленок начинается при температуре  $350^\circ\text{C}$ , а интенсивное окисление — при температурах выше  $480^\circ\text{C}$ , однако первые изменения, заключающиеся в некотором увеличении массы образцов, наблюдаются уже при температуре  $220^\circ\text{C}$  [78].

Температура начала интенсивного окисления порошкообразного дисульфида молибдена на воздухе зависит от удельной поверхности. Результаты термогравиметрического анализа порошка дисульфида молибдена с удельной поверхностью  $3,7 \text{ м}^2/\text{г}$  в атмосфере сухого кислорода при повышении температуры со скоростью  $3^\circ\text{C}$  в минуту приведены на рис. 14 [91]. Температура окисления равна  $298^\circ\text{C}$ . Максимальное теоретическое изменение массы, равное  $10,08\%$ , соответствует реакции  $2\text{MoS}_2 + 7\text{O}_2 = 2\text{MoO}_3 + 4\text{SO}_2$ . Как и для графита, увеличение удельной поверхности порошка дисульфида молибдена приводит к снижению температуры окисления. Однако достигаемые обычными способами размельчения значения удельной поверхности для дисульфида молибдена значительно меньше, чем для графита.

В некоторых случаях найденная описанным способом температура окисления не определяет верхнего температурного предела, при котором может применяться твердая смазка, так как он зависит также от длительности работы и состава газовой атмосферы. Значения коэффициента трения и при частичном окислении продолжают оставаться низкими при условии, если сохраняется непрерывная подповерхностная пленка дисульфида молибдена, прочно связанная с подложкой. Поверхностная пленка трехоксида молибдена в этом случае не оказывает влияния на действие твердой смазки.

В результате размельчения образуются агрегаты случайно ориентированных кристаллитов. Связи между частицами могут изменяться в широких пределах (от взаимодействия ненасыщенных

валентных сил по кромкам кристаллов до слабых связей между плоскостями базиса). Если такие агрегаты попадают между поверхностями трения, они при действии нормальной нагрузки и сдвига разрушаются на отдельные кристаллиты, которые ориентируются плоскостями базиса более или менее параллельно основе. Это сопровождается физическим (вандерваальсовские силы) и механическим закреплением кристаллитов на поверхностях трения. Они в этом случае действуют как разделяющая металлические поверхности прослойка и как смазка выступающих неровностей, устраняющая возможность их холодной сварки. Скольжение происходит между двумя образовавшимися ориентированными слоями твердого вещества со слоистой структурой. Это безусловно упрощенное представление о механизме действия твердых смазок. На самом деле при трении с участием твердых смазок большую роль играют трибохимические процессы, уменьшающие непосредственное взаимодействие поверхностей трения.

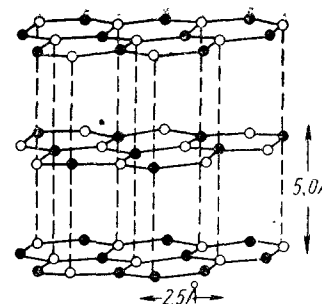
Многими авторами экспериментально установлено, что трение дисульфида молибдена (монокристалла или образца, спрессованного из порошка) в атмосфере сухого воздуха мало ( $f \approx 0,1$ ). Мало также трение в сухих инертных газах и азоте ( $f \approx 0,1 \div 0,15$ ). Во влажном же азоте коэффициент трения повышается до 0,22. Это сопровождается выделением сероводорода. Такое повышение трения является частично необратимым. В отличие от графита пары органических веществ не уменьшают трение, а толуол даже несколько повышает.

В противоположность графиту трение дисульфида молибдена в вакууме, даже после предварительного прокаливания в вакууме до  $800^\circ\text{C}$ , не повышалось. При комнатной температуре коэффициент трения равен  $\sim 0,2$  (коэффициент трения графита в таких же условиях превышал 0,6). При температурах выше  $1000^\circ\text{C}$  в вакууме начинается разложение дисульфида молибдена (сера удаляется), что приводит в конце концов к увеличению трения. Трение же графита при повышении температуры снижается.

Описанные результаты исследований свидетельствуют о том, что низкое трение  $\text{MoS}_2$  обеспечивается очень слабым взаимодействием между плоскостями спайности. Адсорбция газов и паров для низкого трения не нужна. Следует, однако, учитывать, что дисульфид молибдена должен быть тщательно очищен от абразивных примесей [78].

**Нитрид бора (BN)** может существовать в двух кристаллографических модификациях. Одна из них — кубическая — образуется при действии высоких давлений и температур и при обычных условиях метастабильна. По строению и свойствам эта модификация является аналогом алмаза. Другая кристаллическая модификация нитрида бора — аналог графита. Соответствие кристаллических структур простирается настолько далеко, что вандерваальсовские связи между плоскостями усилены парами s-электронов атомов азота. Гексагональная решетка с атомами азота и

Рис. 15. Кристаллическая структура гексагонального нитрида бора



бора, располагающимися попеременно, показана на рис. 15. Расстояние между атомами в плоскости базиса равно  $2,5 \text{ \AA}$ , расстояние между плоскостями базиса составляет  $5,0 \text{ \AA}$  [73].

В отличие от графита гексагональный нитрид бора не имеет металлической связи между слоями, поэтому он обладает низкой электропроводностью. Плоскости спайности нитрида бора, в отличие от графита и дисульфида молибдена, состоят из различных атомов. Связь B—N имеет частично ионный характер. Окислемость нитрида бора сильно зависит от температуры его получения или предварительного прокаливания. В форме плотных изделий нитрид бора начинает окисляться при температуре  $700^\circ\text{C}$ , интенсивное окисление наступает при  $1000\text{—}1100^\circ\text{C}$ .

Г. В. Роу исследовал трение между образцами из нитрида бора с гексагональной решеткой, полученными спеканием (по-видимому, горячим прессованием), в различных атмосферах и в вакууме. Результаты (рис. 16) [91] в общем подобны наблюдавшимся для графита (см. рис. 12).

Р. Ф. Дикон и Дж. Ф. Гудмен [73], изучая трение пленок свободного нитрида бора между платиновыми поверхностями в атмосфере воздуха, обнаружили ориентацию кристаллитов нитрида бора на поверхностях трения. Коэффициент трения на воздухе увеличился от 0,15 при комнатной температуре до 0,4 при  $150^\circ\text{C}$ , что находится в соответствии с потерей массы (определенной термобарометрическим способом), обусловленной испарением физически адсорбированной воды. Скольжение при температуре выше  $150^\circ\text{C}$  становится неустойчивым и  $f$  начинает медленно снижаться, достигая при температуре  $500^\circ\text{C}$  значения 0,1. Так как эта тем-

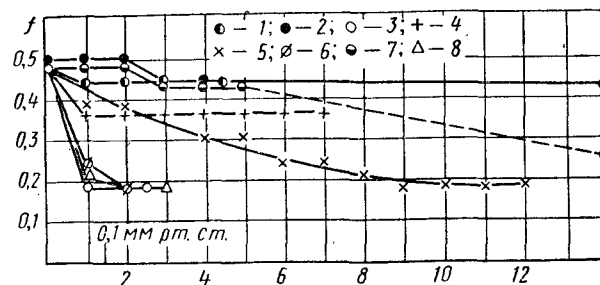


Рис. 16. Влияние газовой среды на трение нитрида бора:

1 — азот; 2 — кислород; 3 — гептан; 4 — водород; 5 — вода; 6 — этиловый спирт; 7 — сухой воздух; 8 — каприловая кислота

пература слегка превышает температуру плавления окиси бора ( $450^{\circ}\text{C}$ ), снижение коэффициента трения может вызываться снижением адгезии между кристаллитами, покрытыми хемосорбированными слоями кислорода.

Результаты исследований показывают, что трение нитрида бора подобно трению графита. Однако значения коэффициента трения не столь низки, что обусловлено, по-видимому, более прочными связями между поверхностями кристаллитов. Опыты в вакууме и различных газовых средах показали, что для обеспечения низкого трения нитрида бора необходимы адсорбированные поверхностные пленки. Малое влияние кислорода на трение нитрида бора можно, по-видимому, объяснить тем, что кислород не проникает между плоскостями базиса.

**Дисульфид вольфрама ( $\text{WS}_2$ ).** так же как и дисульфид молибдена, имеет гексагональную кристаллическую решетку. Свойства сульфидов этих двух элементов VI А группы периодической системы очень близки. Дисульфид вольфрама в достаточной мере химически инертен. Он более стоек к воздействию кислорода при нагревании, чем  $\text{MoS}_2$  (в атмосфере воздуха он стабилен до  $510^{\circ}\text{C}$ ). Поэтому несмотря на его высокую стоимость (по зарубежным данным превышающей стоимость  $\text{MoS}_2$  в 3 раза) его применение в обычной атмосфере целесообразно при температурах выше  $400^{\circ}\text{C}$ .

В вакууме до разрежения  $10^{-10}$  мм рт. ст.  $\text{WS}_2$  и  $\text{MoS}_2$  ведут себя практически идентично, показывая хорошие смазочные свойства до температур, превышающих  $1000^{\circ}\text{C}$ .

**Фторированный графит** получен еще в 1934 г. реакцией между графитом и фтором при повышенных температурах. Состав его соответствует формуле  $(\text{CF}_x)_n$  при  $x$ , близком единице, поэтому его еще называют полимонофторид углерода. Цвет фторированного графита в зависимости от соотношения количества атомов фтора и углерода изменяется от серого до белого (при  $x = 1,12$  цвет белый). Полагают, что между атомами фтора и углерода существуют ковалентные связи. Гексагональная кристаллическая решетка графита искажена — несколько увеличены расстояния между атомами углерода и, что более важно, увеличены расстояния между образованными углеродными атомами плоскостями от  $3,4 \text{ \AA}$  в графите, до  $8\text{—}8,17 \text{ \AA}$  во фторированном графите. Изменение структуры сопровождается снижением сопротивления срезу и расщеплению в направлении, параллельном плоскости базиса.

Первые сведения о исследованиях фторированного графита в качестве твердой смазки появились недавно [77, 78, 91]. В опубликованных работах сообщается, что долговечность смазочных пленок фторированного графита выше, чем графита и дисульфида молибдена. Коэффициент трения фторированного графита ниже, чем у графита. Следует учитывать, что изменение химического состава фторированного графита в довольно широких пределах может повлиять на его поведение при трении (хотя и имеются

сведения, что изменение  $x$  от 0,7 до 1,12 не оказывает заметного влияния на антифрикционные свойства смазочных пленок из фторированного графита).

По существу фторированный графит можно рассматривать как одну из разновидностей фторополимеров и в действительности он ближе по своим свойствам к фторопласту-4, чем к графиту.

**Другие твердые смазки.** В последние годы исследуется возможность применения в качестве твердых смазок других (кроме описанных  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$ ) халькогенидов (соединений с элементами VI группы периодической системы элементов — серой, селеном и теллуром) переходных металлов IV, V и VI групп периодической системы элементов [5, 79]. Однако особых преимуществ по сравнению с дисульфидом молибдена у селенидов и теллуридов названной девятки тугоплавких металлов не обнаружено (равно, как и сульфидов). Это позволяет считать, что из этой группы твердых смазочных материалов дисульфид молибдена еще длительное время будет занимать главенствующее положение.

Смазывающей способностью обладают также и другие материалы: сульфиды ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ,  $\text{PbS}$ ), галогениды ( $\text{CdI}_2$ ,  $\text{PbI}_2$ ,  $\text{BiI}_3$ ,  $\text{AgI}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ ) окислы ( $\text{PbO}$ ) и т. д.

В качестве твердых высокотемпературных смазочных материалов испытывали [32] самые разнообразные порошкообразные неорганические материалы: металлы, окислы, фториды; фторбериллаты, хлориды, бромиды, иодиды, сульфиды, сульфаты, фосфаты, карбонаты и т. д. Наиболее важное влияние на смазочное действие таких материалов оказывают процессы трибохимического взаимодействия с металлами, в результате чего образуются поверхностные пленки химических соединений, снижающих коэффициент трения и устраняющих возможность проявления схватывания металлических поверхностей.

**Свинец** — металлический элемент IV группы периодической системы элементов. Кристаллизуется в гранцентрированной кубической решетке. Плотность около  $11,34 \text{ г/см}^3$ , температура плавления  $327,4^{\circ}\text{C}$ .

При нагревании на воздухе свинец окисляется до  $\text{PbO}$ . На холоде свинец покрывается пленкой основных карбонатов, предохраняющих металл от дальнейшего действия кислорода. Химическая стойкость свинца позволяет широко использовать его для изготовления частей заводской химической аппаратуры.

Мелкодисперсный свинец вводят в качестве наполнителя фторопласта в выпускаемый в Англии металлофторпластовый материал « $\text{DU}$ ». Это обусловлено высокими антифрикционными свойствами свинца, который широко применяется как основа свинцовых баббитов и как составная часть свинцовых бронз, а также тем, что температура плавления свинца практически совпадает с температурой «плавления» фторопласта-4. Поэтому, при трении снижается опасность перегрева последнего, так как при до-

стижении 327° С появляется жидкая фаза, снижающая коэффициент трения и, следовательно, тепловыделение.

При работе со свинцом необходимо помнить, что многие его соединения очень ядовиты и несоблюдение правил техники безопасности может привести к тяжелым формам отравления.

**Графитовые и углеродные волокна.** Значительный интерес в последнее время проявляется к использованию в качестве наполнителя графитовых и углеродных (карбонизованных) волокон [9, 82]. Получают их пиролизом естественных и синтетических волокон при температурах 700—900° С (углеродные волокна) и 2500—3000° С (графитовые волокна) [9]. В Англии применяют для армирования полимеров получаемые пиролизом полиакрилонитрильных нитей графитовые волокна типа I (пиролиз при 2500° С, средний диаметр 7,7 мкм) и типа II (пиролиз при 1500° С, средний диаметр 8,6 мкм). Графитовые и углеродные волокна обладают высокими прочностью и термостойкостью, химической инертностью, высокой теплопроводностью и имеют малую плотность.

**Материалы пористого каркаса или слоя.** Условно к наполнителям можно отнести и материалы пористого каркаса, заполняемого тем или иным способом фторопластом. Когда частицы металла во фторопласте не соединены между собой, они являются наполнителем, если же они соединены между собой в единое целое и образуют «губку» с сообщающимися порами, то они представляют собой уже пористый каркас или пористый слой на конструкционной основе.

В качестве пористого слоя металлофторопластовых и пористого каркаса пропитанных фторопластом подшипников применяют следующие материалы: оловянные бронзы, фосфористую безоловянную бронзу, нержавеющие стали, железо, углеграфиты и т. п. Наиболее широко для пористых каркасов и слоев на конструкционной основе применяют высокооловянную бронзу Бр.О-10 или Бр.ОФ-10-1. При изготовлении металлофторопластовых материалов пористый слой получается спеканием сферических частиц бронзы; при изготовлении пористых пропитываемых фторопластом подшипников — спеканием порошков олова и меди. В последнем случае благодаря спеканию при наличии жидкой фазы образуется пористый каркас из оловянной бронзы.

### ГЛАВА III

#### Подшипниковые материалы, содержащие фторопласт

Более рациональное использование присущих фторопласту-4 высоких антифрикционных характеристик возможно при выполнении следующих требований: повышении механических свойств и износостойкости, улучшении условий теплоотвода (чем достигается снижение температуры поверхностных слоев), стабилизации величины коэффициента трения. В результате исследований, проводившихся в СССР и за рубежом, были выявлены следующие пути выполнения этих требований: 1) повышение сопротивления деформированию конструктивными мерами; 2) нанесение тонких слоев фторопласта на металлическую основу; 3) получение материала с высокой степенью ориентации (ориентированные волокна и ткани из них); 4) введение во фторопласт различных наполнителей; 5) введение фторопласта в пористый металлический (или из другого материала) каркас; 6) введение фторопласта в тонкий пористый металлический слой, соединенный с прочной основой из конструкционного материала (например, малоуглеродистой стали). В соответствии с этими путями разрабатывались и нашли применение основные типы содержащих фторопласт-4 антифрикционных материалов.

Допускаемую нагрузку на детали из чистого фторопласта-4 можно существенно повысить, если ограничить возможность его «вытекания». Для этого детали из фторопласта помещают в специальные гнезда или углубления таким образом, что фторопласт очень немного выступает над поверхностью ограничивающей металлической детали. В результате фторопласт в процессе работы находится под действием объемного сжатия, близкого равносильному, и благодаря этому может длительное время работать при высоких нормальных нагрузках (несколько сот килограммов на см<sup>2</sup>), но только при малых скоростях скольжения [100].

Применение фторопласта в виде тонких покрытий, наносимых на металлические поверхности, позволяет улучшить теплоотвод и повысить допустимые нагрузки. Однако изнашивание пленки или сдирание ее случайно попавшими между поверхностями трения твердыми частицами приводит к соприкосновению металлических поверхностей, что может вызвать проявление схватывания, образование задиров, заедание. Для снижения опасности

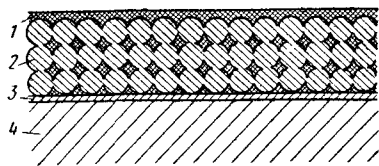


Рис. 17. Разрез металлофторопластового ленточного материала:

1 — фторопласт; 2 — бронза; 3 — медь; 4 — сталь

возникновения этих явлений целесообразно наносить фторопласт на поверхности, которым заранее приданы высокие противозадирные свойства (например, для сталей фосфатированием или сульфидированием).

За рубежом получили некоторое распространение материалы, износостойкость которых повышена благодаря высокой степени ориентации молекул фторопласта. Одной из разновидностей такого класса материалов является комбинированная ткань из волокон двух полимеров — фторопласта-4 (политетрафторэтилена) и какого-либо другого \* [74]. Ткань соткана таким образом, что лицевая поверхность образована главным образом волокнами фторопласта, а обратная — волокнами другого полимера. Это позволяет приклеивать такую ткань к поверхности деталей обычными клеями.

Наполнители, введенные во фторопласт-4, существенно повышают его механические свойства и особенно износостойкость [21, 34, 43, 94]. Сопротивление износу лучших по износостойкости композиций в несколько тысяч раз выше, чем чистого (ненаполненного) фторопласта. Однако теплопроводность, как правило, остается еще сравнительно низкой, а коэффициент термического расширения высоким. Материалы такого типа весьма перспективны для ряда применений. В некоторых странах их выпускают в виде заготовок для подшипников: стержней, труб и полос (из последних сворачивают «плавающие» втулки с косым швом [94]).

Лучшим комплексом свойств обладают материалы, в которых фторопласт-4 введен в сообщающиеся поры каркаса (металлического или неметаллического), придающего материалу высокие механические свойства, высокую теплопроводность, и как следствие этого и высокую износостойкость. Дальнейшим развитием таких материалов явилось нанесение слоя пористого (пропитываемого фторопластом) металлического антифрикционного материала на конструкционную основу, что позволило повысить нагрузочную способность материала, его износостойкость, а также уменьшить расход дефицитных цветных металлов и фторопласта.

Наиболее прогрессивны и наиболее пригодны для массового производства ленточные материалы, представляющие собой конструкционную основу из стальной ленты (или полосы), на которую нанесен тем или иным способом тонкий пористый металлический слой антифрикционного сплава (напеканием сферических частиц

или сетки, напылением), сообщающиеся поры которого заполнены фторопластом, образующим также на поверхности прирабочный тонкий слой (рис. 17). Из таких ленточных материалов штампуют свертные втулки, упорные кольца, сферические опоры и другие детали. Рабочая поверхность антифрикционного слоя не допускает механической обработки резанием, что является причиной повышенных требований к допускам на толщину производимой ленты и к точности операций штамповки.

В ряде случаев целесообразно комплексное применение идей, заложенных в различных типах материалов. Так, например, для пропитки пористого каркаса или тонкого пористого слоя на конструкционной основе применяют фторопласт с наполнителями, что существенно улучшает свойства материалов.

## 1. Чистый фторопласт

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) является относительно «молодым» полимером. Испытания показали его уникальные антифрикционные свойства по сравнению с уже известными в то время и широко применявшимися полимерами и пластмассами. В связи с этим в данном параграфе приводятся результаты испытаний не только фторопласта-4, но и некоторых других полимерных материалов.

Сравнительные испытания четырех полимеров (политетрафторэтилена, полиэтилена, полистирола, полиметилметакрилата) были проведены в 1949 г. К. В. Шутером и П. В. Томасом [73] на приборе Ф. П. Боудена и Л. Лебена. Изучали трение при весьма малой скорости скольжения ( $V = 0,01$  см/с) между полусферическим ползуном и плоской поверхностью. Были рассмотрены три варианта: трение полимера по полимеру; трение ползуна из полимера по стали; трение ползуна из стали по полимеру. В диапазоне применявшихся нагрузок (от 1 до 4 кгс) соблюдался закон Амонтона. Основные результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ

Полимер	Значения коэффициента при трении		
	полимера по полимеру	полимера по стали	стали по полимеру
Политетрафторэтилен . . . . .	0,04	0,04	0,1
Полиэтилен . . . . .	0,1	0,15	0,2
Полистирол . . . . .	0,5 *	0,3	0,35
Полиметилметакрилат . . . . .	0,8 *	0,5 *	0,45 *

\* Прерывистое скольжение (скачки при трении).

\* Patents of USA № 3.037.893, № 3.068.053, № 3.429.627

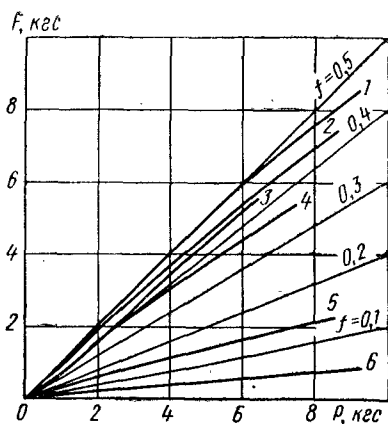


Рис. 18. Зависимость силы трения  $F$  от нагрузки  $P$  при трении без смазки коротких образцов из различных пластмасс по стали:

1 — текстолит; 2 — капрон; 3 — нейлон; 4 — нейлон с графитом; 5 — полиэтилен; 6 — фторопласт-4

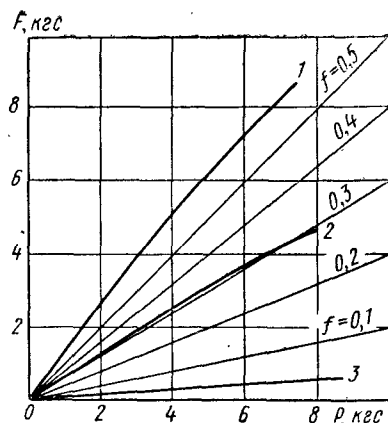


Рис. 19. Зависимость силы трения  $F$  от нагрузки  $P$  при трении без смазки одноименных пластмасс:

1 — капрон; 2 — текстолит; 3 — фторопласт-4

Минимальное трение наблюдалось во всех вариантах испытания для политетрафторэтилена. Смазка его не оказывала влияния на величину коэффициента трения. Полимеры характеризуются такими же значениями коэффициента трения, как и другие твердые тела, за исключением политетрафторэтилена, коэффициент трения которого очень низкий.

А. П. Семенов и В. В. Поздняков [38, 60] провели сравнительные испытания пластмасс на приборе, работающем по схеме перекрещивающихся цилиндров (относительное перемещение длинного образца и двух сжимающих его коротких), при трении по образцам из стали 40X и по образцам из одноименных материалов. Короткие цилиндрические образцы из полимера перемещались с постоянной скоростью (0,03 см/с) вдоль длинного цилиндрического образца. Давление в контакте при данных испытаниях повышалось по линейному закону от нуля до 9 кгс. Длинный образец крепили к кольцевой пружине, являющейся динамометром.

На антифрикционные свойства пластмасс при трении их по стали и в одноименном сочетании очень большое влияние оказывают состояние их поверхностных слоев и вещества, адсорбированные поверхностями. Поэтому для подготовки поверхностей пластмассовых образцов применяли алмазное обтачивание, обеспечивающее удаление поверхностных слоев вместе с адсорбированными пленками. Поверхности стальных образцов шлифовали и полировали. Перед испытанием стальные образцы промывали в чистых органических растворителях и прокаливали в вакуум-

Таблица 5  
КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ ПРИ ДАВЛЕНИИ В КОНТАКТЕ, РАВНОМ 5 кгс (ОПЫТЫ БЕЗ ПОВОРОТА РОЛИКОВ)  $V = 0,03$  см/с

Материал трущихся образцов	Коэффициент трения при		
	сухом трении	смазке водой	смазке маслом
Капрон по капрону . . . . .	0,62	0,3—0,16 *	0,19—0,02 *
Текстолит по текстолиту . . . . .	0,31	0,29—0,12 *	0,18—0,11 *
Фторопласт-4 по фторопласту-4 . . . . .	0,037	—	0,026
Органическое стекло	0,57—0,42 *	—	—
Текстолит	0,51	0,31	0,21—0,18 *
Капрон	0,46	0,30	0,22—0,08 *
Нейлон	0,43	0,21	0,18
Полиэтилен НД	0,137	0,137	0,115
Фторопласт-4	0,049	—	0,027

\* Скачки при трении.

ной печи в течение 2 ч при температуре 400° С (остаточное давление  $2 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.).

Результаты опытов были представлены графически в виде зависимостей общей силы трения  $F$  (на двух пятнах контакта) от нагрузки  $P$ . Каждая прямая, выходящая из начала координат, соответствует постоянному отношению силы трения к нормальному давлению, т. е. постоянному коэффициенту трения. Результаты опытов по трению коротких образцов из пластмасс по стали без смазки приведены на рис. 18 и одноименных образцов — на рис. 19.

Величины коэффициентов трения при давлении в контакте, равном 5 кгс (для трения без смазки, со смазкой водой и веретенным маслом АУ) приведены в табл. 5.

Данные табл. 5 показывают, что скольжение с наименьшим коэффициентом трения обеспечивает фторопласт-4 и до некоторой степени полиэтилен. Опыты по трению одноименных материалов также показывают, что перенос фторопласта-4 на сопряженную деталь может являться положительным фактором, приводящим к снижению коэффициента трения.

Р. М. Матвеевским [33] проведены испытания термопластичных и термореактивных пластмасс также при низкой скорости скольжения (0,04 см/с) и постоянной удельной нагрузке в пределах 60—70 кгс/см<sup>2</sup>. Опыты проводились им не при точечном контакте испытуемых образцов, а при их контакте по площади определенных размеров. Для испытаний была использована модифицированная четырехшариковая машина КТ-2, в которой трение осуществлялось между вращающимся шариком из стали ШХ9 диаметром 12,7 мм и кольцевым образцом-шайбой с отверстием

диаметром 8 мм. Рабочая поверхность кольцевого образца была выполнена в виде сферического пояса на фаске отверстия образца (поясок предварительно выдавливали на прессе стальным шариком).

Перед испытанием все образцы промывали в органических растворителях с последующей просушкой в термостате при температуре 60° С в течение 5 мин. Были испытаны термопластичные полимеры: полиамиды (АК7, П68 и капрон), полиэтилен НД (низкого давления) и фторопласт-4. Опыты проводились при трении без смазки и при смазке неполярным маслом (диффузионное масло Д1) и полярным маслом (то же масло с присадкой 0,1% стеариновой кислоты).

При испытаниях термореактивных пластмасс и полиамидов без смазки получены высокие значения коэффициента трения (до 0,4—0,7) с нерегулярными колебаниями его величины (прерывистый характер движения). Низкие постоянные значения коэффициента трения при плавном движении получены только для полиэтилена НД (за исключением трения одноименных образцов полиэтилена, когда также было получено прерывистое движение и высокий коэффициент трения) и особенно фторопласта-4 ( $f = 0,05$ ).

При трении со смазкой полиэтилена НД и фторопласта-4 как по одноименным материалам, так и по стали наблюдалось плавное скольжение и коэффициенты трения имели очень низкие значения (0,02—0,05).

Таким образом, при низкой скорости скольжения (0,01—0,04 см/с), на разных машинах при различных условиях испытаний по геометрии контакта трущихся поверхностей и величине нагрузки в контакте разными авторами установлено, что наилучшими антифрикционными свойствами при трении как по стали, так и по фторопласту обладает фторопласт-4. При трении без смазки при комнатной температуре для этого материала значения коэффициента трения составляют 0,04—0,05, а при трении со смазкой полярным или неполярным маслом, водой или другими жидкостями 0,02—0,03. Эти значения коэффициента трения свидетельствуют об уникальных антифрикционных свойствах фторопласта-4 в условиях сухого и граничного трения по стали. Весьма важно, что этот материал обладает и высокой теплостойкостью и при повышении температуры до 300° С не теряет высоких антифрикционных свойств.

Низкие значения коэффициента трения фторопласта-4 без смазки были получены при трении с высокими удельными нагрузками и что более важно, с очень малыми скоростями. Однако в практических применениях такие условия трения встречаются редко. Примером является применение фторопласта в опорах мостов, работающих при высоких нагрузках (70,3 кгс/см<sup>2</sup> и выше) и очень низких скоростях скольжения [94] с очень низким трением ( $f = 0,02—0,05$ ). Большинство же подшипников из чистого

фторопласта или материалов на основе фторопласта работают при более высоких значениях коэффициента трения ( $f = 0,1—0,2$ ).

Тем не менее именно низкий коэффициент трения фторопласта привлек к нему внимание ученых и инженеров, как к материалу, потенциально пригодному для применения в качестве подшипников скольжения, работающих без смазки. Однако, как уже было сказано, фторопласт-4 при повышении скорости скольжения начинает быстро изнашиваться, при этом значения коэффициента трения резко возрастают.

Еще в 1955 г. Д. Г. Флом и Н. Т. Порайл [75] в своих работах показали, что после того, как политетрафторэтилен подвергался трению при высоких скоростях, наблюдается заметное увеличение коэффициента трения (в 2—3 раза), что вызвано видимому химическими изменениями в поверхностных слоях в результате нагрева от трения. Это подтверждается и специальными экспериментами по нагреву поверхности политетрафторэтилена в вакууме до температуры 400°, в которых показано, что на поверхности образуются свободные радикалы, повышающие способность полимера к склеиванию.

Подобное модифицирование поверхности наблюдается и при обработке фторопласта-4 жидким аммиаком с растворенным в нем натрием. При этом часть атомов фтора отнимается, и поверхность приобретает способность склеиваться обычными клеями. Коэффициент трения обработанной поверхности становится очень высоким ( $f \approx 0,5$ ) и контактный угол с водой уменьшается со 110° для необработанной поверхности до 52°. Аналогичные результаты получаются и при обработке поверхностей тлеющим разрядом.

Данные о повышении значений коэффициента трения после трения при высоких скоростях [30] приведены в табл. 6.

В ряде исследований трения фторопласта при повышенных скоростях были зарегистрированы значительные коэффициенты трения и износ. Так, значительный износ фторопласта-4 наблюдался в опытах, выполненных Л. Ю. Пружанским на модифицированной машине Амслера [38]. В этих опытах трение без смазки при скорости скольжения 0,37 м/с осуществлялось между

Таблица 6  
КИНЕТИЧЕСКИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ ФТОРОПЛАСТА

Скорость скольжения, см/с	Коэффициент трения		
	исходных поверхностей при 20° С	поверхностей, измененных скольжением при скорости 189 см/с и температуре	
		ниже 16° С	выше 18° С
1,1	0,05—0,07	0,12	0,19
8,0	0,13	—	0,22
189,0	—	0,19	0,32



Таблица 7  
ИЗНОС ФТОРОПЛАСТА ПРИ ТРЕНИИ ПО СТАЛИ  
БЕЗ СМАЗКИ НА МАШИНЕ АМСЛЕРА  
(ПЛОЩАДЬ ОБРАЗЦА 1,7 см<sup>2</sup>,  
ИСХОДНАЯ ТОЛЩИНА 7,5 мм)

Удельная нагрузка, кгс/см <sup>2</sup>	Суммарный износ (г) при времени изнашивания, мин				Уменьшение толщины (мм) при времени изнашивания, мин			
	10	20	30	40	10	20	30	40
4,2	0,0174	0,0322	0,0472	0,0626	0,04	0,08	0,10	0,13
12,5	0,0694	0,1384	0,1904	0,2672	0,18	0,35	0,50	0,68
25,0	0,1346	0,2522	0,3722	—	0,39	0,66	0,93	—
34,1	0,1620	0,3226	—	—	0,51	1,08	—	—

вращающимся роликом из стали ШХ15 и частичным вкладышем из фторопласта-4; нагрузку повышали ступенчато через каждые 40 мин. Износ измеряли взвешиванием и измерением толщины фторопластового образца через каждые 10 мин работы. Результаты этих испытаний приведены в табл. 7. Коэффициент трения при этих условиях превышал 0,2. Продукты изнашивания фторопласта в виде белых хлопьев выносились вращающимся роликом из области трения и накапливались на кромке образца.

Таким образом, при повышении скорости скольжения коэффициент трения возрастает до 0,20—0,30, и фторопласт начинает интенсивно изнашиваться. Причина этого кроется в чрезвычайно низкой теплопроводности фторопласта-4. Тепловыделение в единицу времени увеличивается, что приводит к повышению температуры, неблагоприятному снижению механических свойств поверхностных слоев фторопласта и дальнейшему повышению коэффициента трения и скорости изнашивания. Это препятствует использованию чистого фторопласта-4 для изготовления подшипников скольжения и других деталей, работающих на трение без смазки.

Таблица 8  
ИЗНОС ФТОРОПЛАСТА ЗАКАЛЕННОГО  
И МЕДЛЕННО ОХЛАЖДЕННОГО

Термическая обработка	Степень кристалличности, %	Износ (мм <sup>3</sup> ) при трении по валу	
		стальному диаметром 25,4 мм	из ацетального сополимера диаметром 19 мм
Закаленный с 360° С в холодной воде . . . . .	55	836, 885, 787	134, 116
Медленно охлажденный * . . . . .	70	1260, 1146	344, 377

\* Со скоростью 0,2° С/мин в интервале температуры плавления (327° С).

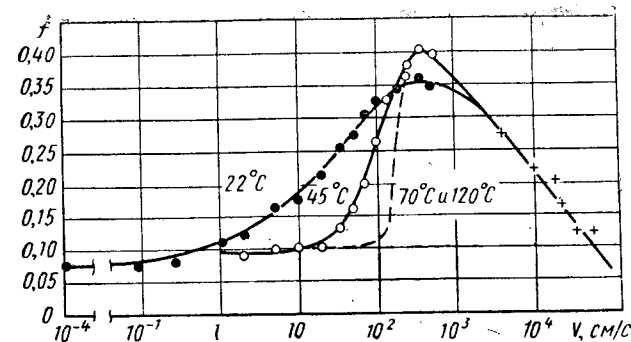


Рис. 20. Трение стали по политетрафторэтилену как функция скорости

Исследование трения политетрафторэтилена по стали при очень высоких скоростях скольжения (трение по шарик, раскрученному электромагнитным полем в вакууме) показало [73, 84], что коэффициент трения при увеличении скорости после достижения некоторого максимального значения начинает снижаться (рис. 20). Так, коэффициент трения от 0,25 при скорости 50 м/с уменьшился до 0,1 при скорости 500 м/с. При трении с большой скоростью политетрафторэтилен быстро изнашивается и вместо гладкой исходной поверхности образуется лунка с грубой шероховатой поверхностью. Частицы износа образуются как в виде мелкого порошка, так и в виде волокнистых частиц или чешуек.

Таким образом, износостойкость чистого фторопласта очень мала и, хотя она может быть несколько улучшена оптимальной термической обработкой, возможные применения его ограничены очень низкими значениями произведения  $pV$ . Данные о влиянии термической обработки и условий испытания на износ образцов фторопласта приведены в табл. 8 [94]. Плоские образцы испытывались в течение 1 ч при трении под нагрузкой 0,91 кгс по валу диаметром 25,4 мм, частота вращения которого равнялась 450 об/мин.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что износостойкость фторопласта при увеличении кристалличности снижается. Однако этот вывод требует дополнительного уточнения при варьировании степени кристалличности в более широких пределах, а также при проведении испытаний в различных условиях трения.

Неожиданным и труднообъяснимым фактом является существенное снижение износа политетрафторэтилена на одном и том же пути трения при очень низких скоростях скольжения. Значения износа чистого политетрафторэтилена при возвратно-поступательном трении по нержавеющей стали после 30 000 циклов (длина хода 12,7 мм, нагрузка 281,2 кгс/см<sup>2</sup>) приведены в табл. 9 [94]. Испытания проводились со скоростями 10 циклов



Таблица 9  
ИЗНОС ЧИСТОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА  
ПРИ ВЫСОКОЙ НАГРУЗКЕ И НИЗКИХ СКОРОСТЯХ  
(ОДИНАКОВЫЙ ПУТЬ ТРЕНИЯ)

Скорость скольжения, мм/мин	Износ после 30 000 циклов, г
33	0,17, 0,20
254	3,19, 3,10

в минуту и 1 цикл в минуту, при которых заметного повышения температур трения происходить не могло. Интенсивность линейного износа при меньшей скорости оказалась примерно в 17 раз ниже. Именно это позволило применить чистый политетрафторэтилен для опор мостов, работающих со скоростями, не превышающими 25,4 мм/ч.

Существенное влияние на трение политетрафторэтилена при низких скоростях скольжения оказывает температура. Снижение температур от 20°С до криогенных приводит к заметному росту коэффициента трения (рис. 21). Повышение же температуры приводит к снижению коэффициента трения (лишь при температурах порядка 320°С коэффициент трения повышается до относительно высоких значений).

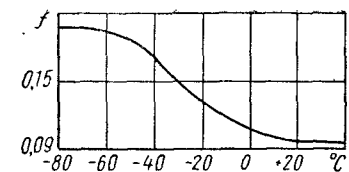
Повышение же температуры за счет теплоты трения при высоких скоростях скольжения сопровождается ростом коэффициента трения. Однако этот рост является, по-видимому, следствием не повышения температуры, а самой скорости скольжения.

При повышении давления коэффициент трения политетрафторэтилена при малых скоростях скольжения снижается. Однако низкие механические свойства политетрафторэтилена и характерное для него явление «псевдотекучести» ограничивают предельно допустимые значения давления. Эти значения могут быть существенно повышены при заключении политетрафторэтилена в обойму, затрудняющую и ограничивающую его деформацию [100].

При исследовании поверхностей трения установлено, что политетрафторэтилен переносится на поверхность контртела и в последующем фактически происходит трение одноименных поверхностей полимера. Этим объясняется то, что значения коэффициентов трения политетрафторэтилена по политетрафторэтилenu и по другим материалам совпадают.

Перенос тонкой пленки политетрафторэтилена при трении скольжения на контртелo наблюдали многие исследователи [38, 83, 85, 100]. К. Р. Мэкинсон и Д. Тейбор, описывая два режима трения политетрафторэтилена, связывают их с характером переноса пленки на сопряженную поверхность. При температуре 20°С и низких скоростях скольжения коэффициент трения

Рис. 21. Зависимость коэффициента трения политетрафторэтилена от температуры



низкий ( $f \leq 0,1$ ), и полимер переносится на контртелo в виде тонкой ориентированной пленки. При высоких скоростях или низких температурах коэффициент трения возрастает ( $f = 0,1$  до  $0,3$ ). Возрастает также количество и размер частиц перенесенного полимера.

В более поздней работе [93] установлено, что при трении с малой скоростью политетрафторэтилена, не имеющего какой-либо остаточной ориентации, по гладкой поверхности (стеклу или полированному металлу) начальное статическое трение высоко ( $f_{ст} \approx 0,2$ ), и перенос происходит в виде относительно крупных частиц и волокон. Это напоминает картину, наблюдавшуюся при трении политетрафторэтилена при высоких скоростях [85], однако в рассматриваемом случае в промежутках между перенесенными на гладкую поверхность крупными частицами имеется тонкая пленка полимера (толщиной менее 100 Å). Как только начинается скольжение, коэффициент трения быстро падает до обычного в подобных условиях значения ( $f_k \approx 0,06$ ). Перенос также быстро уменьшается и на поверхности трения можно обнаружить лишь тонкую пленку политетрафторэтилена.

Если образец из политетрафторэтилена скользит по свежей поверхности повторно, по дорожке, параллельной первой, в прямом или обратном направлении, коэффициент трения покоя никогда не превышает 0,07 и таким образом всего на 10—20% выше последующего низкого значения коэффициента трения движения. Начальное высокое значение коэффициента трения (0,2) не повторяется, и перенос происходит лишь в виде тонкой пленки. Эта картина воспроизводится многократно при условии, что направление скольжения сохраняется параллельным первоначальному.

Однако, если повернуть образец из политетрафторэтилена вокруг своей оси на 90° и осуществить скольжение его параллельно первоначальной дорожке трения, опять наблюдается высокое значение коэффициента трения покоя. Далее все происходит так же, как и при самом первом скольжении образца полимера (коэффициент трения движения быстро падает, перенос полимера уменьшается). Если после каждого прохода поворачивать образец политетрафторэтилена на 90°, то каждый раз наблюдается высокое значение коэффициента трения покоя и значительный перенос полимера на сопряженную поверхность. Такое явление, наблюдаемое в довольно широком интервале скоростей скольжения и температур [93], позволило сделать вывод, что если происходит прочная (сильная) адгезия к сопряженной поверхности, политетрафторэтилен может вести себя как материал с низким

трением (антифрикционный материал) лишь после того, как его поверхностные молекулы получили необходимую ориентацию. При высоком трении политетрафторэтилен ведет себя, как и все другие полимеры, т. е. объемные его свойства определяют поведение при трении.

В политетрафторэтилене зигзагообразная цепочка углеродных атомов скручена в пологую спираль и эта спиральная структура приводит к образованию жесткой стержнеобразной молекулы с очень гладким профилем. Полученные при исследовании трения результаты позволяют предположить, что низкий коэффициент трения и малый перенос в виде тонкой пленки обусловлен очень легким скольжением между выстроившимися в линию цепями политетрафторэтилена вследствие описанных выше свойств молекул.

Если молекулярная структура политетрафторэтилена модифицируется введением каких-либо боковых групп, например,  $\text{CF}_3$  или хлора, замещающих через определенные интервалы атомы фтора (как это имеет место в сополимере тетрафторэтилена с гексафторпропиленом или же в политрифторхлорэтилене), гладкий профиль молекулы нарушается. Коэффициенты трения покоя и движения этих полимеров высокие и приблизительно равны 0,2—0,4. Перенос полимера на сопряженную поверхность происходит по всей дорожке трения в виде толстого с «наростами» слоя. Сопротивление срезу, определяющее величину силы трения, сравнимо с сопротивлением срезу в объеме в широком диапазоне температур. Таким образом, трение и износ этих полимеров определяются их объемными свойствами. Аналогичные свойства присущи и полиэтилену. Для полиэтилена низкой плотности (содержащего большое количество боковых групп) коэффициент трения движения остается таким же высоким, как при трении покоя и крупные частицы полимера переносятся на сопряженную поверхность по всей дорожке трения.

Все это позволило сделать вывод [93], что низкий коэффициент трения и малый перенос политетрафторэтилена и полиэтилена высокой плотности при скольжении обусловлен «гладкой» формой их молекул.

Опытами по трению политетрафторэтилена, ориентированного «вытяжкой» (или удлинением) на 280% [73], показано, что имеется четко выраженное влияние ориентации на величину трения. Трение при скольжении вдоль направления ориентации молекул существенно ниже, чем при скольжении в поперечном направлении.

Значительный теоретический и практический интерес представляют адгезия политетрафторэтилена ко льду и трение этих материалов. Ф. П. Боуден и Д. Тейбор [73] изучали адгезию льда к некоторым органическим материалам: политетрафторэтилену, полистиролу, полиметилметакрилату и стеариновой кислоте (слои большой толщины). Полученные результаты (рис. 22), показывают, что снижение температуры приводит к быстрому

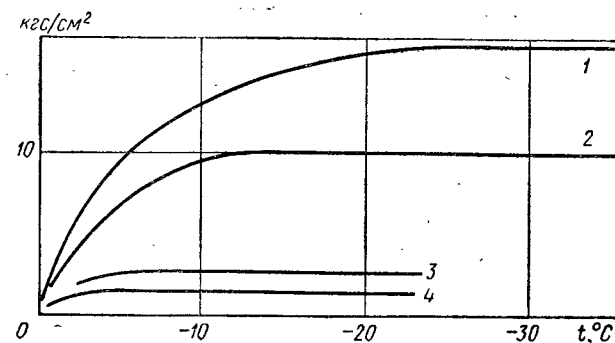


Рис. 22. Удельная адгезия льда к поверхностям различных органических материалов:

1 — полиметилметакрилата; 2 — полистирола; 3 — твердой стеариновой кислоты; 4 — политетрафторэтилена

увеличению адгезии, достигающей установившегося значения при температурах ниже  $-10^\circ\text{C}$ . Минимальная адгезия зарегистрирована для политетрафторэтилена, максимальная — для полиметилметакрилата. Разрушение при этих температурах еще не хрупкое, а пластическое и установившееся значение адгезии соответствует предельной адгезионной прочности системы. Оно не может определяться прочностью на срез самого материала. Как показывают данные табл. 10, величина прочности на срез во много раз выше величины адгезии.

Другим важным наблюдением является то, что срез происходит всегда по границе раздела. Из этого следует, что адгезия в этих случаях определяется главным образом силами взаимодействия между льдом и материалом контртела, а не их прочностью.

При трении полноразмерных лыж, покрытых тонкой пленкой политетрафторэтилена, по снегу и льду установлено, что в первом приближении трение пропорционально нагрузке и не зависит

Таблица 10  
АДГЕЗИЯ ЛЬДА К НЕКОТОРЫМ МАТЕРИАЛАМ [73]

Материал	Контактный угол, град.	Прочность материала на срез, кгс/см²	Адгезия (установившееся значение), кгс/см²
Политетрафторэтилен . . . . .	108	100—300	1,5
Стеариновая кислота . . . . .	100	200	2,5
Полистирол . . . . .	75	400—450	10
Полиметилметакрилат . . . . .	~20	525—560	~20
Нержавеющая сталь при $-30^\circ\text{C}$ . .	0	—	~45

Таблица 11

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ  
ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ ПО СПЕЧЕННОЙ ПОРИСТОЙ МЕДИ  
ДО И ПОСЛЕ ВВЕДЕНИЯ В ПОРЫ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Температура, °С	Коэффициент трения меди	
	без ПТФЭ	пропитанной ПТФЭ
15	0,3	0,05
100	0,3	0,05
200	0,7	0,05
250	0,8	0,05
330	1,2	0,12

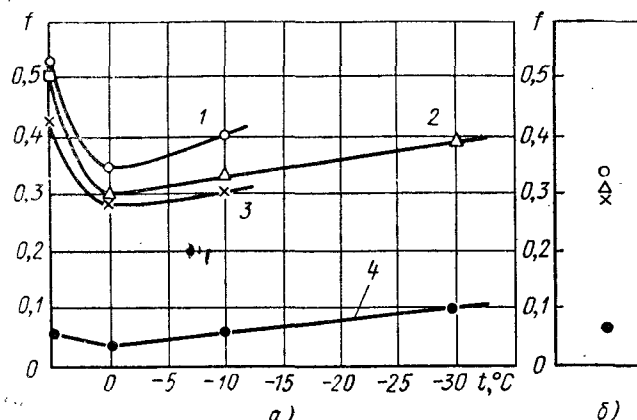


Рис. 23. Зависимость коэффициента трения от температуры для лыжи площадью 75 см<sup>2</sup>, сделанной из различных полимеров, при скольжении с очень низкими скоростями:  
а — по снегу; б — по льду при -4° С; (1 — терилен; 2 — полиметилметакрилат; 3 — нейлон; 4 — политетрафторэтилен)

от площади лыжи. Найдено также, что статическое трение почти равно кинетическому, если скорость скольжения очень низкая (несколько сантиметров в секунду). При температуре около 0° коэффициент трения обычных лыж и лыж, покрытых политетрафторэтиленом, был низким ( $f \approx 0,04$ ). При снижении температуры коэффициент трения обычных лыж при скольжении с очень малой скоростью повышался до высоких значений, характерных для скольжения по сухому песку ( $f \approx 0,4$ ). Лишь для лыж, покрытых политетрафторэтиленом, коэффициент трения и при низких температурах оставался практически на том же самом уровне (0,05 при -25° С).

Было исследовано также трение по снегу лыж уменьшенного размера, изготовленных из различных полимеров: политетрафторэтилена, полиметилметакрилата, нейлона и терилена (полиэфирная смола). Лишь для политетрафторэтилена коэффициент трения оставался малым (0,04—0,08) вплоть до самой низкой температуры опыта (-30° С). Коэффициент трения других полимеров был почти на порядок выше (рис. 23).

Низкий коэффициент трения политетрафторэтилена по снегу и льду в широком диапазоне температур, в том числе и при мокром липком снеге, позволил применить этот материал для лыж самолетов и аэросаней и для ползунков саней [73].

Изложенное позволяет сделать вывод, что политетрафторэтилен (или фторопласт-4) значительно превосходит по своим антифрикционным свойствам известные полимерные материалы и является наиболее перспективным полимером в качестве основы для разработки антифрикционных материалов для подшипников скольжения, работающих без смазки.

Хотя политетрафторэтилен имеет при малой скорости скольжения очень низкий коэффициент трения вплоть до температур 300° С, он имеет следующие недостатки [73]: малую механическую прочность, низкую теплопроводность, высокий коэффициент термического расширения, высокий коэффициент трения (порядка 0,3) при больших скоростях скольжения [75, 38]. Одним из наиболее перспективных путей устранения этих недостатков является введение политетрафторэтилена в пористый металлический каркас. Таким способом можно получить материал, обладающий механическими и термическими свойствами металла, и антифрикционными свойствами политетрафторэтилена. Впервые это было предложено Ф. П. Боуденом в 1950 г. [72]. Результаты испытания первого варианта такого материала, изготовленного на основе пористого медного каркаса, приведены в табл. 11.

Поскольку политетрафторэтилен может при трении такого материала подаваться на поверхность в результате самого процесса трения, повторное скольжение по одному и тому же месту не приводит к повышению коэффициента трения. Материалы, изготовленные по этому принципу, нашли в настоящее время широкое применение за рубежом и в нашей стране.

## 2. Фторопластовые ткани

Политетрафторэтилен, как и многие другие термопластичные смолы, может быть вытянут в волокна, пригодные для изготовления ткани [94]. При этом достигается высокая степень ориентации молекул в полимере, что существенно повышает износостойкость и прочность. Для изготовления подшипников фторопластовые нити (волокна) ткуются совместно с хлопчатобумажными или другими нитями (полимерными, на основе стекловолокна, металлическими) таким образом, что с одной стороны превалируют нити из фторопласта, с противоположной стороны — из другого материала [74, 90]. Эта сторона приклеивается к металлической основе или армированной стекляннм волокном фенолоформальдегидной пластмассе. Если в ткани использована металлическая прово-

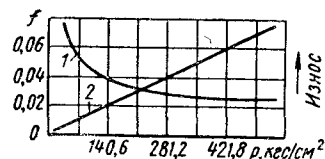


Рис. 24. Зависимости коэффициента трения (1) и износа (2) подшипников, облицованных фторопластовой тканью, от нагрузки

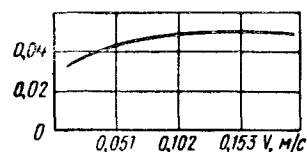


Рис. 25. Зависимость коэффициента трения подшипников, облицованных фторопластовой тканью, от скорости скольжения

лока, то ее к основанию можно припаивать \*. Таким образом получают подшипники с поверхностью трения, почти полностью состоящей из фторопласта.

Подшипники разнообразной формы из тканого фторопласта — втулки простые и с фланцами, сферические самоустанавливающиеся подшипники и т. д. — нашли широкое применение за рубежом, главным образом, в самолето- и ракетостроении. Они наиболее успешно работают без смазки при возвратно-вращательном (или качательном) движении при высоких нагрузках и низких скоростях. В отдельных случаях они работают погруженными в речную или морскую воду. При работе без смазки эти подшипники обладают прекрасными демпфирующими свойствами при ударных и вибрационных нагрузках.

Одна из фирм в США выпускает под названием «Файберглайд» [74] ткань из волокон политетрафторэтилена и полиэфирной смолы. Обычный фторопласт имеет предел текучести при сжатии 70,3 кгс/см<sup>2</sup>. Наполнители повышают прочность, но обычно не намного. При применении же фторопластовой ткани, соединенной с металлической основой термореактивной смолой, статическая нагрузка может быть повышена до значений, превышающих 5600 кгс/см<sup>2</sup>, без проявления тенденции к холодному течению.

Подшипники из фторопластовой ткани выдерживают ударные нагрузки до 5600 кгс/см<sup>2</sup> и успешно работают при нагрузках до 1400 кгс/см<sup>2</sup>. Они не нуждаются в смазке, не подвержены действию высоких и низких температур, коррозии, фреттинг-коррозии и ложному бринеллированию. С повышением нагрузки коэффициент трения снижается (рис. 24) и после 210 кгс/см<sup>2</sup> устанавливается практически на одном уровне ( $f = 0,025$ ). При увеличении скорости скольжения коэффициент трения несколько растет (рис. 25), что для ряда применений является полезным (так как это способствует демпфированию колебаний).

Наиболее целесообразно применять подшипники из тканого фторопласта при нагрузках порядка 210 кгс/см<sup>2</sup>. Коэффициент трения при этой нагрузке уже становится низким, а темп износа невелик. Применение таких подшипников позволяет достичь

значительной экономии места и массы. Так, например, упорный подшипник из тканого фторопласта весит в 15 раз меньше роликового и имеет толщину в 8 раз меньше.

Подшипники из материала «Файберглайд» изготавливают также и в ФРГ для работы без смазки и в химически активных веществах [81]. Подшипники выпускаются шарнирные сферические диаметром от 4 до 50 мм, и цилиндрические от 16 до 75 мм. Максимальная допустимая нагрузка на подшипники в обычном исполнении составляет 2100 кгс/см<sup>2</sup>, в специальном — до 4300 кгс/см<sup>2</sup>. Не рекомендуют применять подшипники из фторопластовой ткани при скоростях более 60 м/мин и температурах выше 180° С.

### 3. Наполненные фторопласты

Свойства наполненных полимеров определяются не только адгезионным взаимодействием полимера и наполнителя, но и изменением структуры и свойств полимера, обусловленным наличием границы раздела фаз и действием поверхностных сил на этой границе [31].

Твердые наполнители разделяют на два основных класса — порошкообразные и волокнистые. Порошкообразные наполнители позволяют создавать пластмассы с прочностью, значительно превышающей прочность самой смолы. С помощью волокнистых наполнителей (на основе стеклянных, асбестовых и, наконец, углеродных волокон) получают усиленные наполненные полимеры, а также конструкционные материалы, свойства которых в значительной мере определяются самим армирующим наполнителем.

Ю. С. Липатов считает [31], что в механизме усиления полимеров при введении в них наполнителей существенную роль играет изменение свойств полимеров в тонких слоях на поверхности наполнителя. Оно определяется взаимодействием полимерных цепей с поверхностью, ограничивающей их подвижность, и надмолекулярными образованиями, возникновение которых также зависит от присутствия наполнителя. Так как наполнитель влияет на процесс формирования структуры наполненного полимера, то, меняя технологические режимы, можно направленно регулировать свойства наполненных пластмасс.

Уже длительное время применяют наполненные материалы на основе фторопласта. В качестве наполнителей используют порошки или волокна самых разнообразных материалов. Практически в качестве наполнителя можно применять любое вещество при условии, что оно выдержит температуру спекания (обычно 360—380° С).

В последние годы ассортимент выпускаемых промышленностью Англии наполненных фторопластовых материалов для подшипников скольжения уменьшился [83, 94]. В настоящее время в качестве основных наполнителей применяют стеклянные и

\* Patents of USA № 3.037.893, № 3.068.053, № 3.429.627

асбестовые волокна, дисульфид молибдена, графит, слюду, никель и бронзу. Графит или дисульфид молибдена и стеклянное волокно, а также графит и бронза являются наиболее распространенными комбинациями наполнителей. Общее содержание наполнителей обычно составляет 15—40% (объемных).

Работа [94] посвящена сравнительным испытаниям большого количества выпускаемых за рубежом материалов при трении без смазки и при смазке водой. Результаты этих испытаний приведены в табл. 12.

Сравнительные данные о износостойкости антифрикционных материалов получены также при испытаниях по схеме «вытирания лунки». Плоский образец прижимали к вращающемуся стальному ролику с постоянной силой, и через определенные промежутки времени (4, 16, 64 и 256 ч) определяли объем изношенного материала (равный объему вытертой лунки). Массовый износ в рассматриваемом случае был бы менее показательным, так как плотность материалов различна. Результаты испытаний приведены в табл. 13.

Наиболее высокие механические свойства имеют композиции фторопласта со стеклом и асбестом, прочность их на разрыв составляет 105,5—246 кгс/см<sup>2</sup>. При низких нагрузках (до 7,03 кгс/см<sup>2</sup>) наполненные стекловолокном композиции имеют высокую износостойкость, но при более высоких нагрузках увеличивается опасность повреждения поверхности контртела стеклянным наполнителем с последующим увеличением темпа износа подшипника. Опасность этого тем выше, чем меньше твердость материала контртела. Добавки графита и дисульфида молибдена улучшают свойства наполненных стекловолокном композиций, но не намного.

Наполненные асбестом композиции на основе фторопласта рекомендуется применять для работы в паре с мягкими металлами, например, такими, как латунь. Эти композиции не приводят к повышению шероховатости контртела, но обладают сравнительно низкой износостойкостью.

Применение слюды в качестве наполнителя позволяет получить материалы с относительно низким температурным коэффициентом линейного расширения (только вдвое превышающим температурный коэффициент расширения алюминия). Износостойкость таких материалов при трении без смазки невысокая, при трении же в воде высокая.

Наполненные стеклом и асбестом фторопластовые материалы выпускают в виде сменных свертных вкладышей. Представляют они собой в исходном виде полоски материала толщиной 0,38—0,76 мм достаточно гибкие для того, чтобы из них можно было вручную свернуть втулку и вставить в корпус подшипника. Перемещение в осевом направлении вкладыша предотвращается буртиками (фланцами) на гнезде подшипника. В тангенциальном направлении вкладыш вращается свободно. Для того чтобы линия разреза не могла попасть целиком в плоскость приложения нагрузки, концы полоски обрезают под углом 45°.

Таблица 12  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПУСКАЕМЫХ ЗАРУБЕЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ  
АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ  
ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ПРИ РАБОТЕ БЕЗ СМАЗКИ [94].  
(ВТУЛКИ С ВНУТРЕННИМ ДИАМЕТРОМ 9,5 и 15,9 мм  
РАБОТАЛИ БЕЗ СМАЗКИ 250 ч ПРИ  $pV = 1,07$  И  $2,14$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с.  
НАПРАВЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ ПОСТОЯННО.  
ДИАМЕТРАЛЬНЫЙ ЗАЗОР В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДИАМЕТРА  
И ТОЛЩИНЫ СТенок ВТУЛКИ СОСТАВЛЯЛ 0,064—0,127 мм)

Состав антифрикционного материала	Страна	Коэф-фициент трения	Скорость изнашивания 10 <sup>5</sup> (мм/ч)			
			$pV = 1,07$		$pV = 2,14$	
			750 об/мин	260 об/мин	750 об/мин	1500 об/мин
Втулка, облицованная тканью ПТФЭ . . . . .	Англия	0,25 0,24	5,08		12,7	
Втулка, облицованная тканью ПТФЭ . . . . .	США	0,32 0,37	33		73,7	
Плавающий вкладыш из ПТФЭ + стекловолокно	Англия	0,28			20,3	
Плавающий вкладыш из ПТФЭ + пигмент + 10% стекловолокна . . . . .	США	0,23			5,08	
ПТФЭ + 15% стекловолокна . . . . .	Англия	0,31				
ПТФЭ + 25% стекловолокна . . . . .	Англия	0,30			10,1	
ПТФЭ + 25% стекловолокна . . . . .	США	0,37			16,2	
ПТФЭ + пигмент + 15% стекловолокна . . . . .	Англия	0,23— 0,40			12,4— 50,8	
ПТФЭ с MoS <sub>2</sub> + 5% стекловолокна . . . . .	США	0,30			50,6	
ПТФЭ + 10% асбеста . . . . .	Англия	(0,15)	38,1			
ПТФЭ с MoS <sub>2</sub> + асбест . . . . .	Англия	0,31				
ПТФЭ + слюда . . . . .		0,40				
ПТФЭ + 25% углерода . . . . .	США	0,37 (0,23)			35,6	30,5
ПТФЭ + 40% графита . . . . .	Англия	0,25 (0,21)			35,6	35,6
ПТФЭ + никель . . . . .	ФРГ	0,65			196,0	
ПТФЭ + бронза . . . . .	ФРГ	0,53			160	
ПТФЭ + 20% бронзы + + 20% графита . . . . .	Англия	(0,21— 0,26) 0,24— 0,26 0,24— 0,26 (0,29— 0,52)	6,35— 7,9	2,54— 4,06	7,9— 19,8	30,5— 43,0
ПТФЭ + 2,5% бронзы + + 37,5Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> . . . . .	Англия	0,14 0,22 0,23		2,03	6,35	3,55

Примечание. Содержание наполнителей указано в объемных процентах.

Таблица 13

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ВЫПУСКАЕМЫХ В АНГЛИИ  
АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ  
ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ПРИ РАБОТЕ БЕЗ СМАЗКИ [94]  
(ПЛОСКИЕ ОБРАЗЦЫ ТРУТСЯ ПОД НАГРУЗКОЙ 7,25 кгс  
О СТАЛЬНОЙ ВАЛ ДИАМЕТРОМ 25,4 мм, ВРАЩАЮЩИЙСЯ  
СО СКОРОСТЬЮ 450 об/мин И 1350 об/мин.  
ТЕМПЕРАТУРА ВАЛА СООТВЕТСТВЕННО 25° И 80° С)

Состав антифрикционного материала	Износ 10 <sup>3</sup> , см <sup>3</sup>						
	при 25° С и 450 об/мин				При 80° С и 1350 об/мин		
	4 ч	16 ч	64 ч	256 ч	4 ч	16 ч	64 ч
ПТФЭ + 10% стекло- волокна + пигмент		2,13			2,3	8,54	
ПТФЭ + 15% стекло- волокна . . . . .		1,31— 1,8			2,8	2,52— (>8,2)	
ПТФЭ + 15% стекло- волокна + пигмент		1,64— 2,13			2,3	5,75— (>8,2)	
ПТФЭ + 15% стекло- волокна + 2,5% MoS <sub>2</sub>		1,08— 1,13			2,62	2,8— 5,75	
ПТФЭ + 20% стекло- волокна + 5% графита . . . . .		1,07; 1,07				3,94— 4,6	
ПТФЭ + 25% стекло- волокна . . . . .		1,64— 2,3			2,96	7,07— (>8,2)	
ПТФЭ + стекловолокно + Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> . . . . .		1,05; 1,64				>8,2	
ПТФЭ + асбест + MoS <sub>2</sub>		>8,2			7,07	>8,2	
ПТФЭ + слюда . . . . .	0,31	1,97— 2,46	>8,2			>8,2	
ПТФЭ + 27% бронзы . .		0,41; 0,62				>8,2	
ПТФЭ + 20% бронзы + + 20% графита («DQ»)	0,13— 0,18	0,21— 0,33	0,41— 0,66	0,94	3,28	6,24	
ПТФЭ + 37,5% Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> + + 2,5% бронзы . . . .	0,08— 0,13	0,115— 0,23	0,16— 2,8		0,41— 0,66	0,58— 0,9	1,15— 1,97

Примечание. Содержание наполнителей указано в объемных процентах.

Подшипники такого типа предпочтительно устанавливать в случаях, когда тепло должно отводиться главным образом через корпус подшипника, а не через вал. В связи с тем, что вкладыш «плавающий», часть работы, затрачиваемой на преодоление трения, реализуется на тыльной поверхности вкладыша (трение между вкладышем и корпусом подшипника).

Для изготовления свертных втулок применяют также листовой фторопласт (толщиной 0,127 мм), в который добавлено небольшое количество дисульфида молибдена. На одну сторону листа нанесен чувствительный к давлению клей. Заготовку нужной формы вырезают и приклеивают к основанию. Износостойкость такого материала невысокая, но он очень удобен для снижения трения без смазки при невысоких нагрузках (менее 3,52 кгс/см<sup>2</sup>) и значениях  $pV$ , не превышающих 0,36 кгс/см<sup>2</sup>·м/с.

Применять графит в качестве наполнителя фторопласта целесообразно для подшипников, работающих в коррозионных и агрессивных средах. Особенно удобен в применении материал, состоящий из слоя толщиной приблизительно 0,8 мм наполненного графитом фторопласта, соединенного с основой из нержавеющей стали.

Промышленностью Англии выпускаются также [83, 94] наполненные графитом фторопластовые материалы (содержание наполнителя от 15 до 40%) в виде стержней и труб или готовых подшипников. Композиции с большим содержанием графита обладают максимальной теплопроводностью из всех наполненных фторопластов. Они успешно работают в столь агрессивной жидкости, как азотная кислота. Наивысшей износостойкостью при трении без смазки обладают композиции с бронзовым наполнителем. Однако износостойкость их высока только при относительно небольших скоростях и температурах на поверхностях трения. Поскольку коэффициент трения в большинстве применений достигает 0,2, а теплопроводность материала низка, то высокие поверхностные температуры возникают уже при относительно низких значениях  $pV$  (0,36 или 0,72 кгс/см<sup>2</sup>·м/с). Это ограничение в значительной мере преодолевается при введении во фторопласт равного количества бронзы и графита (по 20% объемных). Такие материалы выпускаются в Англии фирмой «Гласир» под маркой «DQ». Теплопроводность при этом увеличивается в 3 раза, поверхностная температура снижается и допустимые значения  $pV$  повышаются до 3,57 кгс/см<sup>2</sup>·м/с. Однако неблагоприятное влияние скорости не устраняется, и максимальное значение  $pV$  может быть реализовано при скоростях выше 0,5 м/с только в том случае, если допускается сравнительно высокий темп износа (порядка 0,25 мм за 1000 ч). В воде бронзографито-фторопластовые подшипники работают также хорошо. Материал показал себя работоспособным и в жидком кислороде (—183° С) и применяется в виде вставок в подшипниках насосов, перекачивающих жидкий кислород.

Более эффективной в преодолении ограничений по температуре и скорости скольжения наполненного бронзой фторопласта при работе без смазки является добавка свинца или окиси свинца. Однако при работе в воде антифрикционные характеристики резко снижаются, и такие материалы непригодны для узлов, смазываемых водой.

Исследованию трения и износа полимерных материалов (в том числе и фторопласта), наполненных графитовыми и углеродными волокнами, посвящена работа [82]. Композиционные материалы с графитовыми волокнами мало чувствительны к материалу контртела. Коэффициент трения низок, и на поверхности контртела образуется ориентированная пленка перенесенного графита. При применении в качестве наполнителя углеродных волокон большое значение имеет материал контртела. Если твердость его высока ( $HV > 1000$  кгс/мм<sup>2</sup>) или материал содержит хром, коэффициент трения мал и ориентированная пленка образуется. С контртелами из других материалов (мягкие стали и т. п.) трение высоко, перенесенной ориентированной пленки не образуется, и износ контртела может быть большим.

За рубежом наполненные фторопласты нашли широкое применение в компрессоростроении для изготовления поршневых колец и уплотнений. Наиболее часто в качестве наполнителей применяются: стекловолокно, графит, углеграфит, дисульфид молибдена, бронза [4, 48, 63]. В публикациях отмечается, что материалы одного состава, но изготовленные различными фирмами, имеют отличия по износостойкости. Это свидетельствует о большом влиянии на качество материала технологических факторов. Большое значение в исследованиях уделяется влиянию газовой среды и влажности на износостойкость и трение фторопластовых композиционных материалов.

В работе [70] описаны результаты исследования трения и износа 14 материалов, поставляемых западноевропейскими и американскими промышленными фирмами. Испытания проводили в воздухе с различной влажностью, азоте, гелии, углекислом газе, метане, этане, пропане, кислороде, фторуглеродных хладагентах (P12, P13 и P22). Материал контртела — чугун с перлитной структурой и сталь с 13% Сг. Отмечено, что на износостойкость значительно влияет вид и влажность газа, а также материал контртела. Особенно сильно различается износостойкость испытанных материалов в азоте, гелии и углеводородах. Повышение в этих газах содержания влаги, как правило, снижает износ. При испытании в атмосфере воздуха зависимость темпа износа от влажности имеет минимум. Износ при трении по стали был выше, чем по чугуну. Испытания на компрессорах наиболее износостойких в конкретных газах композиций показали высокую их долговечность.

В другой работе [63] приведены результаты испытаний трех композиций в воздушной среде и в азоте с различной степенью влажности. Отмечается, что состав газовой среды и влажность

заметно влияют на износ фторопластовых композиций, содержащих в качестве наполнителя стекловолокно (25% вес.), бронзовый порошок (60% вес) и углеграфит (32% вес), наиболее широко применяющихся в США для поршневых колец компрессоров, работающих без смазки.

Опыт эксплуатации около 200 комплектов поршневых колец из наполненного фторопласта в компрессорах на предприятиях «Империял Кемикал Индастриз» (Англия) освещен в работе [48]. Испытывались кольца из семи материалов, содержащих: стекловолокно; стекловолокно и графит; дисульфид молибдена; углеграфитовый наполнитель. На основании анализа результатов автор работы пришел к выводу, что следует применять лишь одну композицию с углеграфитовым наполнителем, добиваясь стабильных характеристик поршневых колец. В работе [48] приведены предельные рабочие параметры применяемых в настоящее время поршневых колец из наполненного фторопласта, из анализа которых следует, что поршневые кольца компрессоров, изготовленные из наполненных фторопластов, могут успешно работать без смазки при достаточно тяжелых режимах.

	Со смазкой	Без смазки
Максимальная скорость поршня, м/с	4,12	3,34
Максимальный перепад давлений, кгс/см <sup>2</sup>	104,5	42,1
Температура нагнетания, °С:		
при давлениях $< 10,5$ кгс/см <sup>2</sup>	180	160
при давлениях $> 10,5$ кгс/см <sup>2</sup>	150	130

В работе Р. М. Матвеевского, В. В. Позднякова и А. П. Семенова [34] описано исследование влияния наполнителей (30% объемн.) на износостойкость фторопласта-4. Во фторопласт-4 вводили следующие мелкодисперсные наполнители: графит С-1, нитрид бора, серебро, свинец, Бр. ОФ. 10-1 и Бр. СуС-12 (в виде тонкой стружки, получаемой при точении с глубиной резания и подачей порядка 0,02 мм). Образцы изготовляли из смесей компонентов (получаемых совместной коагуляцией соответствующих суспензий) прессованием и последующим спеканием под давлением. Испытания проводили по схеме «стальная сфера — кольцевой образец» [33] при коэффициенте взаимного перекрытия, равном единице. Скорость скольжения 0,21 м/с, начальная нагрузка в контакте 75 кгс/см<sup>2</sup>, длительность испытаний 20 ч.

Проведенные испытания показали, что при введении наполнителей во фторопласт износостойкость его резко повышается, несмотря на то, что значения коэффициента трения для ряда композиций даже увеличиваются. Темп износа композиций с бронзовой стружкой в несколько тысяч раз ниже, чем темп износа чистого фторопласта-4. Даже при введении во фторопласт свинца (менее всего повлиявшего на износостойкость) темп износа снизился в 130 раз.

Обширные исследования влияния различных наполнителей на износ и трение фторопласта выполнены Н. П. Истоминым [21,



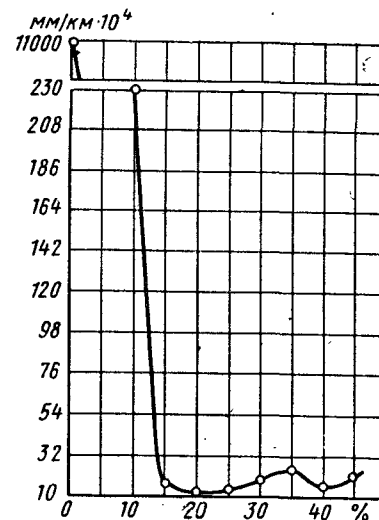
22, 42, 43]. В качестве наполнителей применяли порошки различных материалов разной дисперсности: графита натурального и синтетического, дисульфида молибдена, меди, молибдена, свинца, титана, кобальта, бронз разного состава (в виде мелкой стружки), талка, сернокислого бария, молотого кварцевого песка, ситалла. Композиции изготовляли смешиванием исходных компонентов, прессованием и спеканием при температуре 380° С в свободном состоянии или под давлением (в закрытой пресс-форме). Испытания проводили по схеме трения «стальная сфера — кольцевой образец» и «ролик — плоский образец».

Было установлено, что для большинства испытанных наполнителей оптимальное их содержание в композиции, обеспечивающее при трении без смазки минимальный износ, лежит в пределах 20—30% (объемн.). При этом износостойкость композиций в 1000 раз (и более) превышает износостойкость чистого фторопласта. Установлено, что большую роль играет не только природа, но и дисперсность наполнителя. Так, если частицы такого наполнителя, как графит или дисульфид молибдена, имеют размеры порядка нескольких микрон и меньше, то износостойкость композиций значительно снижается по сравнению с композицией, имеющей размер частиц наполнителя до 75—100 мкм. При еще более крупных частицах наполнителя износостойкость композиций снова уменьшается. Наиболее высокую износостойкость показала композиция с графитом марки СКЛН с размером частиц до 75 мкм; вместе с тем для нее характерны и наиболее высокие значения коэффициента трения (0,22). Вообще же по износостойкости композиции с различными графитами отличаются одна от другой до 10 раз, а по коэффициенту трения более чем в 2 раза.

Интересное наблюдение сделано [22] о влиянии ориентации плоскостей спайности графитового наполнителя (по отношению к направлению скольжения) на износ и трение. При применении в качестве наполнителя явно кристаллического серебристого графита марки КЛТ Тайгинского месторождения с размером частиц до 0,125 мм обнаружено, что из трех возможных ориентаций<sup>1</sup> частиц графита (направление трения перпендикулярно плоскостям спайности, направление трения и ось вращения параллельны плоскостям спайности, направление трения параллельно, а ось вращения перпендикулярна плоскостям спайности) наиболее высокой износостойкостью обладает ориентация, при которой направление действия силы трения перпендикулярно к плоскостям спайности частиц графита. Наибольшей износостойкости соответствует и максимальное значение коэффициента трения ( $f = 0,20$ ). Минимальная износостойкость и меньший коэффициент трения ( $f = 0,16$ ) соответствуют второй возможной ориентации частиц

<sup>1</sup> «Ориентированные» образцы получались из отпрессованного и спеченного образца композиционного материала (частицы графита расположены перпендикулярно направлению прессования) разрезкой по соответствующим направлениям.

Рис. 26. Зависимость линейного износа наполненного фторопласта-4 от содержания коллоидного графита С-1 при сухом трении по стали 45 ( $p = 16 \text{ кгс/см}^2$ ;  $V = 0,64 \text{ м/с}$ )



наполнителя. Промежуточная износостойкость характерна для ориентации третьего типа.

Результаты испытаний образцов со скрытокристаллическим графитом марки СКЛН Ногинского месторождения с размером частиц до 75 мкм показали, что износостойкость и значения коэффициента трения практически одинаковы для всех трех случаев ориентации плоскостей.

В работе [11] описано исследование влияния добавки иодистого свинца (до 10 вес. %) на износостойкость фторопласта-4, содержащего оловянную бронзу (10% олова) и латунь. Автор при объяснении наблюдаемого существенного снижения темпа износа исходит из предположения, что иодистые соединения ( $PbI_2$ ,  $CdI_2$ ,  $BiI_3$ ) могут в рассматриваемом случае одновременно играть роль твердых смазок и химически активных присадок. П. А. Северин и др. [42, 43] изучали влияние на антифрикционные свойства высокомолекулярного фторопласта-4 марки А введения в него различных количеств коллоидного графита С-1 (дисперсностью 400 меш.). Были исследованы композиционные материалы, содержащие 15, 30 и 40% (объемн.) графита, полученные: а) свободным спеканием (ФГ-15, ФГ-30, ФГ-40); б) спеканием под давлением (ФГ-15А, ФГ-30А, ФГ-40А); в) спеканием под давлением с последующей термической обработкой в течение 24 ч при температуре 310—312° С (ФГ-15АО, ФГ-30АО, ФГ-40АО). Длительной термической обработкой достигалась высокая степень кристалличности фторопласта и обеспечивалась дополнительная прививка молекул полимера на частицах наполнителя. Трение и износ материалов изучали на машине МДП-1 Ивановского завода ЗИП (трение о стальной диск пальчиковых образцов).

Работоспособность трущегося сопряжения в значительной мере определяется температурой поверхности полимера и сильно зависит от теплоотдачи, непосредственно связанной с коэффициентом взаимного перекрытия. При испытании на машине МДП-1 коэффициент этот близок к нулю, и значительная часть тепла отводится в окружающую среду. Это затрудняет возможность использования результатов, полученных на машинах трения такого типа, в реальных сопряжениях с коэффициентом взаим-



ного перекрытия равным или близким единице (упорные и радиальные подшипники скольжения).

Теплопроводность испытанных материалов с 15, 30 и 40% графита по сравнению с чистым фторопластом повысилась соответственно в 23, 26 и 29 раз. Резко повысилась износостойкость, что иллюстрируется показанной на рис. 26 [42] зависимостью интенсивности линейного износа от содержания графита при трении испытанных композиций (спекавшихся под давлением) по стали 45 при  $p = 16$  кгс/см<sup>2</sup> и  $V = 0,64$  м/с. Минимальные износы зафиксированы при содержании графита от 15 до 25% (объемн.). В результате термической обработки (материалы АО) повысилась механическая прочность и износостойкость материалов. Так, линейный износ на 1 км пути трения снизился для материала ФГ-15А с 16 до  $7,8 \cdot 10^{-4}$  мм, и для материала ФГ-30А с 19 до  $12 \cdot 10^{-4}$  мм.

Предприятиями треста «Союзэлектрод» разработаны и выпускаются композиционные материалы на основе фторопласта марок 7В-2А, АФГ-80ВС и АФГМ [51]. Первый из них рекомендуется для работы в жидких средах, второй — во влажных газовых средах и воздухе, третий в осушенных газовых средах. Материалы 7В-2А и АФГ-80ВС содержат в качестве наполнителя графит различного гранулометрического состава. Первый из них представляет собой высоконаполненную композицию фторопласта, второй — низконаполненную (содержание графита 20%). Материал 7В-2А получают спеканием под давлением, материал АФГ-80ВС — свободным спеканием с последующей закалкой.

Материал марки АФГМ трехкомпонентный. В его состав входят: фторопласт-4 (50%), графит (35%) и дисульфид молибдена (15%). Он оказался наилучшим при трении в среде осушенного азота. При значениях  $p = 10$  кгс/см<sup>2</sup> и  $V = 0,52$  м/с скорость износа составила  $1 \cdot 10^{-4}$  мм/ч (или  $\sim 0,5 \cdot 10^{-4}$  мм/км). Получают материал АФГМ спеканием под давлением с последующей закалкой, вследствие чего вместе с повышенной прочностью при сжатии он обладает также и высокой эластичностью.

Свойства описанных выше материалов приведены в табл. 14.

Материалы эти обладают достаточно высокой стойкостью к щелочам, а также к серной и азотной кислотам. Материал 7В-2А нашел широкое применение для изготовления подшипников электронасосов. Применение графитопластовых материалов в качестве уплотнительных и направляющих поршневых колец в компрессорах, работающих без смазки цилиндров, дает большой экономический эффект.

Разработанные в НИИХИММАШе материалы ФКН-7 и ФКН-14 на основе фторопласта обладают высокой износостойкостью. Интенсивность линейного износа (трение по стали 30Х13 при  $p = 25$  кгс/см<sup>2</sup>,  $V = 2,5$  м/с и температуре 40°С) составляет для первого из них  $4 \cdot 10^{-10}$ , а для второго  $2 \times 10^{-10}$  [9].

Таблица 14  
ПРОЧНОСТНЫЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ГРАФИТОПЛАСТОВЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
РАЗНЫХ МАРОК [51] (В ЧИСЛИТЕЛЕ ПРИВЕДЕННЫ  
ДАННЫЕ ПО ТУ, В ЗНАМЕНАТЕЛЕ — ФАКТИЧЕСКИЕ)

Свойства	Материал		
	7В-2А	АФГМ	АФГ-80ВС
Плотность, г/см <sup>3</sup> . . . . .	1,9—2,0 1,9—2,0	$\geq 2,1$ 2,1—2,3	$\geq 2,0$ 2,05—2,15
Водопоглощение, % . . . . .	$\leq 0,1$ 0—0,1	$\leq 0,02$ 0—0,02	$\leq 0,05$ 0—0,05
Предел прочности, кгс/см <sup>2</sup> :			
при сжатии . . . . .	$\geq 350$ 350—380	$\geq 80$ 150—260	$\geq 100$ 110—190
при изгибе * . . . . .	200—300	100—150	—
Твердость, кгс/мм <sup>2</sup> . . . . .	8—14 8,5—12,9	$\geq 6$ 6,7—14,3	$\geq 6$ 6,0—9,5
Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·град) . . . . .	$\geq 7$ 7—15	— 1,0—1,5	— 0,5—1,0
Коэффициент термического расшире- ния, $10^{-5}$ 1/град . . . . .	$\leq 2,5$ 1,5—2,5	— 4,0—7,0	— 8,0—13,0
Модуль упругости при сжатии *, $10^5$ кгс/см <sup>2</sup> . . . . .	0,09—0,12	0,07—0,10	0,06—0,09
Допустимая рабочая температура *, °С . . . . .	250	180	200
Гибкость * . . . . .	Плохая	Хорошая	Очень хорошая

\* Приведены только фактические данные.

Кроме упомянутых выше композиционных материалов на основе фторопласта-4 следует сказать о разработанных и выпускаемых нашей промышленностью материалах: Ф4К20 (20% кокса), АМИП-15М (15% ситалла, 3—5% MoS<sub>2</sub>), ФН-202 (10% Ni, 3% MoS<sub>2</sub>). Последние два материала разработаны НИИПМ (г. Москва).

Наполненные фторопласты находят все более широкое применение в качестве уплотнительных материалов. Из них изготавливают поршневые, уплотнительные, опорные и сальниковые кольца для компрессоров среднего и высокого давлений, работающих без смазки цилиндров. В СССР изготавливают уплотнительные кольца из наполненных фторопластов марок ФН-202, Ф4К20, АФГМ, ФКН-7, ФКН-14 и др. Зарубежные фирмы также выпускают

большое количество марок наполненных фторопластов и уплотнительных колец из них [9, 28, 48, 70].

Сравнительные испытания большого количества наполненных фторопластов проведены И. Х. Карагусовым и Г. Н. Борзенко [23] на машине трения МДП-1 при  $p = 30$  кгс/см<sup>2</sup> и  $V = 1$  м/с (трение по диску из стали 45, обработанному до  $\sqrt{8}$ ). Испытывали опытные композиции, содержащие различные количества меди, никеля, титана, бронзы, дисульфида молибдена, нитрида бора, графита, а также материалы ФГ-30АО, АМИП-15М, ФКН-14 и НАМИ-ФБМ. Наилучшей износостойкостью обладал последний материал, в состав которого кроме фторопласта-4 входит бронза и дисульфид молибдена. Темп линейного износа его составлял при условиях испытания  $1,9 \cdot 10^{-4}$  мм/км, что более чем в 4000 раз ниже износа фторопласта. Близкие значения износостойкости получены для материалов ФГ-30АО и ФКН-14.

Испытания материала НАМИ-ФБМ на компрессорах среднего и высокого давлений позволили рекомендовать его для поршневых уплотнений малогабаритных компрессоров и холодильных газовых машин и детандеров высокого давления, работающих без смазки [23]. В настоящее время материал нашел применение в машинах микрокриогенной техники.

В большинстве случаев целесообразно вводить во фторопласт-4 сразу несколько наполнителей, выполняющих различные функции. Нахождение оптимального состава таких композиций чисто опытным путем требует проведения большого объема экспериментальных исследований. В последнее время опубликованы результаты исследований [26, 27], в которых изложена методика выбора оптимальных составов с применением математической теории экстремальных экспериментов, позволяющая выбрать наилучшее направление исследования при неполном знании процесса. Эффективность применения этой методики тем выше, чем сложнее изучаемая система.

Эту методику применяли для нахождения оптимального состава композиций, содержащих: 1) графит и дисульфид молибдена и 2) стекловолокно, графит и дисульфид молибдена [26]. В первом случае выбранная схема исследования представляла собой полный анализ для двух факторов, варьируемых на трех уровнях. Согласно выбранной схеме было изготовлено девять композиций с различным содержанием графита (от 11 до 25%) и дисульфида молибдена (от 4 до 8%). На основании испытания этих композиций, по ранее описанной в работе [43] методике (трение трех стержневых образцов по контртелу из стали 30Х13 при  $p = 25$  кгс/см<sup>2</sup> и  $V = 2,5$  м/с), и последующего регрессионного анализа установлена количественная зависимость интенсивности износа композиции от содержания наполнителей. Исследование полученного уравнения поверхности отклика, т. е. зависимости интенсивности износа от процентного содержания наполнителей, позволило найти состав композиции (ФКН-7), имеющей минималь-

ную интенсивность износа (или максимальную износостойкость). Эта композиция должна содержать 19% графита и 8% дисульфида молибдена. Расчетная и экспериментально определенная интенсивности износа практически совпадают.

При многочисленных исследованиях антифрикционных свойств наполненных фторопластов испытывали образцы, полученные по технологическим процессам, отличающимся по применяемому оборудованию, режимам смешения компонентов, прессования порошков и спекания. Кроме того, существенно отличались также и применявшиеся «одинаковые» наполнители (по происхождению, форме и размеру частиц, содержанию примесей, методам размельчения). В результате влияния этих факторов свойства одинаковых по составу композиционных материалов могли отличаться очень сильно (особенно износостойкость). Это, а также различные методики испытаний (отличающиеся схемой испытания, характером относительного перемещения, коэффициентом взаимного перекрытия, режимами испытания и т. д.), затрудняет сравнение данных различных исследований. Поэтому трудно из громадного количества описанных в литературе композиционных материалов на основе фторопласта (наполненных фторопластов) выбрать наилучшие по износостойкости и антифрикционным свойствам.

По-видимому, большинство стоящих перед машиностроителями задач может быть решено при применении сравнительно небольшого количества композиционных материалов для типовых условий применения. Эта тенденция наблюдается как в нашей стране, так и за рубежом. Наиболее широко применяют сейчас в качестве наполнителей композиционных материалов на основе фторопласта графит, дисульфид молибдена, стекловолокно, ситаллы и некоторые металлы (оловянные бронзы, никель, серебро).

#### 4. Пропитанные фторопластом пористые материалы

Металлофторопластовый материал «Полислип» [92], выпускавшийся английской промышленностью, представляет собой полученную методом порошковой металлургии пористую высокооловянную бронзу (содержащую приблизительно 10% олова) с частицами «дендритной» или сферической формы, поры которой на некоторую (или всю) глубину заполнены фторопластом. Стальной основы «Полислип» не имеет. Применяется этот материал для подшипников и других трущихся деталей сложной формы, которые либо не могут быть изготовлены штамповкой из металлофторопластовой ленты, либо должны работать длительное время без замены с допустимыми износами, намного превышающими таковые для подшипников из ленты.

Выпускались подшипники с пропиткой фторопластом на всю толщину (под индексом А) и с пропиткой лишь поверхностного слоя (под индексом В) [92]. Каждая из этих разновидностей подшипников может быть трех типов: сплошь пористые подшипники

из «дендритных» порошков; подшипники со слоем такой же пористой бронзы на прочной непористой или малопористой основе (получаемой также методом порошковой металлургии), подшипники из сферического порошка. Наиболее высокими эксплуатационными свойствами обладают подшипники последнего типа.

В более поздней публикации [92] сообщается о модификации материала «Полислип 1М», отличающейся тем, что поры его пропитываются смесью фторопласта со свинцом. Максимальные допустимые давления составляют  $280 \text{ кгс/см}^2$ . Для длительности работы 1000 ч допускаемые значения  $pV$  составляют  $3 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$  (что в 1,5—2 раза выше, чем для описанных выше модификаций материала).

В последнее время рекламные публикации о материале «Полислип» не встречаются. Это дает основание полагать, что он вытеснен более технологичными и дешевыми подшипниками из ленточного металлофторопластового материала.

В ЛенНИИХИММаше для работы в 60%-ной азотной кислоте применяли подшипники из пористого титана, пропитанные фторопластом [6]. Пористые заготовки изготавливали из титановых порошков ИМП-1 и ПХМЗ. Двустороннее прессование заготовок производили на гидравлическом прессе при давлении 1000—1500  $\text{кгс/см}^2$ . Пористость заготовок после спекания при температурах 950—1000°С в вакууме ( $5\text{—}8 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.) в течение 2 ч составила 40—50%. Поры заполняли фторопластом с помощью многократной вакуумной пропитки суспензией фторопласта-4Д с последующим спеканием. Рекомендуемый материал контртела — сталь 12Х18Н9Т или сталь Х18 после термодиффузионного хромирования.

Исследования, проведенные в НИИХИММаше (Москва), показали, что для работающих в растворах азотной кислоты (3 и 60%-ная) подшипников скольжения можно применять пропитанную фторопластом металлокерамику на основе нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Сопряженную деталь следует изготавливать из стали 12Х18Н9Т или пропитанного графита марки ПР-50. Для работы без смазки и в 1%-ном растворе едкого натра предложены пропитанные фторопластом-4 металлокерамические материалы на основе нержавеющей стали и бронзы. Сопряженную пару рекомендуется изготавливать из азотированной стали 09Х15Н8Ю.

Предложены материалы из фосфористой безоловянной бронзы, пропитанной фторопластом [49]. В некоторых случаях применяются пропитанные фторопластом графитовые материалы.

## 5. Ленточные материалы со стальной конструкционной основой

**Металлофторопластовая лента.** В государственном научно-исследовательском Институте машиноведения были проведены работы по созданию и разработке основ технологии производства металлофторопластового материала [55, 58, 59]. Впоследствии к этой

работе подключились ВНИИЛТЕКМАШ, НИИТАВТОПРОМ и Климовский машиностроительный завод, совместными усилиями которых при консультации Института машиноведения было создано опытное производство ленточного материала и налажен выпуск из него свертных втулок разного диаметра [37]. Выпускаемый в СССР материал представляет собой конструкционную основу из малоуглеродистой стали, на которую нанесен через тонкий слой меди пористый слой сферических частиц оловянной бронзы (диаметром около 0,1 мм) общей толщиной 0,3—0,4 мм. Общий объем сообщающихся пор должен составлять 30—40%. Поры на всю глубину заполнены фторопластом-4ДВ с наполнителем (дисульфидом молибдена). Из этой же смеси сформирован тонкий поверхностный слой, закрывающий выступающие вершины наружных сферических частиц бронзы.

Был налажен также и выпуск индивидуальных неразрезных подшипников скольжения из такого же материала (по несколько отличающейся технологии): втулок с наружным и внутренним рабочим слоем, упорных колец с антифрикционным рабочим слоем, сферических опор [46, 47]. Свойства таких подшипников не отличаются от изготовленных методами штамповки из ленточного материала. Производство их несколько сложнее и дороже, но оно в ряде случаев целесообразно, так как позволяет получать втулки и шарнирные сферические подшипники с более высокой степенью точности и без разреза, что повышает их конструкционную прочность. Кроме того, применяемая технология позволяет получить антифрикционный слой на выпуклых поверхностях, например, на наружной поверхности втулок, что недостижимо при изготовлении подшипников штамповкой из металлофторопластовой ленты.

Для производства ленточного металлофторопластового материала требуется сравнительно небольшой расход дефицитных дорогостоящих материалов. Так для изготовления 1 м<sup>2</sup> материала, состоящего из стальной ленты (толщиной 1,5 мм) с напеченным на нее слоем пористой оловянной бронзы (толщиной 0,4 мм, пористостью 35%), пропитанным смесью фторопласта с 25% (объемн.) дисульфида молибдена, необходимо затратить: ленты из стали Ст 08—Ст 10 около 12 кг, фторопласта (сухого вещества) ~0,25 кг; дисульфида молибдена ~0,17 кг, оловянной бронзы ~2,1 кг. Из 1 м<sup>2</sup> такого материала можно изготовить около 500 свертных втулок диаметром 25 и длиной 25 мм (или более 1200 втулок длиной 15 и диаметром 15 мм).

Проведенные испытания материала указанного выше состава на машине КТ-2 [33] при постепенно повышающейся температуре показали, что материал работоспособен почти до 300°С. В жидком азоте материал также успешно работает. Таким образом, рабочий интервал температур работоспособности материала без смазки охватывает, по крайней мере, диапазон от —200 до +280°С. Дополнительные испытания показали, что материал успешно

работает в высоком вакууме, инертных газовых средах и жидкостях, не обладающих смазочным действием.

Ленточный материал применяется в самых разнообразных отраслях машиностроения — в основном в узлах, работающих без смазки, хотя введение смазки оказывает, как правило, благоприятное действие на работу подшипников. Этот материал следует применять в тех случаях, когда масла, пластичные и другие смазки нежелательны, непрактичны или ненадежны, когда температуры слишком высоки или слишком низки для обычных смазок, а также в механизмах с периодическим возвратно-поступательным движением (механизмы, осуществляющие контроль, управление и т. п.). Обычные подшипники со смазкой в этом случае непригодны, так как гидродинамический смазочный слой не успевает образоваться. Подшипники качения в таких условиях также работают плохо ввиду возникновения на элементах их рабочих поверхностей особого вида износа (так называемого ложного бринеллирования). Применение металлофторопластовых материалов обеспечивает низкий пусковой момент в высокоскоростных подшипниках с воздушной смазкой, а также в тяжелонагруженных подшипниках с обычными смазками. Большое применение могут найти такие материалы в мостостроении и строительстве, в устройствах, компенсирующих температурные и другие деформации (связанные с эксплуатацией).

Служебные качества металлофторопластовых материалов можно кратко описать следующими основными характеристиками:

- 1) антифрикционные и противоизносные свойства при работе без смазки сравнимы с аналогичными свойствами смазанных баббитов (граничная смазка);

- 2) в широком интервале температур (от  $-200^{\circ}$  до  $+280^{\circ}$  C) сохраняют высокие антифрикционные и противоизносные свойства;

- 3) работают без смазки;

- 4) сохраняют работоспособность при попадании умеренного количества загрязнений в зазор между трущимися поверхностями;

- 5) детали, изготовленные из этих материалов, имеют малые объем и массу;

- 6) устойчивы против коррозии промышленными жидкостями и газами и стойки к действию растворителей;

- 7) отсутствует опасность возникновения зарядов статического электричества;

- 8) наличие жидкости, как правило, улучшает антифрикционные свойства материалов;

- 9) не возникают скачки при трении;

- 10) обладают высокой механической прочностью.

Еще более широкое применение материалы подобного типа получили за рубежом [38, 88]. Сначала английской фирмой «Гласир» специализировавшейся на производстве самых разнообразных подшипников скольжения, был разработан материал «DP».

Этот материал представляет собой стальную основу из ленты малоуглеродистой стали, на которую методом порошковой металлургии нанесен тонкий пористый слой высокооловянной бронзы, пустоты которого заполнены политетрафторэтиленом. Впоследствии материал «DP» был практически полностью вытеснен материалом «DU»\*, являющимся дальнейшим развитием первоначального варианта материала. «DU» — это биметаллическая лента с основой из стали, на которую нанесен пористый слой высокооловянной бронзы (объем пор  $\sim 35\%$ ), образованный спеканием сферических частиц бронзы на меденной стальной ленте. Пустоты пористого слоя заполнены смесью фторопласта со свинцом (20% по объему). На поверхности имеется тонкий слой такого же состава.

Выбор размеров подшипников и других деталей фирмой «Гласир» рекомендуется производить по допустимым значениям произведения удельной нагрузки  $p$  в кгс/см<sup>2</sup> на скорость  $V$  в м/с ( $pV$ ). В результате длительного опыта работы по созданию, испытанию и применению этого материала были составлены таблицы, позволяющие конструктору без труда выбрать необходимые размеры подшипников и других деталей, работающих на трение в различных условиях. За отправную точку было принято обеспечение надежной непрерывной работы деталей в течение 1000 и 10 000 ч.

В эту же категорию материалов входят заполненная фторопластом бронзовая сетка и два металлических пористых пропитанных фторопластом материала на основе серебра и свинцовой бронзы [94]. Первый из этих материалов представляет собой бронзовую сетку (60 меш) с нанесенным на одной стороне слоем смеси фторопласта с наполнителем, таким, например, как  $\text{MoS}_2$ , окись свинца, волокна стекла или асбеста. Материал обладает высокой износостойкостью, и при  $pV = 7,14$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с, долговечность может достигать 1000 ч при условии, что допускается износ до 0,2 мм. Результаты испытания подпятников при том же значении  $pV$  показали [94], что после приработки, составившей 0,025—0,05 мм, установившаяся скорость изнашивания равна  $2,8 \times 10^{-4}$  мм/ч. Таким материалом облицовываются (при помощи пайки или клея) втулки, упорные кольца и направляющие. Пропитанная фторопластом сетка объединяет в себе прочность и теплопроводность металлической основы с высокими антифрикционными свойствами фторопласта (содержание последнего в поверхностном слое очень высокое).

В материалах на основе серебра и свинцовой бронзы фторопласта меньше (15—40% по объему), поэтому они имеют хорошие механические свойства и теплопроводность, но меньшую износостойкость. Тем не менее эти материалы нашли применение в электромеханике, а также для работы при высоких температурах

\* Patent of England № 756950.

и в высоком вакууме. Имеются сведения, что сепараторы шарикоподшипников, изготовленные из серебра, пропитанного фторопластом с добавкой небольшого количества диселенида вольфрама, успешно работали в вакууме  $10^{-7}$  мм рт. ст.

**Спрелафлон**, разработанный в ГДР [28, 86], представляет собой ленту из малоуглеродистой стали, на которую нанесен довольно толстый слой (от 0,2 до 0,6 мм) композиционного материала на основе фторопласта-4.

В состав антифрикционного слоя входит около 40% (вес) фторопласта, 50% порошкообразного свинца и 10% связующего (смолы на основе фенола). Таким образом, этот материал имеет признаки 2 и 4-го типа материалов по приведенной в начале главы III классификации, а также в некоторой степени и 6-го (ленточного материала). Процесс изготовления материала механизирован. В заготовительном отделении компоненты размалываются, просеиваются, смешиваются в необходимой пропорции. Антифрикционный слой наносится в другом отделении на специальной механизированной линии.

Из ленты штампуют свертные втулки (диаметром от 6 до 100 мм) и упорные кольца. Плотность композиционного антифрикционного слоя составляет  $2,8 \text{ г/см}^3$ . Прочностные свойства материала и термическое расширение определяются главным образом стальной основой. Теплопроводность обоих слоев материала перпендикулярно антифрикционному слою при  $100^\circ \text{C}$  составляет  $0,56 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град)}$ .

Химическую стойкость ленточного материала в различных химически активных средах оценивали по потере массы за время 250-часовой выдержки при температуре  $20^\circ \text{C}$ . Из большого количества испытанных сред (растворов кислот и щелочей, растворов, моющих средств и т. д.) относительно активно взаимодействуют с антифрикционным слоем лишь азотная, уксусная, лимонная и плавиковая кислоты, а также раствор едкого натра. Остальные испытанные среды привели лишь к незначительным изменениям рабочего слоя.

Подшипники из «Спрелафлона» применяются чаще всего с контртелом из стали. Каких либо особых требований к твердости не предъявляется. Высота шероховатости не должна превышать 3 мкм, что достигается шлифованием. Иногда допускается тонкое точение или протягивание. При большей шероховатости интенсивность изнашивания повышается и продолжительность нормальной работы деталей из «Спрелафлона» значительно уменьшается. При применении изделий из «Спрелафлона» во влажных и химически активных средах сопряженные детали целесообразно изготовлять из нержавеющей стали.

Подшипники из материала «Спрелафлон» рекомендуют применять: для узлов трения, в которых вследствие очень медленного или качательного перемещения не может образовываться гидродинамическая смазочная пленка; для узлов, работающих без

смазки или с нерегулярно вводимой смазкой; для узлов, которые должны работать при высоких и низких температурах; для работы в агрессивных газовых и жидких средах и в воде. При очень низких скоростях скольжения могут допускаться нагрузки до  $500 \text{ кгс/см}^2$ . В публикациях, посвященных применению материала «Спрелафлон», приводятся допустимые значения  $pV = 10\text{—}15 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ . При более высокой скорости и соответственно меньшей нагрузке срок службы меньше. Приведенные значения  $pV$ , по-видимому, относятся к сравнительно небольшой длительности работы или большим износам. Возможность работы таких подшипников без смазки в течение 1000 ч при столь высоких значениях  $pV$  вызывает сомнение.

Значения коэффициента трения без смазки: для радиальных подшипников в пределах  $0,08\text{—}0,13$  и для упорных колец  $0,12\text{—}0,21$ .

**Ленточный материал для работы при одноразовом внесении смазки.** В последние годы фирма «Гласир» широко рекламирует ленточный материал «DX» для работы с одноразовым введением смазки [94, 95]. Этот материал имеет такую же конструкцию как и металлофторопластовые ленточные материалы, и выпускается, по-видимому, на таком же оборудовании. Отличается он лишь тем, что фторопласт заменен на полиацетальную смолу (сополимер) с наполнителем в виде 0,5% диоксида свинца, и поверхностный слой пластмассы над частицами бронзы имеет существенно большую толщину (несколько десятых миллиметра), что позволяет обрабатывать рабочие поверхности уже в собранном виде. По существу пористый слой бронзы в этом материале является средством более прочного и надежного прикрепления слоя полимера к стальной основе.

Подшипники из материала «DX» требуют для удовлетворительной работы лишь наличия следов смазки. Нанесение на поверхность материала углублений, являющихся резервуарами смазки, позволяет обеспечивать подшипник смазкой на весь период работы внесением ее лишь при сборке.

Полиацетальные (или полиформальдегидные) смолы применяются двух видов [94]. Первая из них (гомополимер) является

продуктом совместной полимеризации формальдегида  $\text{H}-\text{C} \begin{array}{l} \text{O} \\ \text{H} \end{array}$

и уксусной кислоты  $\text{CH}_3-\text{C} \begin{array}{l} \text{O} \\ \text{OH} \end{array}$ . В материале «DX» приме-

няется другая смола (сополимер), являющаяся продуктом совместной полимеризации триоксана (циклического тримера формальдегида)  $(\text{CH}_2\text{O})_3$  и окиси этилена  $\text{CH}_2 \triangle \text{CH}_2$ . Этот поли-

мер относительно стабилен против термической деструкции,

деполимеризация происходит легко лишь с концов полимера, но прекращается на содержащем два атома углерода остатке окиси этилена. Свойства обоих полимеров отличаются незначительно. Механические свойства гомополимера при комнатной температуре выше, при повышенной температуре механические свойства и химическая стабильность сополимера выше. Оба полимера устойчивы по отношению к действию растворителей и слабых оснований (щелочей) и нестойки в кислотах и сильных щелочах.

Подшипники из материала «DX», по рекламным данным, могут выдерживать высокие давления, зависящие от характера нагружения и условий смазки (предельные нагрузки от 200 до 1400 кгс/см<sup>2</sup>). Диапазон рабочих температур от —40° С до 110° С (при кратковременном действии до 130° С).

Подшипники при работе до 100° С смазываются обычными маслами или консистентными смазками, при более высокой — силиконовыми. Смазка водой допускается лишь при условии образования гидродинамического клина и значениях  $pV$  до 0,36 кгс/см<sup>2</sup> · м/с.

Повторно смазка вводится при значениях  $pV < 3,6$  кгс/см<sup>2</sup> · м/с через 2—5 тыс. часов работы. Для  $pV$  порядка 14 кгс/см<sup>2</sup> · м/с смазка должна вводиться через 500—1000 ч. Для более высоких значений  $pV$  (вплоть до 360 кгс/см<sup>2</sup> · м/с) требуется периодическая смазка в таком количестве, чтобы не менее одной капли масла в минуту приходилось на 1 см<sup>2</sup> проекции подшипника [95].

Материал «DX» выпускается в виде ленты толщиной от 1,21 до 3,05 мм и шириной 101,6 мм. Стандартные свертные втулки выпускаются диаметром от 10 до 100 мм (длина разная), упорные кольца — с наружным диаметром от 24 до 78 мм. Выпускаются также полусферические опоры диаметром от 16 до 38 мм.

Фирма «Гласир» выпускает также материал «DX» (B), с бронзовой основой вместо стальной.

Есть основание полагать, что материалы такого типа найдут широкое применение в ряде отраслей промышленности, где допускается ограниченное применение смазки.

## ГЛАВА IV

### Технология изготовления подшипниковых материалов и подшипников из них

Технологические процессы производства описанных выше подшипниковых материалов имеют общие черты, обусловленные необходимостью спекания мелкодисперсных частиц фторопласта в единое целое. Однако этим, пожалуй, сходство и ограничивается. Значительную роль в процессах изготовления материалов и подшипников из них с пористым металлическим каркасом и стальным основанием играют процессы порошковой металлургии и обработки металлов давлением.

Методы введения фторопласта в пористую основу описаны в отдельном параграфе, так как некоторые из них в равной мере пригодны как для изготовления индивидуальных деталей, так и ленточного материала.

#### 1. Фторопласт с наполнителями

При изготовлении композиционных материалов на основе политетрафторэтилена в качестве исходного материала могут применяться суспензии фторопласта (4Д, 4ДП, 4ДВ) или порошки. В соответствии с этим возможны два основных технологических процесса изготовления наполненных фторопластов [96]: 1) коагуляция суспензии фторопласта совместно с наполнителем; 2) смешивание и размалывание порошков фторопласта и наполнителя на механических мешалках и мельницах. При использовании второго процесса наилучшие результаты получаются, если смешивание производится при низких температурах (охлаждение жидким азотом). Это обусловлено тем, что имеющие волокнистую структуру порошки фторопласта-4 при обычной температуре легко комкуются, что препятствует равномерному распределению наполнителя. Полученные смеси высушиваются, прессуются и спекаются в свободном состоянии или под давлением (в пресс-формах).

Первый технологический процесс обеспечивает более качественное смешение компонентов. От равномерности же распределения наполнителя существенно зависят прочностные свойства композиционного материала и в еще большей степени износостойкость.

Испытывавшиеся различными исследователями композиции были получены по этим двум основным технологическим процес-



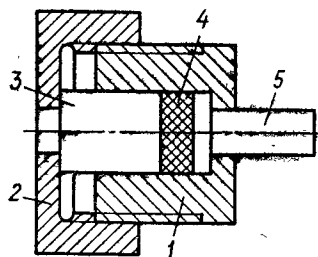


Рис. 27. Схема пресс-формы для получения заготовок композиционных материалов фторопласт-4 с наполнителем методом спекания под давлением

сам с теми или иными отличиями (по применяемому оборудованию; по режимам смешения компонентов, прессования порошков и спекания).

В одном из исследований [34] композиционные материалы получали из водной суспензии фторопласта-4Д и суспензии наполнителя в ацетоне. При сливании этих суспензий и непрерывном помешивании происходила их совместная коагуляция, в результате которой образовывалась пастообразная смесь (жидкость, отделяющаяся при коагуляции, сливали). Для очистки пасты от остатка стабилизатора, вводимого в суспензию фторопласта при изготовлении (для предотвращения коагуляции при хранении), ее промывали водой. Оставшуюся воду удаляли из пасты центрифугированием с последующим просушиванием в термостате при температуре 90° С. Далее полученный порошок прессовали и спекали под давлением в пресс-формах.

Схема пресс-формы изображена на рис. 27 [59]. В пресс-форму кроме заготовки 4 помещается вставка 3 из материала, имеющего больший коэффициент термического расширения, чем сталь, из которой изготовлены основные детали пресс-формы (матрица 1, накидная гайка 2, выталкиватель 5). После прессования заданное давление фиксируется завинчиванием накидной гайки. При нагреве пресс-формы до температуры спекания (~380°С) заготовка подвергается дополнительному высокому давлению, величина которых определяется коэффициентами термического расширения металла вставки и заготовки (фторопласт-4 имеет очень высокий коэффициент термического расширения) и величиной усадки при спекании.

Н. П. Истомин при изготовлении материалов, наполненных фторопластом, применял следующий технологический процесс [21]. Являющийся основой композиции порошок фторопласта-4 (марка Б) измельчали при температуре жидкого азота (этим предотвращали его комкование) и просеивали через сито 60 меш. Затем порошок механически смешивался с соответствующим наполнителем в барабанном цилиндрическом смесителе (типа «пьяная бочка»). Для повышения однородности после предварительного смешивания смесь порошков просеивали через сито 60 меш, после чего смешивали окончательно. Навески смешанных и просушенных порошков загружали в описанные выше пресс-формы [59], в которых порошок прессовался и спекался под давлением при температуре 380° С (спекать можно и в свободном состоянии).

С. Н. Ганз и В. Д. Пархоменко [7] считают, что из-за волокнистой структуры фторопласта-4 и склонности к комкованию нельзя

получить его однородную смесь с наполнителями в лопастных, барабанных, вибрационных и других подобных смесителях. На примере композиций фторопласта-4 с 20%-ным коллоидным графитом С-1 они показали, что износостойкость весьма сильно зависит от метода смешения (до 150 раз). Минимальный износ был зафиксирован для смесителя типа коллоидной мельницы.

Хорошие результаты по их мнению дает совместный помол фторопласта-4 с наполнителями при очень низких температурах (при охлаждении жидким азотом). Для получения еще более равномерной смеси можно смешивать суспензии фторопласта (4Д, 4ДП или 4ДВ) с суспензией тонкоизмельченного наполнителя с последующей их совместной коагуляцией. Суспензию наполнителя предварительно готовят в дистиллированной воде с добавлением поверхностно-активного вещества неионогенного типа (например, ОП-7) интенсивным перемешиванием лопастной мешалкой. Затем в полученную суспензию наполнителя вливают необходимое количество 60%-ной (по весу) суспензии фторопласта и подвергают их совместной коагуляции ацетоном. Полученный осадок фильтруют, промывают дистиллированной водой, сушат и размалывают. Из порошка изготовляют детали прессованием с последующим спеканием. Однако из-за дороговизны и сложности оба этих способа практически не используются.

В своих исследованиях С. Н. Ганз и В. Д. Пархоменко применяли разработанный ими способ размола композиций в спирте (масса твердого вещества относится к массе спирта как 1 : 3) на коллоидной мельнице конусного типа [7]. Измельчение и смешение компонентов происходит в результате трения между конусами мельницы, имеющими зазор 0,1—0,08 мм. Этот метод получил распространение в отечественной практике [9]. В зависимости от типа коллоидной мельницы берутся определенные соотношения спирта, фторопласта и наполнителя.

Аналогичный метод смешения компонентов композиционного материала применял Б. Д. Воронков [6]. После смешения и размола твердую фазу отфильтровывали и высушивали в тонком слое при температуре 100—120° С. Затем ее размалывали в порошок, из которого прессовали изделия под давлением 300—350 кгс/см<sup>2</sup> и спекали без пресс-формы при температуре 360—380° С.

В НИИХИММАШе разработан и внедрен в производство метод получения наполненных фторопластов, содержащих наряду с порошкообразными наполнителями (графитом и дисульфидом молибдена) рубленое стекловолокно. В настоящее время выпускаются материалы ФКН-7 и ФКН-14 [9, 43]. Первый из этих материалов стекловолокна не содержит.

В качестве исходных материалов при изготовлении содержащего стекловолокно материала ФКН-14 применяли фторопласт-4 марки Б, графитовый порошок, дисульфид молибдена и стеклянную нить НС 150/2. Стеклянная нить рубится на специально изготовленной для этой цели установке на отрезки длиной

1—2 мм и обжигается при температуре 400° С в течение 20—30 мин для удаления органических загрязнений (замасливателя). Затем фторопласт, стекловолокно и другие наполнители (графит, дисульфид молибдена, предварительно просеянные через сито с размером ячеек 160 мкм) поступали из бункера в смеситель, куда из емкости подавался этиловый спирт в соотношении 1 : 25 (по массе). Полученная исходная смесь поступала в коллоидную мельницу ударно-кавитационного типа, в которой подвергалась десятикратному размолу. После размолы смесь фильтровали, влажную композицию полностью протирали через сита с размером ячеек 3×3 мм и высушивали на перфорированных противнях при температуре 120—150° С.

П. А. Северин [42, 43] считает, что необходимым условием повышения прочностных и антифрикционных свойств фторопласта-4 при введении наполнителей является наличие реакционно-способных радикалов в полимере и наполнителе, и полная коалесценция композиции в процессе ее спекания. Радикалы в полимере получают в результате его механодеструкции, осуществляемой при температурах ниже температуры стеклования полимера. В процессе спекания происходит прививка молекул фторопласта к наполнителю.

А. А. Кутьков и др. [29] предлагают для повышения плотности прививок и облегчения их образования использовать дендритовидные высокодисперсные наполнители и применять динамическое горячее прессование (ДГП).

## 2. Методы пропитки фторопластом (чистым и с наполнителями) пористых материалов

Первый из описанных в литературе методов [71] сводится к тому, что листовой фторопласт или фторопласт в виде порошка, нанесенный на поверхность пропитываемой пористой заготовки, вдавливаются или впрессовываются в поры длительным (до 20 мин) приложением значительных давлений при температуре 350—400° С. Недостатками такого способа введения фторопласта являются требуемые высокие давления, большая длительность их приложения, необходимость охлаждать заготовки под давлением, а следовательно, и все приспособление, так как при снятии давления при повышенных температурах фторопласт стремится восстановить первоначальную форму и размеры (ему свойственна «пластическая память») и покидает поры.

Впоследствии метод впрессовывания был усовершенствован, что значительно повысило его эффективность [42, 52, 53]. Усовершенствование основывается на учете реальной структуры фторопласта-4. При изготовлении изделий и заготовок фторопласта-4 прессованием порошок обжигается приблизительно в 5 раз. При этом частицы, имеющие волокнистую структуру, ориентируются параллельно деформирующим плоскостям пуансонов. Это опреде-

ляет анизотропию свойств фторопласта-4 вдоль и поперек направления прессования. Впрессовывание в поры значительно облегчается, если волокна и молекулы ориентированы перпендикулярно поверхности пленки (параллельно направлению действия впрессовывающей силы). В этом случае для истечения фторопласта в поры требуется преодоление в основном лишь значительно более слабых межмолекулярных сил.

Ориентированную пленку такого типа предложено получать строганием цилиндрических заготовок фторопласта-4 специальным резцом на токарном станке (подобно строганию деревянного шпона при изготовлении фанеры). Поскольку для цилиндрических заготовок характерна ориентация волокон и молекул в радиальном направлении, в строганой пленке волокна и молекулы ориентированы перпендикулярно поверхности. Такой способ позволяет получить пленки как из чистого, так и из содержащего наполнители (например, графит) фторопласта. В случае применения анизотропных наполнителей (чешуйчатых или волокнистых), частицы их будут ориентироваться также перпендикулярно поверхности пленки. Экспериментами на специальной установке показано, что скорость истечения такого («структурированного») фторопласта может быть во много раз выше, чем фторопласта с обычной ориентацией молекул и волокон (вдоль поверхности). Было также показано, что под действием ультразвука процесс заполнения пор фторопластом ускоряется. Однако даже и эти усовершенствования не позволяют использовать метод горячего впрессовывания фторопласта-4 в пористый слой для массового непрерывного производства ленточного металлофторопластового материала.

В литературе [71] описан также способ пропитки пористых заготовок водной суспензией фторопласта в вакууме. Пористые заготовки вакуумируются (вакуум в зависимости от введенного стабилизатора порядка 10—30 мм рт. ст., при большем вакууме суспензия вскипает, чем вызывается ее частичная коагуляция) и в вакууме же помещаются в суспензию фторопласта (вакуумировать заготовки, заранее погруженные в суспензию, нельзя из-за возможности коагуляции суспензии под воздействием выходящих из пор пузырьков воздуха). Затем вакуумная камера сообщается с атмосферой, и воздух вгоняет суспензию в поры.

Суспензия для вакуумной пропитки должна быть тщательно отфильтрована от слипшихся частиц фторопласта. Для фильтрации применяют капроновую ткань, не дающую ворсинок. После заполнения пор заготовки суспензией фторопласта производится сушка при температуре, меньшей 100° С, так как при вскипании воды частицы фторопласта будут выталкиваться из пор. Выпускаемая промышленностью суспензия содержит ~40% по объему фторопласта, поэтому после первой операции пропитки будет заполнено лишь около 40% объема пор, после второй ~40% объема оставшихся пор и т. д. Чтобы получить более или менее полное заполнение пор заготовки частицами фторопласта, эту операцию



повторяют 8—10 раз. При последних операциях пропитки необходимо принять меры для образования на поверхности детали тонкого поверхностного слоя фторопласта, необходимого для приработки. При толщине, большей 0,05 мм, поверхностный слой фторопласта при сушке растрескивается (явление, весьма характерное для суспензий фторопласта) и при дальнейшем спекании трещины не закрываются.

Для обеспечения возможности заполнения фторопластом мелких пор и сокращения числа операций пропитки в Лаборатории износостойкости Государственного научно-исследовательского Института машиноведения разработан метод заполнения пор приложением избыточного давления \*, основанный на фильтрующем действии пористого материала. При этом поры могут заполняться за меньшее количество операций, так как через поры прогоняется количество суспензии, намного превышающее начальный объем пор, тогда как даже при первой операции вакуумной пропитки в самом благоприятном случае в поры попадает количество суспензии, несколько меньшее их объема. Кроме того, при пропитке под большим избыточным давлением можно использовать частично коагулировавшую суспензию, так как действующее давление (могущее составлять десятки атмосфер) достаточно для разрушения непрочных скоплений частиц, разделенных сольватными оболочками.

Втулки с внутренней поверхности можно пропитывать в приспособлении, изображенном на рис. 28. Пористая втулка 3 зажимается с помощью шпилек 4 между нижней 1 и верхней 5 плитами. Уплотнение по торцам создается резиновыми прокладками 2. К верхней плите крепится с помощью накидной гайки 6 цилиндр с плунжером 7. Вытеканию суспензии через щели препятствует уплотнение 8. В собранное таким образом приспособление заливается суспензия и к плунжеру прикладывается давление. Под действием возникающего в суспензии гидростатического давления (в некоторых случаях до 100 кгс/см<sup>2</sup>) она просачивается через поры. В порах начинают задерживаться крупные частицы фторопласта и коагулировавшие сгустки мелких частиц. Большое избыточное давление проталкивает внутрь образовавшуюся в поверхностных участках пор густую кашу фторопласта (типа пасты), заполняя поры на большую глубину. Таким образом, при этом методе заполнения пор, коагуляция частиц фторопласта (недопустимая при вакуумной пропитке) не мешает пропитке, так как избыточное давление, во много раз превышающее атмосферное, без труда вгоняет конгломераты частиц в поры. И более того, пропитку методом избыточного давления лучше вести из суспензии сильно обедненной жидкостью.

\* Семенов А. П., Поздняков В. В. Способ пропитки пористых материалов, например, металлокерамических, полимерным материалом. Авт. свид. № 158824. Бюллетень изобретений, 1963, № 22.

При необходимости пропитывать не внутреннюю, а другие поверхности втулки изготавливают приспособления, основанные на том же принципе.

Описанный метод является более производительным, чем метод пропитки в вакууме, и позволяет более качественно пропитывать пористые заготовки на всю глубину пор при уменьшении необходимого числа пропиток с 8—10 до 1—2. С помощью этого метода можно пропитывать заготовки с порами малого сечения и неправильной формы, а также можно пропитывать графитовые антифрикционные материалы.

Помимо описанных методов введения фторопласта в поры предложен центробежный способ пропитки внутренних поверхностей цилиндрических заготовок \*. При этом способе пористая цилиндрическая заготовка с помещенной во внутреннюю ее полость суспензией фторопласта приводится во вращение вокруг своей оси. Частицы фторопласта, имеющего более высокую плотность, отбрасываются центробежной силой на периферию и, следовательно, в первую очередь заполняются участки пористого слоя, наиболее удаленные от оси вращения. Применение этого способа ставит повышенные требования к точности изготовления и установки пористых заготовок, усложняя равномерное заполнение пор фторопластом и получение поверхностного слоя постоянной толщины.

Этот способ применим лишь для цилиндрических изделий с постоянным по длине диаметром внутренней поверхности и ее точным расположением относительно оси вращения. Кроме того, качественная пропитка может быть достигнута лишь при очень больших скоростях вращения детали (или же при пропитке втулок большого диаметра). Так как заполнение фторопластом начинается с пор, наиболее удаленных от оси вращения, то при пропитке втулок с внутренней рабочей поверхностью (находящейся ближе всего к оси вращения) рабочий слой образуется в самую последнюю очередь. В силу этого наиболее ответственный для последующей работы подшипника слой получается наименее уплотненным, а, следовательно, и наименее качественным.

Нами предлагается усовершенствование известного метода центробежной пропитки. Оно заключается (рис. 29) в том, что пористая деталь 1 помещается в конец трубчатого приспособления 2, закрепленного другим концом на валу 3, перпендикулярно оси его вращения. При подаче суспензии 4 фторопласта в трубу и приведении вала во вращение имеющие более высокую плотность частицы фторопласта будут стремиться занять положение, наиболее удаленное от оси вращения. При этом поры заготовок и расстояния между заготовкой и стенкой приспособления заполняются частицами фторопласта с оттеснением воды ближе к оси вращения.

\* Способ пропитки пористых масс наполнителем. Авт. свид. № 144015. Бюллетень изобретений, 1962, № 1. Авт.: Н. Л. Летков, А. К. Дьячков, А. А. Коко-рев, А. А. Гроховский.

Предлагаемая схема для ряда применений имеет следующие преимущества: а) длина трубы может быть большой, вследствие чего эффективная пропитка достигается и при использовании сравнительно тихоходных установок с малым числом оборотов; б) можно пропитывать пористые заготовки с рабочей поверхностью произвольной формы, в частности, цилиндрические втулки малого диаметра, устанавливая их торцами к валу (внешние поверхности ограничиваются стенками гнезда); в) можно пропитывать наружный пористый слой сплошных цилиндрических втулок и других деталей. Благодаря значительному удалению от центра вращения заполнение пор получается равномерным по плотности и хорошим по качеству.

Производительность метода центробежной пропитки может быть очень высокой при использовании многогнездового (например, дискового) горизонтального приспособления. При хорошо сбалансированных вращающихся деталях приспособления, одинаковой массе пропитываемых деталей и дозированной подаче суспензии работа такого приспособления должна быть вполне стабильной и безопасной.

После операции пропитки необходимы обычные операции сушки для удаления остатков жидкости, спекания для соединения частиц фторопласта в единое целое и, наконец, калибрования для обеспечения точности геометрических размеров готовой детали.

Применение методов пропитки, основанных на сепарации суспензии под действием центробежных сил, целесообразно лишь для «чистых» суспензий (не содержащих других компонентов кроме фторопласта). Сложные суспензии, содержащие кроме фторопласта дисперсную фазу другого твердого вещества с отличающимся удельным весом или плотностью, будут при центробежной пропитке расслаиваться.

При производстве сравнительно небольших серий деталей разнообразной формы из индивидуальных заготовок для заполнения пустот пористого металлического слоя на сплошном основании в некоторых случаях целесообразно применение метода последовательного впresseвывания предварительно нанесенного на поверхность слоя пасты фторопласта (с наполнителем или без него), осуществляемого пуансонами из упругого материала \* (например, подходящего сорта резины). Форма пуансона должна обеспечивать последовательное возрастание давления и, следовательно, впresseвывание пасты от середины поверхности заполняемого пористого слоя к краям или от одного края к другому. Вследствие последовательного заполнения сообщающихся пор воздух из пустот пористого слоя полностью удаляется.

К последовательным способам впresseвывания пасты фторопласта в пористый слой на сплошном основании относится разрабо-

\* Семенов А. П., Поздняков В. В. Способ заполнения пористого металлического слоя. Авт. свид. № 160298. Бюллетень изобретений, 1964, № 3.

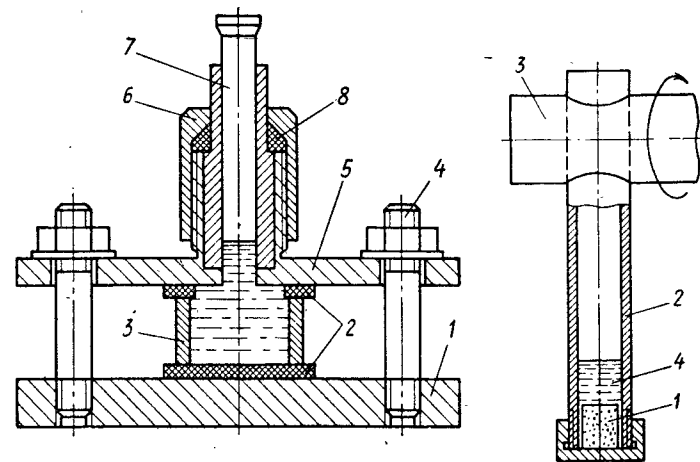


Рис. 28. Приспособление для пропитки фторопластом втулок с внутренней рабочей поверхностью

Рис. 29. Приспособление для центробежной пропитки фторопластом пористых деталей любой формы

танный А. С. Кизиляевым, Р. Б. Большаковым, П. А. Коваленко при участии авторов способ протягивания, или дорнования. Заключается он в последовательном впresseвывании предварительно нанесенного на пористый слой дозированной пасты действием ступенчатого (чаще всего двухступенчатого) перемещающегося на заданном расстоянии от поверхности инструмента. При пропитке пористого слоя на внутренней поверхности цилиндрической втулки, инструмент имеет вид своеобразной калибрующей (деформированием) протяжки или дорна. Аналогичным образом устроен инструмент — фильера — и для пропитки пористого слоя на наружной поверхности цилиндрических втулок.

Все описанные выше методы заполнения пор фторопластом непригодны или в лучшем случае мало пригодны для заполнения фторопластом пор ленточного биметаллического материала (стальная основа с пористым слоем бронзы) на поточной непрерывно действующей линии. Принцип впresseвывания в поры обедненной жидкостью суспензии (пасты) с минимальным количеством жидкости наиболее приемлем. Улавливание воздуха в порах устраняется при использовании схемы вкатывания пасты в поры, изображенной на рис. 30. Паста, предварительно нанесенная на поверхность пористого слоя, последовательно впresseвывается вдоль ленты при прохождении ее между валками, и воздух из пор при этом полностью удаляется через сообщающиеся поры.

Для вкатывания с целью предотвращения выдавливания пасты в стороны и проскальзывания целесообразно применять валки с шероховатой поверхностью. При гладкой поверхности валков

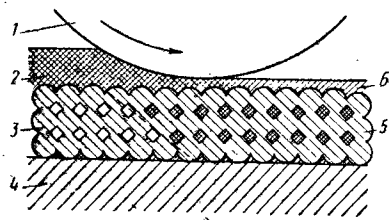


Рис. 30. Схема заполнения пор пастой фторопласта методом «вкатывания»:

а — одним валком; б — по схеме прокатки (1 — валки; 2 — паста; 3 — пористый слой; 4 — стальная основа; 5 — пористый слой, пропитанный пастой; 6 — поверхностный слой пасты)

лента в результате малого коэффициента трения между валками и пастой может проскальзывать. При этом поверхностный слой пасты сдвигается относительно пористого слоя и при последующем спекании может отслаиваться. Нами применялись валки с опескоструенной поверхностью.

Метод непрерывного вкатывания валками пасты фторопласта в пористый слой биметаллической ленточной заготовки наиболее удобен при производстве ленточного антифрикционного металлофторопластового материала.

Возможен способ введения фторопласта в поры ленточной заготовки, позволяющий избежать применения вкатывания и необходимого для его осуществления прокатного стана или устройства, его имитирующего. Конструкция устройства для пропитки схематично изображена на рис. 31\*.

Рабочим элементом устройства является качающийся пуансон 5, один конец которого с помощью оси 4 соединен с подвижной траверсой 3 обычного механического (например, эксцентрикового или кривошипного) или гидравлического пресса. Рабочая поверхность пуансона представляет собой часть цилиндрической поверхности большого радиуса. Ось 4, вокруг которой пуансон может поворачиваться, расположена со стороны входа под пуансон ленты 1. С осью на другом конце пуансона связан шток 6 пневмо- или гидроцилиндра с предварительно заданным давлением (можно применять предварительно поджатую цилиндрическую или другого типа пружину). Гидроцилиндр 7 также соединен посредством поворотной оси с траверсой 3. На столе пресса устанавливают направляющее устройство с ограничительными планками (на схеме не изображены), между которыми протягивается пропитываемая лента.

Лента 1, представляющая собой стальную основу с пористым слоем антифрикционного материала, с нанесенным на нее дозированным слоем пасты фторопласта 2 (с наполнителем или без него),

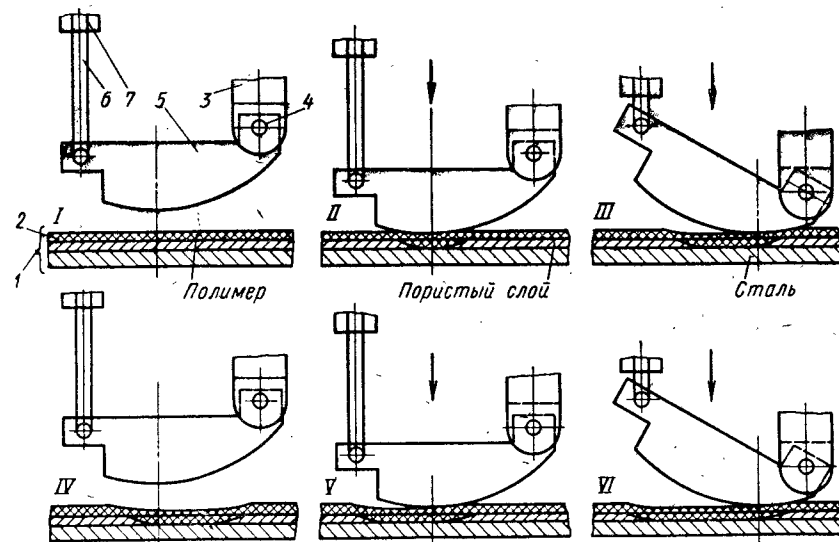


Рис. 31. Схема устройства для заполнения пор пастой фторопласта с помощью качающегося пуансона

подается в направляющее устройство (позиция I). При рабочем ходе траверсы 3 вниз передний конец пуансона 5 входит в соприкосновение со слоем пасты и вдавливая ее в пористый слой до упора краев пуансона в плоские ограничительные планки направляющего устройства (позиция II). При дальнейшем движении траверсы 3 вниз усилие предварительного противодействия, создаваемого пневмо- или гидроцилиндром 7 (или предварительно поджатой пружиной), преодолевается, и шток 6 начинает двигаться вверх. Пуансон при этом поворачивается относительно оси 4, перекачиваясь краями по направляющим нижнего ручья штампа. При этом происходит последовательное впresseвывание предварительно нанесенной пасты 2 в пористый слой ленты 1 в направлении от конца пуансона 5, в первую очередь вступившего в контакт с пастой, к оси 4 поворота, расположенной в правой части пуансона. Воздух из пор при этом беспрепятственно удаляется благодаря последовательности процесса впresseвывания пасты. В крайнем нижнем положении траверсы 3 и пуансона 5 процесс впresseвывания прекращается (позиция III). При последующем ходе траверсы 3 вверх пуансон 5 может: 1) удерживаться по отношению к ползуну в положении, соответствующем моменту окончания впresseвывания пасты (при этом пуансон выходит из контакта с лентой в самом начале хода ползуна вверх), и освобождаться лишь в крайнем верхнем положении, занимая исходное положение для второго рабочего хода (позиция IV); 2) или же повторять процедуру впresseвывания (повторного уплотнения

\* Семенов А. П. Устройство для пропитки пористых материалов. Авт. свид. № 327967. Бюллетень изобретений, 1972, № 6.

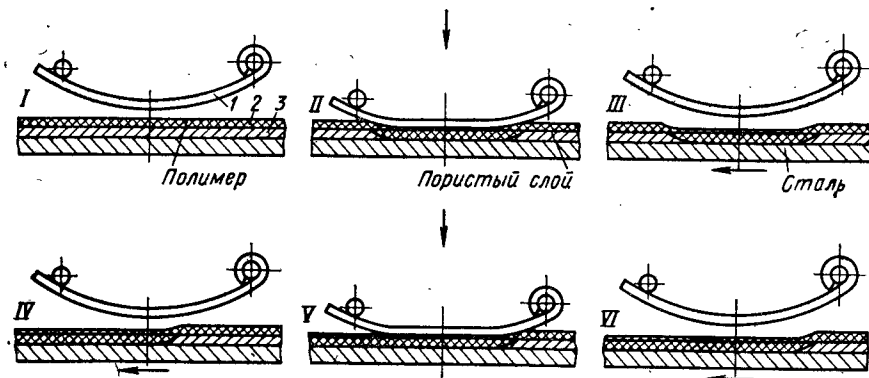


Рис. 32. Схема устройства для заполнения пор пастой фторопласта с помощью упругого пуансона

пасты), перекачиваясь в обратном направлении до выхода из контакта с лентой и подъема в исходное положение. В этот момент лента должна продвигаться вперед (влево) на расстояние, слегка меньшее, чем участок, на котором обеспечивается впresseвывание пасты за один рабочий ход пресса (позиция IV). Далее вся процедура повторяется столько раз, сколько это потребуется (позиция V, VI и т. д.).

Если необходимо непрерывное движение ленты с постоянной скоростью, то следует предусмотреть возвратно-поступательное движение устройства (или всего пресса). В процессе рабочего хода пресса скорость этого движения должна быть равна скорости движения ленты. Обратный ход может происходить с большей скоростью. Такого же результата можно достигнуть при неподвижном устройстве за счет увеличения частоты рабочих ходов пресса.

Подобную схему можно применять для горячего уплотнения фторопласта (при температурах  $>327^{\circ}\text{C}$ ) в ленте после просушки, а также для калибрования готовой ленты.

При необходимости предлагаемое устройство может быть использовано для заполнения пустот в пористом слое индивидуальных деталей как плоских, так и представляющих собой участки цилиндрических поверхностей большого диаметра (вогнутых и выпуклых).

Непрерывное производство ленточного антифрикционного металлофторопластового материала можно осуществлять при шаговой пропитке пастой фторопласта (с наполнителем и без него) пористого слоя ленты с помощью упругого пуансона (рис. 32). Предварительно паста наносится на поверхность ленты слоем заданной толщины (позиция I). В качестве упругого пуансона применяют изогнутую по дуге относительно большого радиуса довольно мощную плоскую пружину I (типа рессоры). При движении этой пружины (установленной в верхнем зажиме механиче-

ского или гидравлического пресса) вниз выпуклая ее поверхность входит в контакт с пастой 2 и начинает впresseвывать ее в пористый слой 3 (позиция II). Воздух из пористого слоя при этом выдавливается пастой в обе стороны (в продольном направлении). Так продолжается до момента встречи пружины с плоскими ограничителями по обеим сторонам ленты, обеспечивающими получение на поверхности ленты слоя фторопласта заданной толщины.

При дальнейшем движении верхнего ползуна пресса вниз, пружина, упершаяся своей выпуклой частью в ограничительные направляющие планки, распрямляется (уплощается), последовательно впresseвывая пасту в поры в обоих направлениях вдоль ленты на определенном, задаваемом длиной и начальным изгибом пружины, участке. После прохождения ползуном пресса нижней мертвой точки пружина поднимается, и нагрузка снимается (позиция III). Освобожденная лента продвигается на расстояние, несколько меньшее половины «пропитанного» за первый рабочий ход пресса участка (позиция IV), и операция повторяется (позиция V и VI). При последующих ходах паста впresseвывается лишь в одном направлении — навстречу движению ленты. Принцип последовательного впresseвывания пасты, обеспечивающий полное удаление воздуха из пор и пропитку пористого слоя пастой на всю глубину, при этом сохраняется.

Непрерывная пропитка пористого слоя на движущейся ленточной заготовке может быть выполнена последовательным впresseвыванием смазанной пасты. При этом биметаллическая лента (сталь — пористый слой антифрикционного сплава) протаскивается по направляющему желобу под питающим цилиндром, установленным от опорной поверхности желоба на расстоянии, равном толщине изготавливаемого материала (с учетом поверхностного прирабочного слоя фторопласта). Все приспособление размещается на столе гидравлического пресса, позволяющего регулировать в необходимых пределах прикладываемое к пасте через поршень или плунжер давление. Выходному отверстию цилиндра целесообразно в плане придавать форму части кольцевой поверхности, направленной выпуклостью навстречу подходящей под цилиндр полосе (можно его выполнить в виде треугольника, вершина которого обращена навстречу движению ленты).

К пасте, заключенной в цилиндре, прикладывается постоянное давление, достаточное для продавливания ее через пористый слой (если бы не было сплошного стального основания). При неподвижной ленте полное заполнение пор фторопластом достигаться не может из-за улавливания и сжатия в глубине пор воздуха. Однако при принудительном движении ленты в процессе ее прохождения под питающим отверстием цилиндра происходит последовательное впresseвывание пасты до стального основания ленты, вследствие чего весь воздух из пористого слоя удаляется навстречу движению ленты и при правильно выбранном давлении полностью замещается впresseвываемой пастой. Принудительное движение ленты, в ре-

зультате которого паста увлекается тангенциальной силой, действующей в направлении движения, благоприятствует созданию плотного поверхностного слоя на ленте и препятствует выдавливанию пасты навстречу движения ленты.

### 3. Пропитанные фторопластом пористые материалы

Металлический пористый каркас подшипников «Полислип» [89] изготавливают методом порошковой металлургии из полученных электролитическим способом (дендритных) порошков чистых металлов или же сферического порошка высокооловянной бронзы. Технология производства таких подшипников (до пропитки фторопластом) ничем не отличается от технологии производства заполняемых маслом пористых подшипников, описанной в литературе [89, 98, 64] (дендритные порошки), или же от технологии получения металлических фильтров (сферические порошки) [10, 98].

Ниже приведена схема технологического процесса изготовления содержащих фторопласт подшипников «Полислип».

1. Прессование смеси порошков меди и олова в пресс-формах (давление до  $2500 \text{ кгс/см}^2$ ) или же насыпание сферического порошка бронзы в специальные формы из нержавеющей стали или графита.

2. Спекание в конвейерной печи с восстановительной атмосферой.

3. Заполнение пор фторопластом. Предусматривается многократная вакуумная пропитка из суспензии фторопласта с промежуточной сушкой горячим воздухом ( $90^\circ \text{C}$ ).

4. Спекание частиц фторопласта в порах и поверхностном слое в единое целое при температуре  $370\text{—}380^\circ \text{C}$  (целесообразно в инертной атмосфере).

5. Калибрование подшипников пластическим деформированием (осаживанием).

Смесь порошков меди и олова спекается при температуре  $\sim 800^\circ \text{C}$  в течение примерно 15 мин (из них 5 мин в зоне печи с температурой  $800^\circ \text{C}$ ) с последующим охлаждением в инертной атмосфере в течение 40 мин. Повышение температуры свыше  $800^\circ \text{C}$  нежелательно, так как при этом наблюдается тенденция к образованию изолированных (закрытых) пор. В процессе спекания, проходящего при наличии жидкой фазы, образуется бронза. Получаемая пористость колеблется от 25 до 35%.

В одном из патентов описаны три разновидности метода заполнения пор внутренних поверхностей цилиндрических подшипников горячей запрессовкой тонкого листового фторопласта. В первом случае впрессовывание осуществляется дорном, проталкиваемым через заготовку подшипника с наложенной на его рабочую поверхность пленкой фторопласта. Во втором — пленка фторопласта вдавлируется воздухом или жидким металлом, подаваемым под давлением во внутреннюю полость подшипника.

В третьем — давление создается за счет различного термического расширения материала подшипников, фторопластовой пленки и вспомогательного цилиндрического элемента, вставляемого во внутреннее отверстие подшипника (термическое расширение этого материала должно быть выше, чем материала подшипника).

При изготовлении заготовок для подшипников из сферических частиц применяется технология, ничем не отличающаяся от технологии изготовления металлических фильтров из сферических частиц бронзы [64]. Однако приводимые режимы спекания существенно различаются. Так, в одной из работ рекомендуется спекать при температуре  $860\text{—}870^\circ \text{C}$  в течение 15—20 мин, а в другой — при  $800^\circ \text{C}$  в течение 30—90 мин.

Результаты детального исследования режимов спекания луженых сферических частиц бронзы (диаметром от 0,2 до 0,5 мм, содержащих 7—9% олова и 0,2—0,3% фосфора) приведены в работе [10]. Спекание производили в камерной печи в атмосфере диссоциированного аммиака при температурах от  $700$  до  $890^\circ \text{C}$  и выдержках от 30 до 120 мин. Пористость и максимальная усадка по высоте и длине спекаемых образцов, имеющих форму пластин, при температуре примерно до  $850^\circ \text{C}$  (при длительности спекания 60 мин) изменяются незначительно. При более высоких температурах происходит их быстрое изменение вследствие начала процесса плавления бронзы (нагрев выше температуры «солидуса»).

При исследовании влияния длительности спекания в выбранном интервале выдержек (30—120 мин) на физико-механические свойства заготовок установлено, что она практически не влияет на пористость и прочностные характеристики. Это свидетельствует о том, что процессы, ответственные за формирование пористого каркаса при спекании сферических частиц указанных выше размеров, заканчиваются в основном за время, меньшее 30 мин.

В температурном интервале  $800\text{—}850^\circ \text{C}$  все механические характеристики (за исключением сопротивления срезу) изменялись мало. При меньших температурах спекания механические характеристики существенно снижались, при температурах спекания выше  $850^\circ \text{C}$  механические свойства резко повышались ввиду значительного снижения пористости в результате спекания бронзовых частиц при наличии жидкой фазы. Из приведенных данных следует, что механические свойства пористых заготовок зависят от размера сферических частиц. Заготовки из частиц диаметром 0,2—0,3 мм имеют более высокие механические свойства (на 40—50%), чем из частиц диаметром 0,4—0,5 мм. Это объясняется тем, что заготовки из более мелких порошков получают менее пористыми. Кроме того, число межчастичных контактов при более мелких порошках выше.

На основании проведенного исследования [10] для спекания порошка данного состава рекомендуется следующий интервал температур:  $800\text{—}820^\circ \text{C}$  для частиц размерами 0,2—0,3 мм;  $820\text{—}840^\circ \text{C}$  для частиц размерами 0,3—0,4 мм;  $840\text{—}860^\circ \text{C}$  для частиц

размерами 0,4—0,5 мм. Длительность спекания выше 30—60 мин нецелесообразна.

В работе [49] описан материал, представляющий собой пористый каркас из сферических частиц фосфористой бронзы (не содержащей олова), пропитанный фторопластом-4. Бронза представляла собой сплав меди с 0,8—1,0% фосфора; сферические частицы получали распылением жидкого металла сжатым воздухом; пористые заготовки — спеканием в восстановительной атмосфере (водороде) в формах из нержавеющей стали свободно насыпанного порошка бронзы с размером частиц 0,2—0,3 мм. В результате спекания в течение 1 ч при температуре  $860 \pm 10^\circ \text{C}$  получали заготовки пористостью 38%. Для пропитки применяли суспензию фторопласта-4Д с добавкой 3%  $\text{MoS}_2$  (по сухому остатку). Для улучшения смачиваемости фосфористой бронзы в суспензию вводили раствор лака в спирте (состав лака не указан).

Для заполнения пор металлического каркаса применяли вакуумную пропитку с последующим (после впуска воздуха в камеру) приложением избыточного давления 20 кгс/см<sup>2</sup>. Предварительно для уменьшения сечения пор образцы погружали в раствор лака и просушивали.

В результате трехкратной пропитки с промежуточными просушками ( $85\text{—}90^\circ \text{C}$ ) пористость от  $\sim 40\%$  уменьшилась до 10%. Пропитанные образцы подвергали для спекания фторопласта в порах термической обработке на воздухе при температуре  $380 \pm 10^\circ \text{C}$ .

Метод получения пористого каркаса из несферических порошков железа марки ПЖ1М и нержавеющей стали марки Х17Н2 описан в работе [35]. Для получения крупных пор прессовали порошки с добавлением двууглекислого аммония, улетучивающегося в процессе спекания. Это позволяло получать образцы с пористостью до 80%, тогда как при прессовании чистых порошков пористость выше 50—60% получить нельзя. Применяли порошки различного фракционного состава в состоянии поставки ( $100 \div \pm 150$  меш и  $150 \div 200$  меш).

Изготавливали образцы с пористостью 20, 30, 40, 50%, а с применением летучего наполнителя — также 60 и 70%. Спекание проводили в среде водорода в течение 2 ч прессовок железа при температуре  $1100^\circ \text{C}$ , стали Х17Н2 при  $1200^\circ \text{C}$ . Качество спекания контролировали определением электропроводности, ударной вязкости и твердости по Бринеллю. Затем изучали влияние технологии изготовления каркаса на пропитываемость суспензией фторопласта-4Д без наполнителя и с наполнителем (10% графита марки «Карандашный опытный» с размером частиц  $< 10$  мкм). Поры заготовок заполняли методом многократной вакуумной пропитки. Степень заполнения пор рассчитывали по привесу пропитанных образцов. После пропитки, по-видимому, фторопласт в порах спекали, хотя в приведенной работе об этом не сказано.

При больших значениях пористости (выше 30%) более высокие прочностные характеристики имеют образцы, спрессованные с до-

бавлением двууглекислого аммония. При пропитке образцов чистой суспензией фторопласта-4Д и с добавлением графита, установлено, что степень заполнения пор с одинаковой исходной пористостью выше в образцах, изготовленных из более крупного порошка и спрессованных с применением двууглекислого аммония.

#### 4. Металлофторопластовые неразрезные подшипники

Стальные заготовки металлофторопластовых подшипников изготавливают механической обработкой из углеродистых конструкционных сталей марок 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45. Заготовки покрывают в цианистом электролите слоем меди толщиной 12—15 мкм, а затем слоем олова толщиной 1—3 мкм. Заготовки (10% от партии) контролируют на толщину покрытий с помощью магнитного измерителя ИТП-1.

Непосредственно перед засыпкой порошка бронзы заготовки и рабочие поверхности приспособлений (изготавливаемых из высокохромистых сталей 12Х18Н9, Х13) обезжиривают. Затем заготовки устанавливают в приспособления для засыпки порошка бронзы и последующего спекания. Схематично приспособления для спекания изображены на рис. 33. Порошок засыпают либо свободно либо на вибрационном стенде. Вибрация способствует более плотной и равномерной укладке сферических частиц бронзы. Приспособления после этого загружают в контейнер, помещаемый для спекания порошка бронзы в печь с восстановительной атмосферой (водород). Перепад температур в зоне контейнера, в которой располагаются приспособления, не превышает  $10^\circ \text{C}$ . Режим спекания следующий: 1) температура  $800 \pm 10^\circ \text{C}$ , выдержка 1,0—1,5 ч; 2) подъем температуры до  $830\text{—}860 (\pm 10)^\circ \text{C}$ , выдержка 10—60 мин. Температура и длительность выдержки на второй ступени спекания зависят от химического состава порошка бронзы (содержания олова), степени его окисления и, наконец, общей массы приспособлений и заготовок в садке. В случае сильно окисленного порошка бронзы допускается предварительное его восстановление (до засыпки в приспособление).

После спекания заготовки подвергают контролю по состоянию поверхности и качеству спекания. Состояние поверхности контролируют визуально. Качество спекания контролируют на образцах

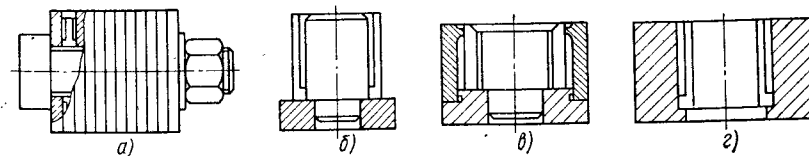


Рис. 33. Схема приспособлений для напекания слоев бронзы: а — на поверхностях плоских шайб (с двух сторон); б — на внутренней поверхности втулок; в — на обеих поверхностях втулок; г — на наружной поверхности втулок



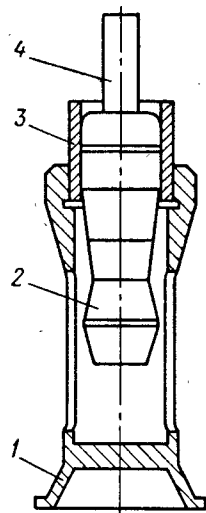


Рис. 34. Схема приспособления для пропитки пористого бронзового слоя, напеченного на внутреннюю поверхность стальной втулки

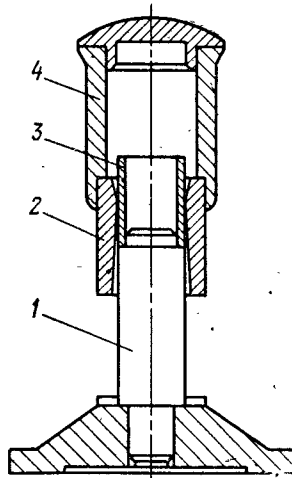


Рис. 35. Схема приспособления для пропитки пористого бронзового слоя, напеченного на наружную поверхность стальной втулки

зий, указанную в паспортах, и заданное объемное содержание дисульфида молибдена. На пористый бронзовый слой наносится паста фторопласта с  $\text{MoS}_2$  слоем 0,3—0,5 мм, достаточным для полного заполнения пор и создания поверхностного слоя, условно называемого приработочным. Поры заготовок, в зависимости от типа изготавливаемых изделий, заполняют пастой с помощью одного из перечисленных ниже способов. Для заполнения пор заготовок, имеющих плоские рабочие поверхности (например, упорных шайб) применяют метод вкатывания валками. Для получения приработочного слоя равномерной толщины заготовку предварительно помещают в специальную обойму, предотвращающую чрезмерное утонение слоя при входе и выходе заготовки из валков и коробление заготовок. Для цилиндрических втулок (подшипников) с внутренним рабочим слоем применяют последовательное впрессовывание пасты в поры протягиваемыми сквозь отверстие прошивками специальной формы. Для втулок с наружным рабочим слоем эту операцию осуществляют протягиванием втулки с нанесенным слоем пасты через фильеру.

Схема приспособления, на котором пропитывается внутренний слой цилиндрических втулок, приведена на рис. 34. Заготовку 3 с нанесенным слоем пасты помещают на подставку 1, после чего через втулку проталкивают прошивку 2. Скорость движения про-

шивки составляет 1000—2000 мм/мин. Поверхность прошивки покрывают хромом и полируют. Рабочие поверхности ее периодически очищают от налипшей пасты и протирают бензином.

Аналогичное приспособление применяют для пропитки наружного рабочего слоя втулок (рис. 35). Заготовку 3 помещают на подставку 1 и затем при движении фильеры 2, закрепленной в держателе 4, паста последовательно впрессовывается в поры бронзового слоя.

После заполнения пор пастой заготовки для удаления остатков жидкости из впрессованной пасты сушат сначала на воздухе при комнатной температуре (не менее 2 ч), а затем при температуре  $90^\circ\text{C}$  (2—2,5 ч).

При нагреве заготовок до температуры  $370 \pm 10^\circ\text{C}$ , выдержке 30—45 мин и последующем охлаждении заготовок в воде частички фторопласта спекаются в единое целое (своеобразную губку, как бы вставленную в губку из частиц бронзы).

Для придания подшипникам (втулкам и упорным кольцам) окончательных размеров их калибруют на приспособлениях, близких схематично изображенным на рис. 34 и 35.

После калибрования детали подвергают контролю: 1) по внешнему виду и размерам; 2) по качеству заполнения пор фторопластом с наполнителем; 3) по качеству сцепления бронзофторопластового слоя со стальной основой. Качество заполнения пор и сцепления бронзофторопластового слоя с основой проверяют по излому образцов-свидетелей из той же партии и так же обработанных.

После калибрования детали подвергают контролю: 1) по внешнему виду и размерам; 2) по качеству заполнения пор фторопластом с наполнителем; 3) по качеству сцепления бронзофторопластового слоя со стальной основой. Качество заполнения пор и сцепления бронзофторопластового слоя с основой проверяют по излому образцов-свидетелей из той же партии и так же обработанных.

После калибрования детали подвергают контролю: 1) по внешнему виду и размерам; 2) по качеству заполнения пор фторопластом с наполнителем; 3) по качеству сцепления бронзофторопластового слоя со стальной основой. Качество заполнения пор и сцепления бронзофторопластового слоя с основой проверяют по излому образцов-свидетелей из той же партии и так же обработанных.

## 5. Металлофторопластовые подшипники из ленточного материала

Технологический процесс производства материала. Схематично технологический процесс производства материала сводится к следующим операциям.

1. Покрытие поверхности стальной ленты слоем меди (для облегчения припекания частиц бронзы). Аналогичного результата можно достичь лужением ленты или применением биметалла сталь—медь.

2. Нанесение на омедненную поверхность слоя сферических частиц бронзы (или другого выбранного для создания пористого слоя металла).

3. Спекание пористого слоя (и одновременное его припекание к стальной основе) в восстановительной атмосфере с последующим охлаждением в этой же атмосфере.

4. Заполнение пор спеченного на стали слоя бронзы фторопластом с каким-либо мелкодисперсным наполнителем, повышающим нагрузочную способность материала (например,  $\text{MoS}_2$  или свинцом).

5. Спекание фторопласта в порах и на рабочей поверхности материала.



6. Калибрование готовой ленты.

7. Изготовление свертных втулок, упорных колец и полусферических опор штамповкой и механической обработкой.

8. Покрытие электролитическим способом тыльной стороны слоем олова или другого металла, защищающего от коррозии стальную основу материала.

Ниже приведено более детальное описание и пояснения к отдельным операциям технологического процесса.

Стальная лента марки 08-10 (в бунтах), как наиболее приемлемая в качестве основы биметаллических антифрикционных материалов, электролитически покрывается слоем меди, наносимым для облегчения припекания бронзового порошка. Можно за исходный материал применять сталь, предварительно плакированную тонким слоем меди [39] совместной прокаткой или заливкой на стальную заготовку с последующей раскаткой до нужной толщины.

Для изготовления порошка со сферическими частицами, напекаемого на стальную ленту, применяется бронза марки Бр.ОФ-10. В бронзе содержится 9—11% олова; 0,3—0,6% фосфора, 0,5% (не более) примесей (остальное медь). Технология изготовления порошков со сферическими частицами разработана применительно к производству металлических фильтров. Порошок получают распылением струи жидкого металла воздухом или водой. Затем порошок рассеивают на ситах и проверяют сферичность частиц. Гранулометрический состав бронзового порошка определяют на приборе 028М с комплектом из 12 сит. Для изготовления металлофторопластовой ленты используют порошок с частицами диаметром 0,063—0,16 мм. Не удовлетворяющий требованиям по размеру частиц и по их форме порошок идет на переплавку.

Высокооловянная бронза обладает высокими противозадирными свойствами при трении по стали. Опыт зарубежных фирм, работавших над созданием антифрикционных материалов с фторопластом и испытавших большое количество разнообразных металлов и сплавов (в том числе свинцовую бронзу, оловянные бронзы различного состава и т. д.), также показал, что высокооловянная бронза, содержащая 11% Sn, является наилучшим для образования пористого слоя на стальной ленте сплавом.

Целесообразная толщина слоя 0,25—0,5 мм. Чрезмерное утолщение слоя приводит к увеличению расхода дефицитных материалов и снижению механических свойств пористого слоя.

Выпрямленную ленту с нанесенным на нее дозированным слоем сферических частиц бронзы спекают в конвейерной печи с восстановительной атмосферой. Для этой цели можно применять тщательно осушенный водород, диссоциированный аммиак или природный газ после неполного их сгорания и удаления воды. Температура спекания должна быть возможно более высокой для ускорения процесса, но не рекомендуется превышать 798° С, так как при этой температуре может появиться жидкая фаза. Присутствие же жидкой фазы при спекании в данном случае может привести

к большой усадке, а следовательно к образованию разрывов в слое бронзы, уменьшению общей пористости (должна быть порядка 30—35%) и резкому возрастанию количества закрытых пор.

Охлаждение также следует вести в восстановительной атмосфере. Длину охлаждающей камеры при заданной скорости движения ленты выбирают достаточной для обеспечения охлаждения частиц бронзы ухудшает качество получаемого в конечном счете материала. Длину печи и охлаждающей камеры следует выбирать из расчета необходимой производительности печи, с учетом того, что время спекания составляет 0,5—1 ч. При применении более высоких температур длительность спекания может быть существенно снижена, но при этом возникает опасность оплавления частиц бронзы.

Далее должна быть произведена пропитка пористого слоя чистым фторопластом или смесью его с наполнителем. Предварительно ленту целесообразно калибровать шлифованными или, даже, полированными валками с очень небольшими обжатиями пористого слоя. При этой операции выравнивается поверхность пористого слоя (снижение пористости должно быть минимальным) и на ней не остается отдельных выступающих частиц бронзы, которые при последующей работе изделий из готового материала могли бы быстро появиться из-под поверхностного слоя фторопласта. При калибровании необходимо принимать меры для предотвращения загрязнения пористого слоя, особенно маслами, так как загрязнения ухудшают пропитку, а следовательно, и качество материала. По той же причине нецелесообразно длительное хранение ленты после спекания из-за опасности окисления и адсорбции влаги и других веществ из воздуха.

Калиброванную ленту затем подают в дозирующий аппарат, в котором на поверхность пористого слоя ленты наносится необходимое для пропитки и создания поверхностного слоя количество пасты чистого фторопласта или фторопласта с наполнителем. Наилучшие результаты получали при введении во фторопласт 25% по объему мелкодисперсного дисульфида молибдена [59] или 20% коллоидного свинца [88].

Пасту изготавливают совместной коагуляцией водной суспензии фторопласта-4ДВ и спиртовой суспензии дисульфида молибдена [39]. Суспензию смешивают и коагулируют в якорной мешалке (якорь вращается со скоростью 18 об/мин).

Процесс изготовления пасты кратко сводится к следующему:

- 1) отвешивают необходимое количество суспензии фторопласта, дисульфида молибдена и гидролизного спирта;
- 2) готовят спиртовую суспензию дисульфида молибдена смешиванием компонентов в мешалке в течение 2—3 мин;
- 3) заливают в полученную суспензию дисульфида молибдена водную суспензию фторопласта и интенсивно перемешивают до полной коагуляции и образования однородной массы;

4) удаляют излишнюю жидкость.

Необходимое количество исходных компонентов определяют с учетом концентрации суспензии и плотности фторопласта ( $2,2 \text{ г/см}^3$ ) и дисульфида молибдена ( $4,8 \text{ г/см}^3$ ).

Сырьем для получения мелкодисперсного дисульфида молибдена является молибденовый флотационный концентрат КМ-1, содержащий: не менее 50% молибденита ( $\text{MoS}_2$ ); не более 5% кремнезема, 0,07% мышьяка и 0,07% фосфора. Концентрат измельчают (до  $\sim 150 \text{ мкм}$ ), после чего подвергают флотации, выщелачиванию примесей кислотами, обработке этиловым спиртом и сушке. Выщелачивание ведут в следующей последовательности: соляная кислота, смесь соляной и плавиковой кислот, смесь азотной и соляной кислот, аммиачная вода. В готовом продукте 1-го сорта содержится не менее 99,5%  $\text{MoS}_2$ . Содержание двуокиси кремния должно быть не более 0,1%, а других примесей — не более 0,4%. Полученный дисульфид молибдена с дисперсностью 150 мкм измельчают до 8—2 мкм на струйной мельнице. Дробление дисульфида молибдена в струйной мельнице происходит в результате соударения частиц, увлекаемых потоком газа, движущимся со сверхзвуковой скоростью.

Вводят пасту в пористый слой наиболее технологичным в этом случае способом вкатывания шероховатыми валками. Воздух при этом последовательно вытесняется по пористому слою вперед и поры при правильной дозировке пасты заполняются на всю толщину пористого слоя. При вкатывании паста впрессовывается в поры и образует поверхностный слой последовательно по всей длине ленты.

Пасту, вкатанную в поры, просушивают при пропускании ленты через сушильную камеру с температурой до  $100^\circ \text{C}$ . Паста без наполнителя более чувствительна к температуре, и при ускоренной сушке (более высокой температуре) в поверхностном слое образуются трещины (это особенно относится к суспензии фторопласта-4ДП).

Частицы фторопласта в порах и на поверхности слоя бронзы должны быть спечены при температуре  $360\text{—}380^\circ \text{C}$ . Спекание целесообразно производить в восстановительной атмосфере под небольшим давлением, не препятствующим удалению образующихся при спекании газов (остатки воды, продукты разложения стабилизатора и пиролиза фторопласта), но предотвращающим образование во фторопласте пузырьков и разрывов. После предварительного спекания частиц фторопласта в свинцовой ванне горячую ленту пропускают через валки, нагретые до температуры спекания фторопласта. При этом частицы фторопласта окончательно спекаются под давлением и завариваются образовавшиеся при спекании дефекты поверхностного слоя. Охлажденную ленту калибруют пропусканием ее через ряд полированных валков.

После выполнения этих операций (и в случае необходимости электролитического лужения тыльной стороны) лента представ-

ляет собой готовый антифрикционный материал, из которого можно штамповкой изготавливать свертные втулки, упорные кольца, шаровые опоры и др. При этом следует применять методы штамповки, дающие окончательный размер изделия и необходимое качество поверхностей трения (нарушение поверхностного прирабочного слоя не допускается). Механическая обработка полученных штамповкой деталей заключается в обработке торцов и снятии заусенцев.

При работе изделий из этого материала в агрессивных средах следует тыльную сторону и торцы подвергать дополнительному электролитическому лужению или покрытию другими более коррозионно-устойчивыми металлами (свинцом, кадмием, хромом, никелем и др.). Необходимая толщина покрытия составляет  $\sim 0,01\text{—}0,02 \text{ мм}$ .

Наши эксперименты показали, что для пропитки наиболее подходит суспензия фторопласта-4ДВ. В изготовленной на ее основе пасте остается минимальное количество стабилизатора (в исходной суспензии его содержится лишь 3% по сравнению с 9—12% в суспензиях других марок). При спекании благодаря этому образуется меньшее количество газообразных продуктов испарения и пиролиза стабилизатора и смесь фторопласта с дисульфидом молибдена получается более плотной и прочной. Антифрикционные характеристики образцов, пропитанных фторопластом-4ДВ, также оказались наиболее высокими [59].

Материал в массовом масштабе целесообразно изготавливать на поточных линиях непрерывного действия.

I. На первой линии поставляемая в бунтах лента, в процессе меднения распрямляется, обезжиривается, протравливается, электролитически покрывается медью, промывается, сушится и опять сворачивается в бунты.

II. На второй линии, включающей в себя конвейерную печь с восстановительной атмосферой, выполняются операции нанесения частиц бронзы и спекания пористого слоя.

III. На третьей линии целесообразно производить все операции от заполнения пор фторопластом до калибрования. В результате получается почти готовый материал (остается лишь нанести антикоррозионное электролитическое покрытие с тыльной стороны).

Совмещение двух или всех трех линий в одной нецелесообразно, так как необходимость одновременного выполнения большого количества разнообразных технологических операций может снизить надежность работы линии в целом (при выходе одного элемента из строя будет простаивать вся линия). На данном этапе целесообразно осуществлять технологический процесс производства металлофторопластовой ленты на трех отдельных полуавтоматических линиях.

Оборудование, применяемое на Климовском машиностроительном заводе. Металлофторопластовая лента на этом заводе изготавливается на двух полуавтоматических линиях, выполненных

с участием НИИТАвтопрома. На первой линии напекают на предварительно медненую стальную ленту сферические частицы бронзы, образующие пористый слой; на второй линии поры этого слоя заполняются фторопластом-4 с наполнителем [37, 39].

Первая линия (рис. 36, а) состоит из размоточного устройства (рулонницы) 1, пневматических ножниц (не показанных на рисунке), правильных валцов 2, агрегата 3 для промывки и очистки ленты, устройства для нанесения на ленту слоя бронзовых частиц, печи 4 для их спекания и припекания к ленте, тянущих валцов 5 (лентопротяжного механизма) механизма 6 намотки. Скорость движения ленты составляет 20 м/ч.

Размоточное устройство 1 имеет станину и двухгнездную кассету. Кассета с рулоном медненной стальной ленты в исходное положение для размотки перемещается пневмоцилиндром. Ножницы служат для обрезки концов заканчивающегося рулона и вновь установленного для последующей их стыковой сварки (процесс напекания пористого бронзового слоя осуществляется непрерывно). Правильные валцы 2 выравнивают ленту, что обеспечивает возможность получения в последующем равномерного по толщине пористого слоя бронзы. В агрегате 3 для промывки и очистки лента проходит через ванну с подогреваемым паром до температуры 70—80° С обезжиривающим раствором (в одном литре содержится 20—30 г NaOH, 25—30 г  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  и 3—10 г мыла), зачищается цилиндрическими металлическими щетками, промывается холодной водой и сушится струей горячего воздуха (120—140° С).

На выправленную и очищенную ленту в специальном устройстве, установленном непосредственно перед печью, наносится равномерный слой сферических частиц бронзы. Состоит это устройство из станины, роликов (поддерживающего, приводного и нажимного) и ножа из немагнитного материала. Нож предназначен для удаления избытка частиц и разравнивания слоя. Ролики насыпного

устройства приводятся во вращение с помощью вала от лентопротяжного механизма 5. В печи 4 бронзовые гранулы спекаются на стальной ленте. Печь имеет форкамеру, камеру спекания и холодильник. Нагревается печь силитовыми стержнями, потребляемая мощность 50 кВт. Частицы спекаются в среде водорода (подаваемого из баллонов) при температуре 890—900° С. Лента проходит через печь за 8—10 мин и на выходе охлаждается.

Тянущие валцы лентопротяжного механизма 5 протягивают ленту с заданной скоростью через всю линию и одновременно калибруют ленту, доводя ее толщину до заданных размеров и выравнивая поверхность (вдавливая наиболее выступающие частицы бронзы до общего уровня). Лентопротяжный механизм имеет станину, два калибрующих вала и семь правильных роликов (три сверху и четыре снизу). Ролики и валки приводятся в движение от общего привода. Калиброванная и выправленная лента подается на механизм намотки 6, состоящий из станины, барабана, стемника и гидропривода. Конец ленты, выходящей из лентопротяжного механизма, зажимается в прорези барабана, после чего он приводится во вращение. После намотки рулона нужного диаметра лента отрезается и рулон снимается и передается либо непосредственно на рулонницу второй линии, предназначенной для заполнения пор пористого слоя, либо на склад.

Вторая линия, изображенная на рис. 36, б, состоит из размоточного устройства 1, правильных валцов 2, устройства 3 для нанесения на пористый бронзовый слой пасты фторопласта-4 с дисульфидом молибдена (25%), валков 4 для вкатывания пасты в пористый слой, печи 5 для сушки, печи 6 для спекания фторопласта, валков 7 для окончательного калибрования, механизмов намотки 8.

Размоточное устройство и правильные валцы выполняют те же функции, что и на первой линии, за исключением лишь того, что на вторую линию подается стальная лента уже с напеченным на нее слоем пористой бронзы. В устройстве для нанесения пасты, состоящем из бункера и двух соединенной зубчатой передачей валков (приводимых во вращение движущейся лентой), на пористый слой бронзы наносится слой пасты фторопласта заданной толщины. Затем паста вкатывается в поры на устройстве, состоящем из трех пар валков диаметром 250 мм. Количество наносимой на ленту пасты и зазор между валками выбирают такими, чтобы пористый слой пропитывался на всю глубину, а на поверхности создавался закрывающий вершины гранул тонкий слой уплотненной пасты толщиной 20—40 мкм. Для предотвращения налипания пасты вкатывающие валки изготавливают из нержавеющей стали с низкой шероховатостью поверхности. Кроме того, поверхности валков в процессе вкатывания пасты непрерывно смачиваются спиртом. Пропитанную ленту сушат в печи с нагревателями сопротивления (спирали из нихрома) при температуре 80—90° С. Длительность процесса сушки 5 мин. Затем ленту подвергают спеканию в печи

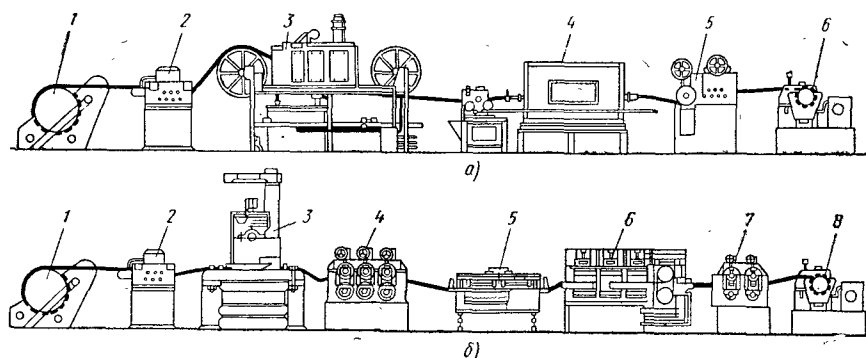


Рис. 36. Полуавтоматические линии производства металлофторопластовой ленты:  
а — для напекания слоя сферических частиц бронзы на медненую стальную ленту;  
б — для заполнения пор смесью фторопласта с дисульфидом молибдена

при температуре 370° С, длительность спекания (время прохождения ленты через печь) 6—8 мин.

Установленные на выходе из печи подогреваемые валки калибруют ленту. При этом полимер уплотняется и дополнительно спекается под давлением. После прохождения валков 7 окончательного калибрования, осуществляемого в холодном состоянии, готовая лента подается на механизм намотки 8. Готовую металлофторопластовую ленту тщательно контролируют по следующим параметрам: микроструктуре, размерам, глубине вытяжки и двустороннему изгибу образцов на 90° в губках тисков с различными радиусами закругления.

По микроструктуре ленты на поперечных шлифах не менее пяти образцов контролируют: качество напекания бронзового пористого слоя, пористость, равномерность толщины фторопластового поверхностного слоя и бронзового подслоя, заполнение пор фторопластом, равномерность распределения наполнителя ( $\text{MoS}_2$ ) во фторопласте. Все шлифы сравнивают с эталонными образцами. Ленту, в которой обнаружены недостаточное спекание частиц бронзы между собой или значительные участки оплавления с недопустимым уменьшением пористости, некачественное заполнение пор фторопластом с  $\text{MoS}_2$ , а также другие дефекты бракуют, а ленту, удовлетворяющую всем поставленным требованиям, направляют в цех для изготовления из нее подшипников.

**Оборудование, применяемое для изготовления ленточных металлополимерных материалов за рубежом.** При производстве металлопластмассовых материалов «DU» [88] и «DX» [94, 95] покрытие стальной ленты медью и напекание на нее пористого слоя бронзы осуществляется английской фирмой «Гласир» на тех же линиях, на которых изготавливается металлокерамическим способом биметалл сталь—свинцовая (и других составов) бронза [76, 98].

Одна из линий предназначена для меднения стальной малоуглеродистой ленты. Тонкая лента (в бунтах длиной до 200 м) покрывается медью на специальных поточных линиях, в процессе прохождения которых лента обезжиривается, протравливается, покрывается медью, промывается, сушится и сворачивается опять в бунты. Покрытие производится в два этапа — сначала под струей цианистого электролита, который образует начальную прочную пленку, затем после промывки медь осаждают в обычном серно-кислом электролите. Снаружи бунты после операции меднения оборачиваются бумагой для предотвращения загрязнения поверхностей. Бунты ленты устанавливают в специальные узкие катушки с наружным диаметром порядка 2 м, с помощью которых лента легко транспортируется без специальных подъемных устройств и устанавливается в задающие устройства линий для электролитического покрытия и спекания.

Операции напекания пористого слоя бронзы производятся на специальных поточных линиях, основным звеном которых является печь для спекания порошка на стальной основе. Фирма

«Гласир» имела две полуавтоматические линии, каждая из которых состоит из четырех каналов с отдельными конвейерными лентами. Необходимость снабжения установок конвейерными лентами была вызвана тем, что длина печи велика, температура спекания высокая и, как следствие этого, механическая прочность стальной ленты, на которую наносится свинцовая бронза, при этих условиях недостаточна для протягивания через печь. Конвейерные непрерывные ленты (концы сварены) из жаропрочного сплава (нихрома) протягиваются через индивидуальные каналы печи и возвращаются в обратном направлении под печью (вертикально-замкнутый конвейер). Скорость движения ленты на поточных линиях напекания (применяемых главным образом для изготовления биметалла сталь — свинцовая бронза) составляет 0,3—1 м/мин.

Весь процесс нанесения слоя бронзы на стальную основу, выполняемый на непрерывно действующих установках, сводится вкратце к следующему. Бунт стальной ленты, одна сторона которой предварительно покрыта слоем меди, помещают на вал барабана. К концу ленты приваривают «задающую» стальную полосу, обеспечивающую продвижение ее до находящегося в конце линии устройства, осуществляющего движение полосы с заданной скоростью. При изготовлении биметалла в виде отдельных полос, что применяется для материала больших толщин, который невозможно свернуть в бунт, последние лежат на движущейся конвейерной ленте свободно.

Лента в самом начале линии проходит через ряд выпрямляющих ее правильных валков и поступает затем по рольгангу в устройство, в котором на нее наносится порошок бронзы. Далее лента попадет на конвейерную ленту и движется уже совместно с последней.

После прохождения печи, в которой порошок бронзы спекается, и охлаждающей камеры лента попадает в подающий механизм, который представляет собой простые валки с регулируемой скоростью вращения, тянущие (без обжатия) изготавливаемую ленту совместно с конвейерной. Каждая из четырех линий установки имеет индивидуальный привод, что позволяет протягивать ленты через печь с разной скоростью. После подающего механизма лента, минуя приспособление для разрезки, наматывается на приемный барабан.

Фирма «Гласир» при изготовлении металлофторопластового материала «DU», по-видимому, пропитывает пористый слой смесью политетрафторэтилена со свинцом, спекает политетрафторэтилен и калибрует ленту на описанной в патентной литературе \* конвейерной установке (рис. 37). Стальная лента 1 с предварительно напеченным на нее слоем пористой бронзы перемещается под бункером 2, из которого на нее подается густая паста 3 (~80% сухого

\* Patents of England № 756950.

Таблица 15

РАЗМЕРЫ ВЫПУСКАЕМОЙ МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВОЙ ЛЕНТЫ, мм

Общая толщина <sup>1</sup>	Толщина			Ширина ленты	Длина поставляемых полос
	Стальной основы	Бронзового слоя <sup>1</sup>	Фторопластового слоя <sup>2</sup>		
1,10	0,75	0,35	0,06	75—100	500—2000
1,60	1,30	0,35	0,06	75—100	500—2000
2,60	2,30	0,35	0,06	75—100	500—2000

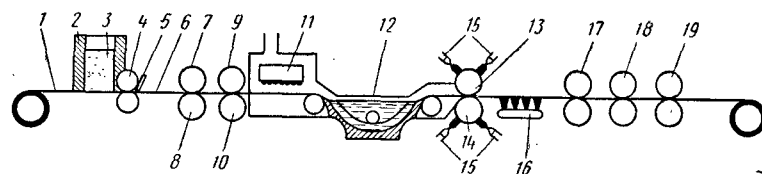
<sup>1</sup> Допуск 0,05 мм.<sup>2</sup> Допуск 0,035 мм.

Рис. 37. Схема поточной линии заполнения пор бронзового слоя фторопластом со свинцом

остатка), состоящая из смеси политетрафторэтилена со свинцом. Затем лента проходит между разравнивающими пасту валками 4, излишек которой очищается скребком 5. Оставшийся на ленте слой 6 пасты вдавлируется в пористый слой при прохождении ленты между двумя парами валков (7, 8 и 9, 10). Высушенная с помощью нагревателя 11 при температуре 200° С лента пропускается через ванну 12 с расплавленным свинцом (380° С в течение 60 с). Жидкий свинец обеспечивает быстрый прогрев ленты и спекание политетрафторэтилена за короткий промежуток времени. Выходящая из ванны лента поступает в валки 13, 14, нагреваемые до 380° С газовыми горелками 15. При этом закрываются пустоты в политетрафторэтилене, а также дополнительно спекаются его частицы. Выходящая из валков лента охлаждается водяным душем 16, вследствие чего достигается «закалка» политетрафторэтилена (уменьшение содержания кристаллической фазы). Охлажденная лента проходит через три пары калибрующих валков (17, 18, 19). Все валки установлены с зазором, равным заданной толщине материала, минус 75 мкм. Готовая для производства подшипников скольжения лента наматывается в бунт на приемном барабане.

При производстве материала «ДХ» заполнение пор полимером осуществляется значительно проще — лента из полиацетальной смолы, ведущей себя как подобает типичному термопластичному полимеру, вкатывается при повышенной температуре в пористый слой.

**Изготовление металлофторопластовых подшипников штамповкой.** Климовский машиностроительный завод производит металлофторопластовую ленту различной толщины в соответствии с техническими условиями (ТУ-27-01-01—71). Размеры выпускаемой ленты приведены в табл. 15.

Основой материала является лента из стали 08КП или 10КП (ГОСТ 1050—60\*), покрытая с обеих сторон слоем меди марки М1 (ГОСТ 859—66\*) или латуни марки Л90 (ГОСТ 15527—70). Стальная омедненная лента поставляется Нытвинским металлургическим заводом по ВТУ 43-419—63. На стальной основе спекается пористый бронзовый слой из сферического бронзового порошка (9—11% Sn) с частицами диаметром 0,063—0,16 мм.

Для изготовления пасты, которой пропитывается пористый слой, применяется суспензия фторопласта-4ДВ (ТУ № П-40—59) и

дисульфид молибдена (ЦМТУ 06-1—68). Применяется композиция, состоящая из 75% фторопласта и 25% дисульфида молибдена (объемные проценты).

Подшипники из металлофторопластовой ленты изготавливают методами точной штамповки. Особенностью этого материала, налагающей серьезные ограничения на возможные методы штамповки, является недопустимость повреждения и обработки резанием антифрикционного слоя. Шлифование и любые операции абразивной доводки поверхностей применять также нельзя. Поэтому поверхности трения подшипников окончательную форму и размеры должны получать уже в результате операций штамповки.

Возможны два пути получения точных изделий из металлофторопластовой ленты. Один путь — штамповка подшипников из ленты, предварительно прошедшей очень точное калибрование по толщине. Другой путь заключается в штамповке подшипников из некалиброванной ленты с последующим калиброванием уже отштампованных деталей. Оба эти пути имеют как достоинства, так и недостатки. В действительности при изготовлении подшипников приходится идти по третьему промежуточному пути.

Из металлофторопластовой ленты изготавливают неразъемные, разъемные и открытые подшипники. К неразъемным относятся свертные втулки (наиболее широко применяющиеся), шарнирные сферические подшипники и упорные кольца (шайбы); к разъемным — полувкладыши цилиндрических подшипников и детали разборных шарнирных подшипников.

**Свертные втулки.** Наиболее широко применяются свертные металлофторопластовые втулки с внутренним рабочим слоем. В настоящее время Климовский машиностроительный завод выпускает в соответствии с ТУ-27-01-01-2—71 втулки типоразмеров, приведенных в табл. 16, главным образом для нужд текстильного машиностроения (ткацких станков).

Из ленты Климовского машиностроительного завода можно изготавливать свертные втулки других (в том числе значительно больших) диаметров и длин (не указанных в таблице).

Таблица 16  
ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ ВЫПУСКАЕМЫХ ВТУЛОК, мм

Внутренний диаметр	Наружный диаметр	Длина втулки	Фаска наружная и внутренняя
10	13	10—12—16	0,4×45°
12	15	10—12—16—20	
15	18	10—12—16—20—25	
16	19	10—12—16—20—25	0,4×45°
18	21	12—16—20—25—32	
20	23	16—20—25—32—40	
22	25	16—20—25—32—40	0,4×45°
25	28	16—20—25—32—40	
30	33	20—25—32—40—50	
32	37	20—25—32—40—50	0,4×45°
36	41	25—32—40—50	
40	45	32—40—50—60	
55	60	32—40—50—60—65—70	
Допуск $A_3$ в запрессованном состоянии	Допуск Пр 1 <sub>3</sub>	Допуск —0,5	

Для предварительного свертывания металлофторопластовых подшипников (после которого необходима операция калибрования) можно применять любые известные технологические процессы свертывания втулок из ленточного или листового материала. Вырубленную заготовку можно сгибать в цилиндрическую втулку за разное количество операций. На рис. 38 приведена схема технологического процесса изготовления свертных втулок (включая и калибрование), в котором предусмотрена гибка за три операции [39]. Можно получать свертные втулки и за две операции гибки [69]. Несомненный интерес представляет получение свертных втулок в однопозиционном штампе за одну операцию [39]. В этом штампе (рис. 39) от рулонной ленты заготовка необходимой длины и из нее свертывается втулка. Лента механи-

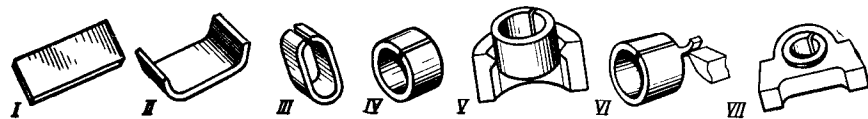
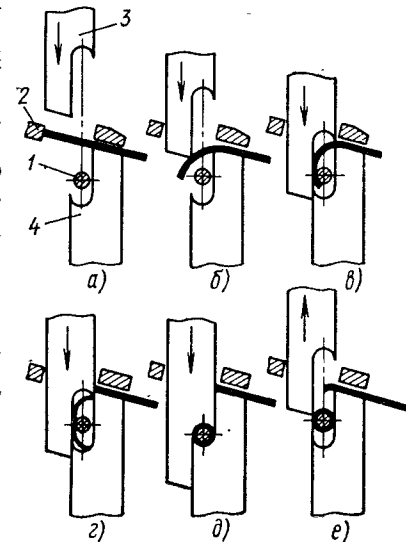


Рис. 38. Схема технологического процесса изготовления свертных втулок:

I — вырубка раскройки; II — первая гибка; III — вторая гибка; IV — окончательная гибка; V — калибрование втулки через фильеру; VI — подрезка торцов и фасок; VII — запрессовка втулки в корпус

Рис. 39. Схема свертывания втулок в однопозиционном штампе:  
а — подача ленты до упора; б, в — гибка втулки; г — отрезка; д — свертывание втулки на оправке; е — раскрытие штампа



чески подается до регулируемого упора 2 (положение а). При движении пуансона 3 вниз лента изгибается вокруг скругленной кромки второго пуансона или матрицы 4 и цилиндрической оправки 1 (положение б). Заготовка отрезается, когда пуансон 3 перекрывает углубление матрицы 4 (положение в). Наличие скругления на режущей кромке матрицы способствует подгибке концов заготовки, вследствие чего облегчается процесс дальнейшего огибания оправки (свертывания втулки) при движении пуансона вниз (положение г). Процесс свертывания заканчивается, когда пуансон достигает крайнего нижнего положения (положение д). При последующем движении пуансона вверх штамп раскрывается, готовая втулка сбрасывается с оправки с помощью съемника и начинается подача ленты для следующей втулки (положение е).

Такая схема штамповки позволяет создать высокопроизводительный, универсальный, легко переналаживаемый штамп сравнительно простой конструкции.

Отношение радиуса изгиба к толщине материала при свертывании втулок по любой технологической схеме не должно быть ниже 5÷10. При меньших значениях отношения возможно нарушение целостности фторопластового слоя. Свертывание втулок антифрикционным слоем наружу не допускается из-за образования разрывов в наружном бронзовом слое.

Рабочие поверхности штампов, с которыми соприкасается фторопластовый слой, рекомендуется изготавливать шлифованными до  $\nabla 8$ — $\nabla 10$ . При организации рабочего места и технологического процесса изготовления втулок и других деталей из металлофторопластовой ленты следует предусматривать меры по защите рабочего фторопластового слоя материала от механических повреждений.

При свертывании втулки в ее поперечном сечении возникают напряжения, характерные для упруго-пластического изгиба. Снятие внешней нагрузки приводит к пружинению, сопровождающемуся образованием в стыке значительного зазора, и возникновению нежелательных остаточных напряжений. Тыльная сторона втулки при простом гнбе не может получить правильной геометри-



ческой формы. При запрессовке такой втулки в гнездо не будет достигаться хорошее контактирование, что ухудшает условия теплоотвода.

Для устранения этих недостатков введена дополнительная операция калибрования, заключающаяся в проталкивании свернутой втулки, надетой на пуансон с заданными размерами, через фильеру диаметром, соответствующим наружному диаметру готовой втулки. Длину заготовки выбирают таким образом, чтобы при входе в фильеру стык закрывался и по всей плоскости раздела возникали напряжения сжатия, превышающие предел текучести компонентов материала (с учетом, конечно, наклепа). Если пластическая деформация сжатия в тангенциальном направлении распространилась по всему периметру втулки (этому могут препятствовать силы трения), то при выходе из фильеры зазор в стыке не должен раскрываться. Некоторое пружинение может иметь место из-за того, что предел текучести во внутренних слоях стальной основы может быть несколько выше, чем в наружных. Причиной этого является то, что внутренние слои при операциях гибки и последующем калибровании претерпевают пластическую деформацию сжатия, благодаря чему предел текучести повышается. Наружные же слои при гибке упруго и пластически растягиваются.

В процессе калибрования в наружных слоях сначала должны сниматься упругие напряжения растяжения, затем возникать упругие напряжения сжатия и лишь после превышения предела текучести начинается пластическая деформация сжатия. При этом общая величина пластической деформации сжатия в наружных слоях меньше, чем во внутренних, следствием чего является меньший наклеп и меньшее значение конечного предела текучести. Это может усугубляться еще и тем, что при изменении направления деформации течение металла вследствие эффекта Баушингера начинается при меньших напряжениях.

При достаточной величине в процессе калибрования деформации в тангенциальном направлении, определяемой выбранной длиной заготовки, пружинение стальной основы мало. Кроме того, оно может полностью нейтрализоваться явлением обратного пружинения, возникающего вследствие наличия на внутренней поверхности втулки слоя материала с иными механическими свойствами. Явление это подробно проанализировано в статье А. П. Семенова [57] применительно к штамповке полувкладышей из биметаллических подшипниковых материалов.

В статье В. П. Шишлякова [69] высказывается мнение, что при калибровании пропусканьем втулок через одну фильеру происходит раскрытие зазора в стыке вследствие явления релаксации. В качестве меры борьбы с этим предлагается калибровать пропусканьем заготовки втулки последовательно через две фильеры (или набор фильер), таким образом, чтобы калибруемая втулка одновременно проходила через обе фильеры. Хотя применение двух фильер и имеет некоторые преимущества, но не по этой при-

чине. По-видимому, в приведенном случае заготовка была недостаточной длины и при пропускании через одну фильеру не осуществлялся переход в тангенциальном направлении к пластическому деформированию сжатия по всему поперечному сечению и по всему периметру. При пропускании же заготовки последовательно через две фильеры суммарная деформация в них была достаточной.

При калибровании проталкиванием через фильеру исходная толщина стенок втулки в принципе не должна уменьшаться, а даже слегка увеличиваться (за счет осадки при уменьшении периметра заготовки). Однако возможно калибрование по этой схеме и с утонением стенок, если зазор между оправкой и фильерой меньше, чем исходная толщина стенок втулки. Такой способ калибрования рекомендует ВНИИЛТЕКМАШ [39], хотя, по нашему мнению, утонение стенок в процессе калибрования проталкиванием через фильеру при правильно выбранной длине заготовки (периметре) совсем не обязательно.

Возможен другой способ калибрования свертных втулок, который заключается в осадке втулки, помещенной в специальную матрицу [39]. При этом длина втулки уменьшается, а толщина стенок увеличивается. В какой-то мере деформация при этом способе калибрования соответствует деформации, осуществляемой при изготовлении неразъемных шарнирных сферических подшипников. Напряженное состояние в процессе деформации, а также и остаточные напряжения при таком калибровании существенным образом отличаются от описанных при калибровании проталкиванием через фильеру. Основная деформация при осадке втулок происходит в осевом направлении, при проталкивании через фильеру — в тангенциальном. К недостатку этого метода относятся: необходимость в прессах большой мощности, невозможность калибрования длинных втулок, трудность получения втулок без разностенности.

Для предотвращения коррозии, улучшения условий запрессовки и товарного вида подшипников их наружную поверхность покрывают медью (если тыльная сторона ленты не была предварительно покрыта), цинком, кадмием или оловом. Лужение ведется в кислом электролите с предварительным обезжириванием.

Готовые втулки запрессовываются в корпус по прессовой посадке  $Pr1_3$ . Этим обеспечивается надежная фиксация втулки в гнезде подшипника и упругая ее устойчивость. Расчет возникающих напряжений ведут по формуле Ляме. Размеры фильеры и пуансона выбирают для калибрования такими, чтобы между валом и поверхностью подшипника обеспечивались зазоры, приведенные в табл. 17.

Наименьший гарантированный зазор для подшипников из металлофторопластовой ленты определяется не только тепловым расширением вала и подшипника, но и тем, что при нагреве происходит «выдавливание» фторопласта (имеющего высокий коэффициент термического расширения) в зазор. Поэтому для подшипника,



Таблица 17

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ЗАЗОРЫ ДЛЯ МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВЫХ ПОДШИПНИКОВ, РАБОТАЮЩИХ БЕЗ СМАЗКИ [69]

Группа штулок	Внутренний диаметр штулки, мм	Расчетный диаметраль- ный зазор, мкм	Гарантированный зазор по посадке $\frac{A_3}{C_3} + S_1$ , мкм		
			минимал- ный	максимал- ный	средний
I	10—18	30	30	100	65
II	18—30	35	35	125	80
III	30—40	40	40	140	90
IV	40—50	45	45	145	95

работающего без смазки, необходимая минимальная величина зазора не обеспечивается гарантированными посадками. При недостаточной величине зазора и нагреве подшипника вследствие трения может произойти заклинивание вала (заедание), при излишне же больших зазорах уменьшается площадь контакта, что увеличивает фактические удельные давления и ускоряет износ поверхностного слоя фторопласта с наполнителем.

**Вкладыши разъемных подшипников.** Полуваклядыши подшипников ВНИИЛТЕКМАШ рекомендует изготавливать способом, применяемым для изготовления биметаллических полуваклядышей коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания. Основой этого процесса является операция гибки с последующей осадкой полуваклядыша в торцы (подпрессовкой кромок) [56, 57]. После этого необходимо одновременное калибрование двух спаренных вкладышей с помощью цилиндрического пуансона и фильеры. При этой операции осуществляется утонение стенок в первую очередь на участках, на которых толщина увеличилась при осадке в торцы.

Полуваклядыши подшипников из ленточных биметаллов штампуются практически за две операции [56, 57]. Первая из них, обычный упруго-пластический гиб, не обеспечивает получение нужных точных размеров и хорошего прилегания к постели вкладыша. Это осуществляется второй операцией — осадкой в торцы, вследствие которой вкладыш приобретает размеры матрицы. При этой операции на напряжения от упруго-пластического изгиба накладываются сжимающие напряжения и при распространении пластической деформации сжатия по всему периметру полуваклядыша материал плотно прилегает к поверхности матрицы, пружинение от изгиба устраняется и тыльная сторона вкладыша получается готовой, не требующей последующей механической обработки.

Схема штампа показана на рис. 40. Матрица 2, укрепленная в верхней плите штампа, при ходе вниз наталкивается на лежащую на коромыслах 1 плоскую биметаллическую заготовку 3, поворачивает коромысла и огибает заготовку относительно верхней секции 4

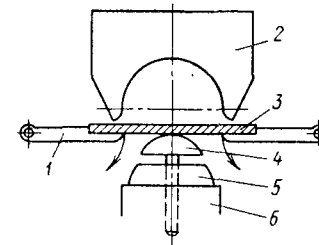


Рис. 40. Схема штампа для штамповки полуваклядышей

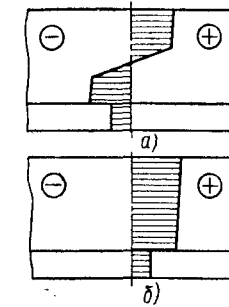


Рис. 41. Напряжения в поперечном сечении металлофторопластового материала:

а — при простом упруго-пластическом гibe; б — при гibe с растяжением

пуансона, приподнятой над нижней секцией 5 давлением маркета. Величина давления маркета должна быть не меньше усилия, необходимого для гибки, так как в противном случае верхняя секция пуансона преждевременно опустится, концы заготовки попадут между матрицей и державкой 6 и будут обрублены. После окончания гибки (концы заготовки при этом соскальзывают с коромысел) матрица, продолжая движение вниз, преодолевает давление маркета и заставляет опускаться уже изогнутую заготовку вместе с верхней секцией пуансона. Торцы заготовки при этом упрутся в горизонтальные участки державки 6, и происходит осадка заготовки в торцы, в процессе которой пластическая деформация сжатия распространяется по периметру.

Применяющийся метод штамповки полуваклядышей имеет следующий недостаток. При осаживании в торец пластическая деформация сжатия распространяется вдоль заготовки неравномерно (из-за наличия сил трения тыльной стороны полуваклядыша о матрицу и торцов о поверхность пуансонов). Вследствие этого происходит неравномерное утолщение заготовки, а следовательно, и стальной ее основы. Описанный метод по этой причине не пригоден для изготовления полуваклядышей из металлофторопластовой ленты, так как она не допускает какой-либо механической обработки резанием рабочей поверхности (нельзя повреждать тонкий поверхностный приработочный слой).

Для устранения указанных выше ограничений применяемого метода штамповки можно рекомендовать способ изготовления полуваклядышей, основанный на совмещении изгиба с растяжением (рис. 41). При этом неравномерное напряженное состояние, характерное для упруго-пластического изгиба, переходит в напряженное состояние растяжения и при снятии нагрузки упругое пружинение полуваклядыша практически не имеет места. Благодаря последовательности процесса формоизменения и постоянству действующих в очаге деформаций усилий, неравномерного по

длине полувкладыша изменения толщины не происходит. Если толщина исходной ленты выдержана в очень узких пределах (что может быть достигнуто тщательным калиброванием ленты прокаткой), то отклонения от номинальной толщины у изготовленного таким способом полувкладыша могут удовлетворять требованиям, предъявляемым к готовому изделию. Таким образом, рассматриваемый способ изготовления полувкладышей обеспечивает получение в готовом виде рабочей и тыльной поверхностей, не требующих дальнейшей механической обработки.

Схема процесса изготовления полувкладышей из ленты приведена на рис. 42. Конец ленты 1, загнутый по радиусу полувкладыша на  $90^\circ$  (рис. 42, а), прижимается (рис. 42, б) к цилиндрическому пуансону 2, имеющему диаметр, соответствующий внутреннему диаметру подшипника. Затем пуансон поворачивается (рис. 42, в) на угол, несколько превышающий  $180^\circ$ . (Величина этого превышения определяется толщиной фрезы или пуансона, отделяющих готовый полувкладыш). К ленте, свободно подаваемой к пуансону, в процессе огибания пуансона при помощи специального устройства прикладывается постоянно действующее усилие  $P$ , обеспечивающее перевод напряженного состояния в очаге деформации из характерного для упругопластического изгиба в пластическое растяжение (см. рис. 41). Усилие  $P$  в зависимости от толщины, ширины и механических свойств ленты должно быть подобрано таким, чтобы остаточные деформации растяжения во внутренних слоях заготовки были минимальными. После завершения операции изгиба полувкладыш отделяется от ленты фрезой 3 или отрезным пуансоном (рис. 42, г), давление прижима ленты к пуансону снимается и пуансон поворачивается в исходное положение (рис. 42, д). На ленте остается необходимый для осуществления прижима к пуансону при следующей операциигиба (рис. 42, е) загнутый на  $90^\circ$  участок. Далее процедура многократно повторяется до использования всей ленты, которая может подаваться в приспособление в виде бунта или отдельных полос.

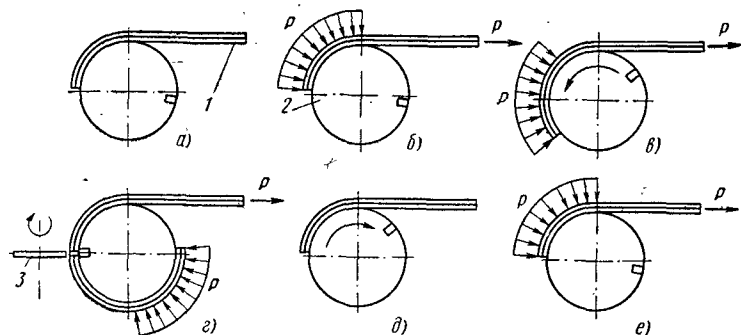


Рис. 42. Схема штамповки полувкладышей из металлофторопластовой ленты

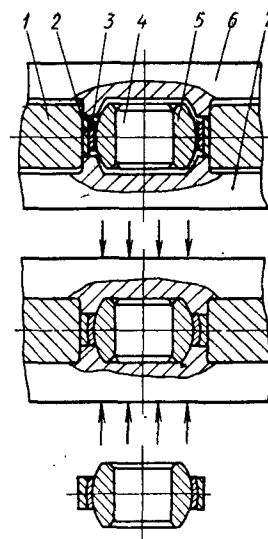


Рис. 43. Схема изготовления неразъемных шарнирных сферических подшипников (деформация вдоль оси):

1 — заготовка подшипника, собранная в штампе; II — процесс деформации наружного кольца; III — готовый подшипник

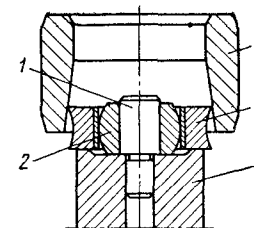


Рис. 44. Схема приспособления для изготовления неразъемных шарнирных сферических подшипников (деформация в радиальном направлении)

В отходы при таком способе изготовления полувкладышей идет на каждое изделие лишь незначительное количество металла, удаляемого в процессе отделения готового полувкладыша от ленты.

**Шарнирные сферические подшипники.** Обычные шарнирные подшипники представляют собой подшипники скольжения со сферической

опорной поверхностью. Состоят они из наружного и внутреннего колец, изготавливаемых из одинаковой стали с высокой твердостью (ШХ15, 9Х18). Подшипники предназначены для работы при высоких удельных нагрузках (до  $25 \text{ кгс/мм}^2$ ) и низких скоростях скольжения, т. е. при условиях, неблагоприятных для выполнения вводимыми смазками своих функций. В процессе эксплуатации таких подшипников часто наблюдается схватывание поверхностей трения, а также фреттинг-коррозия (особенно при вибрации или при качательном движении с малой амплитудой).

Эти недостатки можно легко устранить применением металлофторопластовых шарнирных подшипников скольжения, способных работать без смазки. В настоящее время разработано несколько вариантов технологического процесса изготовления таких подшипников. Ниже будут описаны два из них.

Первый процесс [44, 54] предусматривает в качестве исходного сырья металлофторопластовую ленту по ТУ-27-01-01—71, выпускаемую Климовским машиностроительным заводом. Из ленты изготавливают свертную втулку 3 (рис. 43) с внутренним диаметром, равным диаметру сферы внутреннего стального кольца подшипника 5. Для того чтобы обеспечить в готовом подшипнике

необходимый зазор, во внутреннее кольцо его, изготовленное из закаленной стали и не имеющее лысок и канавок, впрессовывается с заданным натягом стальной закаленный стержень 4. В трубчатую заготовку 2 наружного кольца подшипника, изготавливаемую из незакаленной хорошо обрабатываемой давлением стали, вставляется свертная втулка 3 из металлофторопластовой ленты, а затем внутреннее кольцо с запрессованным в него стержнем. Собранный таким образом заготовка подшипника помещается в матрицу 1 специального штампа и производится осаживание наружного кольца и металлофторопластовой втулки по торцам двумя кольцевыми пуансонами 6 и 7. В процессе осадки металл наружного кольца и втулки заполняет свободное пространство между сферической поверхностью внутреннего кольца и исходной цилиндрической поверхностью свертной металлофторопластовой втулки. Металлофторопластовый антифрикционный слой при этом плотно прижимается к сферической поверхности внутреннего кольца. Матрица при этом играет роль калибрующего кольца, обеспечивая необходимые размер и качество поверхности внешней посадочной поверхности наружного кольца подшипника. Затем подшипник выпрессовывается из матрицы, а стержень — из внутреннего кольца подшипника.

Для снижения износа шарнирных подшипников из металлофторопластовой ленты рабочую поверхность вкладышей до обжатия подвергали упрочняющей обработке специальными разглаживающе-упрочняющими протяжками [44]. Предварительно на металлофторопластовой ленте снимали приработочный слой и незначительную часть гранул бронзы (самые верхушки). Натяг при протягивании составлял 0,08 мм. Износ изготовленных из прошедших такую обработку втулок шарнирных подшипников ШАН-12 на базе 10 000 дв. ходов ( $p = 2 \text{ кгс/мм}^2$ ,  $V = 0,1 \text{ м/с}$ ) оказался в 3,5 раза ниже, чем у подшипников с полностью сохраненным приработочным слоем.

Для изготовления шарнирных сферических подшипников с неразрезной металлофторопластовой втулкой можно применять индивидуально изготавливаемые трубчатые втулки.

Возможен также и другой способ изготовления неразъемных шарнирных сферических подшипников (разработан Р. Б. Большаковым, Н. Н. Головачевым, П. Т. Сулаевым, Ю. С. Щетининым), основанный не на сжатии наружного кольца вдоль оси, а на обжатии его в радиальном направлении при проталкивании через калибрующую матрицу (рис. 44). Как и в описанном выше способе, для обеспечения необходимого зазора в подшипнике во внутреннее кольцо 2 со сферической рабочей поверхностью, изготовленное из закаленной стали, впрессовывается с заданным натягом закаленный стальной стержень 1. Стержень с кольцом помещают на оправку (или пуансон) 3. На внутреннее кольцо подшипника надевают металлофторопластовую неразрезную заготовку 4 наружного кольца подшипника. Диаметр внутреннего цилиндрического

отверстия этой заготовки, покрытого бронзофторопластовым слоем, равен диаметру сферы внутреннего кольца. Наружная поверхность заготовки представляет собой поверхность вращения сложной формы, рассчитанной или подобранной таким образом, чтобы при обжатии в радиальном направлении внутренняя антифрикционная поверхность приняла форму сферы (соответствующей сферической рабочей поверхности внутреннего кольца), а наружная — цилиндра. Заготовка обжимается при проталкивании собранного полуфабриката подшипника на пуансоне 3 через матрицу (или фильеру) 5. После операции деформирования подшипник со стержнем снимаются с пуансона, стержень выпрессовывается из внутреннего кольца подшипника и на наружном кольце снимаются фаски.

Описанные выше способы приводят к одному и тому же результату — получению неразъемных металлофторопластовых шарнирных подшипников скольжения. Однако схема деформации и напряженное состояние в процессе деформирования различны. Это должно приводить к различному упругому восстановлению формы при снятии деформирующей силы (что, в свою очередь, сказывается на величине и равномерности зазора), и к различным остаточным напряжениям, могущим сказаться на изменении величины зазора, особенно при работе подшипников при повышенных температурах.

## ГЛАВА V

### Служебные свойства металлофторопластовых подшипников при колебательном движении

#### 1. Общие сведения об условиях работы

Одно из первых применений металлофторопластовых подшипников в СССР связано с их использованием в шарнирных соединениях авиационных конструкций, в частности, в шарнирах несущей системы вертолета. По насыщенности узлами трения, работающими в режиме колебательного движения под воздействием высоких статических и динамических нагрузок, несущая система вертолета является уникальным инженерным устройством. Механическая сложность этой системы является следствием многообразия функций, выполняемых ею. Несущий винт вертолета создает подъемную силу, подобно тому как на самолете ее создает крыло; он также является движителем, роль которого на самолете выполняет тянущий винт или реактивный двигатель; наконец, несущий винт обеспечивает силы и моменты, необходимые для управления движением летательного аппарата. По условиям устойчивости, управляемости и динамической прочности лопасти несущего винта обычно крепят к валу при помощи так называемых горизонтального, вертикального и осевого шарниров, как показано на рис. 45. Горизонтальный 4 и вертикальный 1 шарниры позволяют лопасти 2 совершать свободные маховые движения соответственно в плоскостях тяги и вращения несущего винта, а осевой шарнир 3 служит для управления углом установки лопасти. Принудительное колебательное движение осевому шарниру сообщается посредством кинематической системы, включающей в себя качалки, тяги и автоматы-перекося, служащие для передачи управляющих движений между вращающимися относительно друг друга агрегатами.

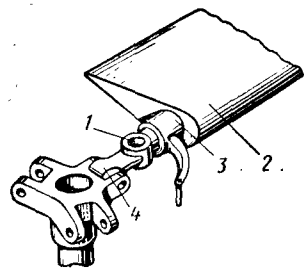


Рис. 45. Схема крепления лопасти к втулке несущего винта

Некоторое представление о конструкции несущей системы вертолета можно получить по рис. 46, на котором изображена несущая система серийного вертолета Ка-26 конструкции Н. И. Камова. Она состоит из двух трехлопастных несущих винтов, вращающихся в противоположных направ-

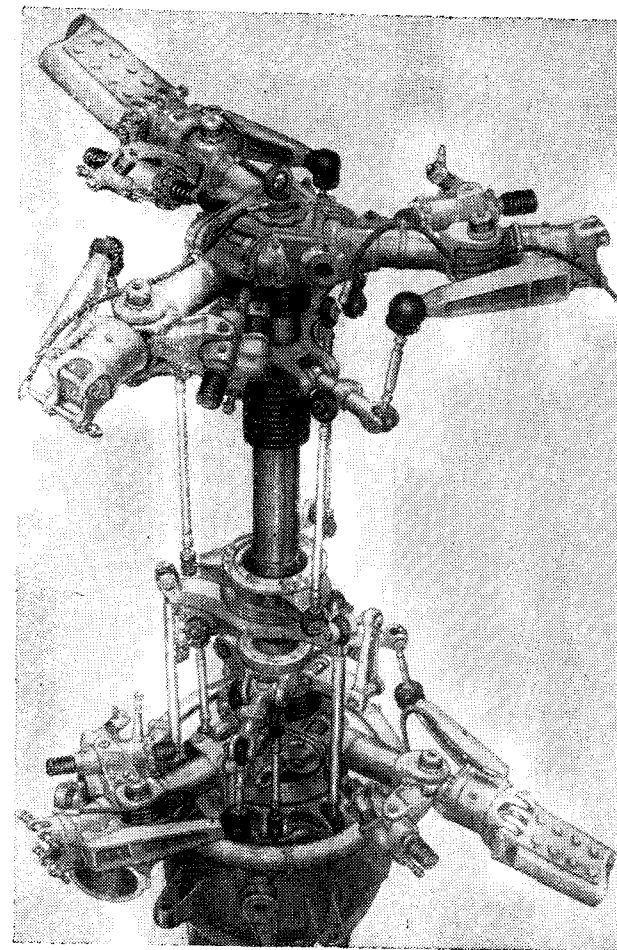


Рис. 46. Несущая система вертолета

лениях. Шесть лопастей крепятся к валам с помощью 18 шарниров. Еще 12 шарниров служат для крепления шести гидравлических демпферов, тормозящих движение лопастей относительно вертикальных шарниров. Управление осевыми шарнирами состоит из двух автоматов-перекося, двух ползушек с шестью парами качалок, механизма общего и дифференциального шага (на рисунке не показан) и значительного числа шарнирно опертых тяг. В режиме колебательного движения работают также шлиц-шарниры, соединяющие ступицы валов с ползушками и автоматами-перекося, узлы подвески автоматов-перекося и некоторые другие элементы. Для обеспечения подвижности указанных соединений требуется до 200 подшипников и более.

Качательное или возвратно-поступательное движение перемещенных шарнирных соединений происходит с основной частотой, равной 4—6 Гц (определяется частотой вращения несущих винтов; имеются также незначительные наложения движений с более высокими частотами). Для большинства шарниров, в том числе, горизонтальных и осевых, типичная амплитуда качаний лежит в диапазоне значений  $\alpha = 2\text{--}6^\circ$ . Исключение составляет вертикальный шарнир, движение относительно которого происходит с угловой амплитудой порядка  $0^\circ 10'\text{--}0^\circ 30'$  и обычно не превышает  $1^\circ$ . Для шарниров крепления лопасти к валу характерными являются высокие статические удельные нагрузки ( $p = 300\text{--}400 \text{ кгс/см}^2$ ), действующие на подшипники, поскольку эти шарниры воспринимают центробежные силы, развиваемые лопастями при их вращении. Соответственно, для горизонтального и осевого шарниров величина произведения удельной нагрузки на амплитудное значение скорости скольжения достигает  $15\text{--}20 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ . Среднее эксплуатационное значение  $pV$  подшипников вертикального шарнира обычно не превышает  $1,5 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ . Шарниры системы управления лопастями (кроме осевых шарниров) работают под воздействием значительных динамических нагрузок (удельная нагрузка на подшипники до  $100 \pm 100 \text{ кгс/см}^2$ ) с угловой амплитудой качаний  $2\text{--}3^\circ$ . Амплитудные значения произведения удельной нагрузки на скорость скольжения подшипников этих шарниров имеют порядок  $1\text{--}2 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ .

Использование в передающих колебательное движение сопряжениях несущей системы подшипников качения и шарнирных подшипников типа ШС связано с необходимостью введения в конструкцию многочисленных смазочных устройств и герметизирующих уплотнений. Смазочные канавки и резьбовые отверстия для масленок в силовых деталях, являясь концентраторами напряжений, существенно снижают усталостную прочность конструкции, а неисправности масленок и засорения маслопроводных отверстий понижают ее эксплуатационную надежность. Склонность подшипников качения, работающих в колебательном режиме при небольших относительных смещениях тел качения, к развитию в них явлений фреттинг-коррозии и ложного бринеллирования вынуждает увеличивать их размеры, а стало быть, и массу шарниров. Во многих шарнирных соединениях несущей системы определенный уровень сил трения выполняет полезную роль. Так, трение в вертикальных шарнирах необходимо для обеспечения устойчивости вертолета по отношению к инерционным автоколебаниям типа «земной резонанс». Трение в осевом шарнире и в шарнирах системы управления лопастями повышает запас устойчивости несущего винта от аэродинамических автоколебаний типа «флаттер». По указанным причинам применение в шарнирах несущей системы вертолета, а также в шарнирах ряда других систем, выдерживающих большие удельные нагрузки, не требующих

смазки и обладающих высокими демпфирующими свойствами металлофторопластовых подшипников во многих случаях может оказаться целесообразным [45, 46, 47].

Для исследования служебных свойств металлофторопластовых подшипников применительно к тяжелонагруженным узлам трения колебательного движения было освоено индивидуальное производство этих подшипников по технологии, основы которой разработаны в Государственном научно-исследовательском Институте машиноведения. Несколько позднее на базе этих разработок было налажено производство свертных металлофторопластовых втулок на Климовском машиностроительном заводе. Здесь в основном приведены полученные нами результаты исследования металлофторопластовых подшипников индивидуального производства. (В проведении экспериментов творческое участие принимали инженеры В. С. Альтфельд и Н. Г. Демин).

## 2. Конструкции узлов трения, строение и прочностные свойства металлофторопластового материала

**Конструкция.** Используемые в качестве радиальных подшипников неразрезные цилиндрические втулки имеют внутреннюю или наружную рабочую поверхность или внутреннюю и наружную рабочие поверхности. Втулки с внутренней рабочей поверхностью, работающие в режиме качательного движения со значительными угловыми амплитудами (до  $15^\circ$ ) устанавливаются в корпус по пресовой посадке. В остальных случаях втулки устанавливаются в корпус или на вал с зазором, причем устройств, предотвращающих проворачивание подшипника относительно корпуса или вала, не предусматривается. Испытывавшиеся втулки имели минимальные размеры  $D \times d \times l = 13 \times 10 \times 10 \text{ мм}$  и максимальные —  $78 \times 70 \times 100 \text{ мм}$  и величину диаметрального зазора между рабочими поверхностями в пределах  $0,03\text{--}0,07 \text{ мм}$ . Эллипсность и конусность подшипников не превышали  $0,02 \text{ мм}$ . Сопряженные детали изготавливали из легированных сталей 30ХГСА и 12ХН3А и подвергали термической обработке до твердости HRC 40—60, а их рабочие поверхности, как правило, шлифовали.

Используемые в качестве подпятников плоские шайбы имеют рабочую поверхность с одной или с обеих сторон. Для испытаний на лабораторной установке использовали шайбы с одной рабочей поверхностью, при этом их устанавливали в соответствующее приспособление с натягом, предотвращающим проворачивание. В натурных узлах применяются плавающие шайбы, имеющие рабочую поверхность с обеих сторон. Испытывавшиеся шайбы имели минимальные размеры  $D \times d \times h = 10 \times 6 \times 2 \text{ мм}$  и максимальные  $118 \times 75 \times 2 \text{ мм}$ . Сопряженные детали изготавливали в основном из легированных сталей 30ХГСА или ШХ15, термически обрабатывали до твердости HRC 40—60, а их рабочие поверхности полировали.

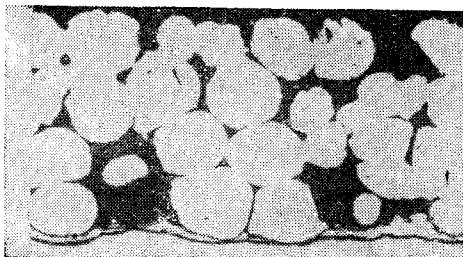


Рис. 47. Поперечное сечение металлофторопластового материала (микрошлиф  $\times 100$ )

Шарнирные неразборные подшипники на внутренней сферической поверхности наружного кольца имели рабочий

антифрикционный слой. Внутреннее кольцо было изготовлено из стали ШХ15, термически обработано до твердости HRC 60, а его рабочая поверхность полирована. Испытывавшиеся шарнирные подшипники имели размеры отверстия под болт диаметром 20 мм.

**Строение материала.** Поперечное сечение материала показано на рис. 47. Его структуру можно представить состоящей из четырех слоев. Первый слой, условно называемый приработочным, состоит из фторопласта, наполненного мелкодисперсным (3—7 мкм) дисульфидом молибдена. Содержание дисульфида молибдена по массе составляет 25%, кроме некоторых, специально оговариваемых случаев, когда оно равно 25% по объему, как это имеет место в подшипниках производства Климовского машиностроительного завода. Для некоторых применений, когда трение подшипника должно быть возможно меньшим, а допустимая величина линейного износа достаточно велика, приработочный слой утолщается ( $\delta = 0,1 \div 0,2$  мм) и становится основным рабочим слоем. Обычно толщина приработочного слоя лежит в пределах 0,01—0,04 мм. Если от подшипника требуется, чтобы он обеспечил повышенное трение уже в самом начале работы, то толщина приработочного слоя выдерживается в пределах 0,05—0,02 мм.

Второй, бронзофторопластовый слой представляет собой как бы два вставленных один в другой губчатых слоя бронзы и наполненного фторопласта. Пористый металлический каркас образован спеканием сферических частиц высокооловянной бронзы. Бронзофторопластовый слой по высоте неоднороден. В нем можно выделить три зоны, различающиеся величиной относительной площади, занимаемой бронзовыми частицами в продольных сечениях. Первая зона характеризуется увеличением этой площади от нуля до наибольшего значения, равного 80%, достигаемого при изнашивании бронзофторопластового слоя на глубину 0,1 мм. Во второй зоне структура бронзофторопластового слоя соответствует наибольшей плотности бронзовых частиц. Наконец, в третьей зоне бронзофторопластового слоя (зона соединения с основой) относительная площадь, занимаемая бронзовыми частицами, уменьшается до некоторого минимального значения (рис. 48).

Третий, меднооловянный слой, имеет толщину порядка 0,015—0,02 мм. Этот слой обеспечивает прочное сцепление бронзового

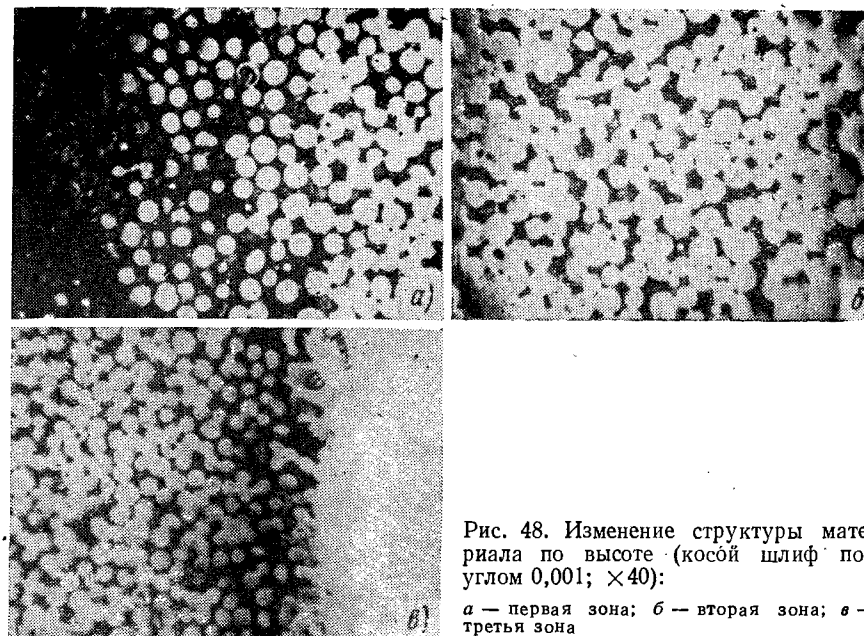


Рис. 48. Изменение структуры материала по высоте (косой шлиф под углом 0,001;  $\times 40$ ):

а — первая зона; б — вторая зона; в — третья зона

пористого слоя со стальной основой, которая является четвертым слоем. Стальная основа образуется сталью 20, а ее толщина находится в пределах 1—4 мм.

**Прочность и деформационные характеристики материала.** Прочностные и деформационные характеристики металлофторопластового материала исследовали на образцах и натурных подшипниках в процессе действия на них близких к предельным статических и максимально возможных в эксплуатации вибрационных нагрузок.

Изучали изменение структуры бронзового каркаса, а также определяли упругие и остаточные деформации материала при статическом сжатии металлофторопластовых шайб, имеющих рабочую поверхность на обеих сторонах, между твердыми параллельными плитами. Шайбы размерами  $D \times d \times h = 35 \times 24,1 \times 1,8$  мм, нагружали на установках типа ЦДМУ-10т и ЦДМ-200т (изготовления фирмы «ФЕБ» г. Лейпциг) с гидравлическим приводом, обеспечивающим высокую точность задаваемой нагрузки (погрешность не более 2%). Зависимость деформации материала от величины давления определяли при сжатии пакета, состоящего из шести металлофторопластовых и пяти промежуточных стальных шайб толщиной 1 мм каждая. Остаточные деформации определяли сжатием одиночных шайб при давлениях от 200 до 10 000 кгс/см<sup>2</sup>. Относительную деформацию принимали равной отношению абсолютной деформации к суммарной толщине бронзофторопластовых слоев, которая в пакете составляла 4,8 мм, а в одиночной шайбе



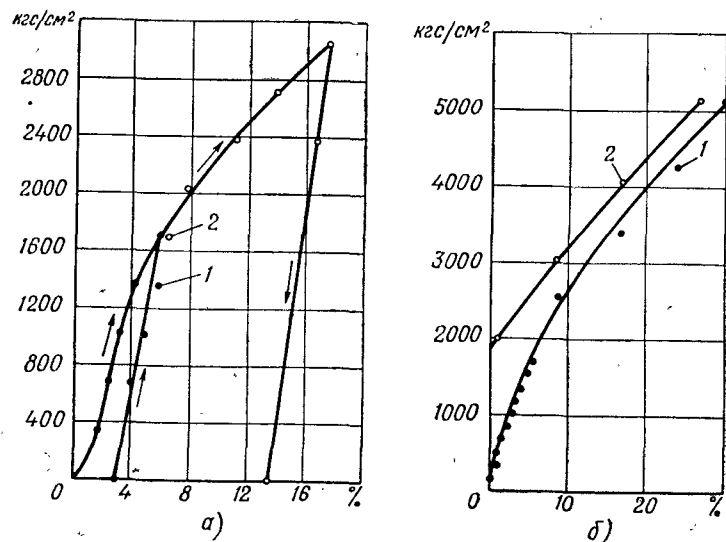


Рис. 49. Деформационные характеристики материала:

а — зависимость относительной деформации некалиброванного материала от давления сжатия (1 — первый цикл нагружения — разгрузки; 2 — второй цикл); б — зависимость остаточной деформации от давления сжатия (1 — некалиброванный материал; 2 — калиброванный давлением 2000 кгс/см²)

0,8 мм. Полученные зависимости общих относительных деформаций и остаточных относительных деформаций от величины давления сжатия приведены на рис. 49.

На рис. 50 показаны изменения структуры материала, происходящие при воздействии различной по величине сжимающей нагрузки. Сжатие некалиброванного предварительно металлофторопластового материала приводит к появлению в нем остаточных деформаций уже при давлении 200 кгс/см². Выше 2500 кгс/см² начинает деформироваться и стальная основа. При давлении 5000 кгс/см² остаточная деформация достигает 30%, причем увеличение числа циклов нагружения доводит величину остаточной деформации до 45%. Предварительное калибрование материала под давлением 2000 кгс/см² резко уменьшает величину остаточных деформаций при давлениях, меньших давления калибрования. Существенные нарушения структуры бронзового каркаса наблюдаются при давлениях 3500 кгс/см². При давлении 7000—10 000 кгс/см² бронзовый пористый слой полностью сплющивается и несколько «стекает» со стальной основы, образуя реборды по наружному и внутреннему диаметрам шайбы.

Испытания на выносливость металлофторопластовых шайб при действии на них переменного по величине сжатия производили на установке ЦДМ ПУ-10т (производства той же фирмы). При этом на статическое давление, равное 1200 кгс/см², накладывалась вибрационная составляющая с амплитудой 700 кгс/см² и частотой

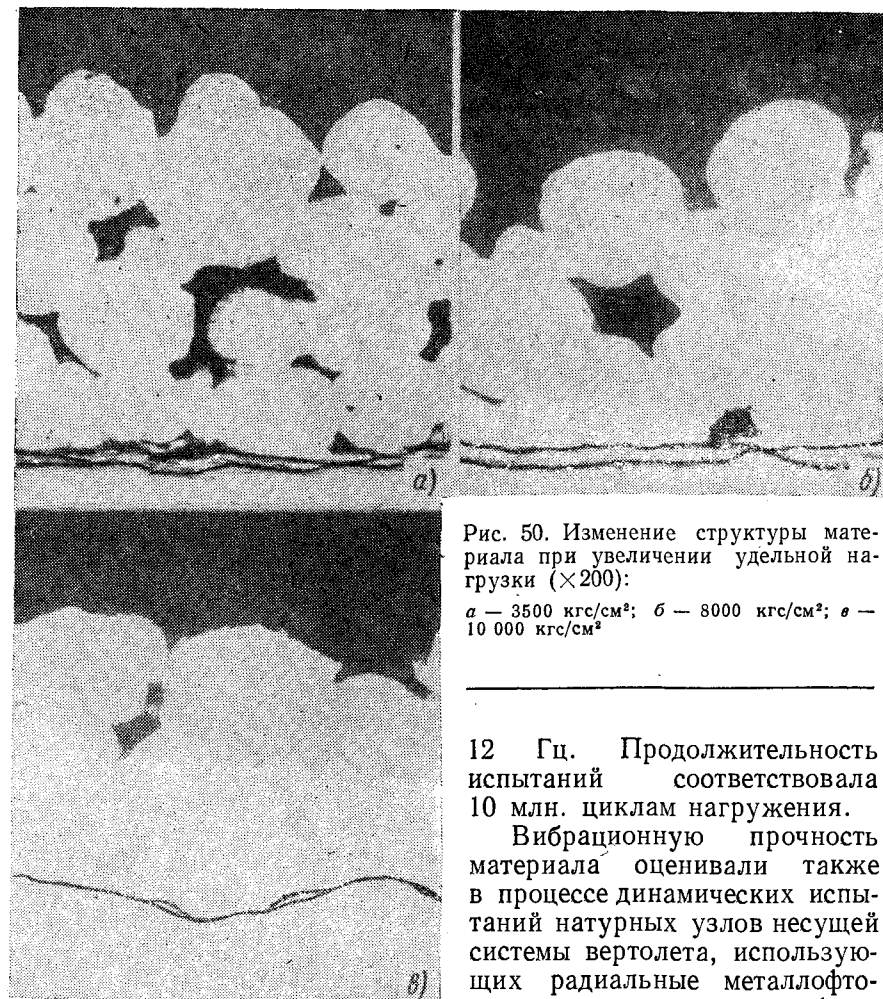


Рис. 50. Изменение структуры материала при увеличении удельной нагрузки ( $\times 200$ ):

а — 3500 кгс/см²; б — 8000 кгс/см²; в — 10 000 кгс/см²

12 Гц. Продолжительность испытаний соответствовала 10 млн. циклам нагружения.

Вибрационную прочность материала оценивали также в процессе динамических испытаний натурных узлов несущей системы вертолета, использующих радиальные металлофторопластовые подшипники больших размеров, при воздействии

максимально возможных в эксплуатации переменных нагрузок (значения статической и переменной составляющих удельной нагрузки, соответственно, 400 и 200 кгс/см², частота нагружения 25 Гц, база испытаний 10 млн. циклов). При указанных испытаниях вибрационное нагружение подшипников радиальным усилием сочеталось с трением при колебательном перемещении их рабочих поверхностей относительно сопряженных деталей.

Во всех случаях структура подвергнутых вибрационному нагружению металлофторопластовых шайб и втулок не претерпевала заметных или сколько-нибудь значительных изменений, а прочность сцепления бронзового слоя со стальной основой полностью сохранялась.



Результаты проведенных испытаний дают основание для следующих выводов: в процессе производства необходимо калибровать металлофторопластовые подшипники под давлением порядка 2000 кгс/см<sup>2</sup>; действительные удельные нагрузки, действующие на подшипники при эксплуатации, не должны превышать 3500 кгс/см<sup>2</sup>; по условиям усталостной прочности применение металлофторопластовых подшипников практически не имеет ограничений.

### 3. Лабораторные установки и стенды для испытаний на трение и изнашивание

Лабораторная установка торцового трения (рис. 51) позволяет проводить испытание на износостойкость образца в виде шайбы или диска с одной рабочей поверхностью в условиях статического нагружения усилием до 500 кгс при возвратно-вращательном движении с частотой 14,6 Гц и угловой амплитудой до  $\alpha = 0,05$  (3°). Нагружение пары трения в виде металлофторопластового 2 и стального 3 образцов создается вращением гайки 6 на винте 7, при котором гайка, перемещаясь вниз, сжимает тарированную пружину 4. Усилие, возникающее при сжатии пружины, передается корпусу 10 толкателя 9, скользящего внутри винта 7, и далее, через опору 12 со сферической поверхностью, испытываемому узлу. Опора 12 прижимается к корпусу толкателя крышкой 11, стальной образец фиксируется в шарнире штифтом. О величине перемещения гайки, а стало быть, о величине усилия, развиваемого пружиной, можно судить по перемещению

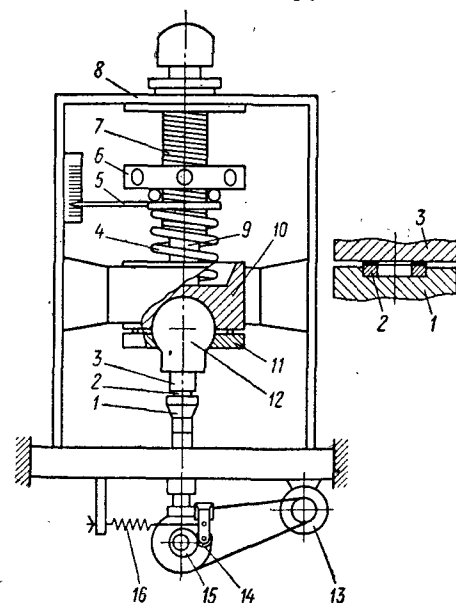


Рис. 51. Схема установки торцового трения

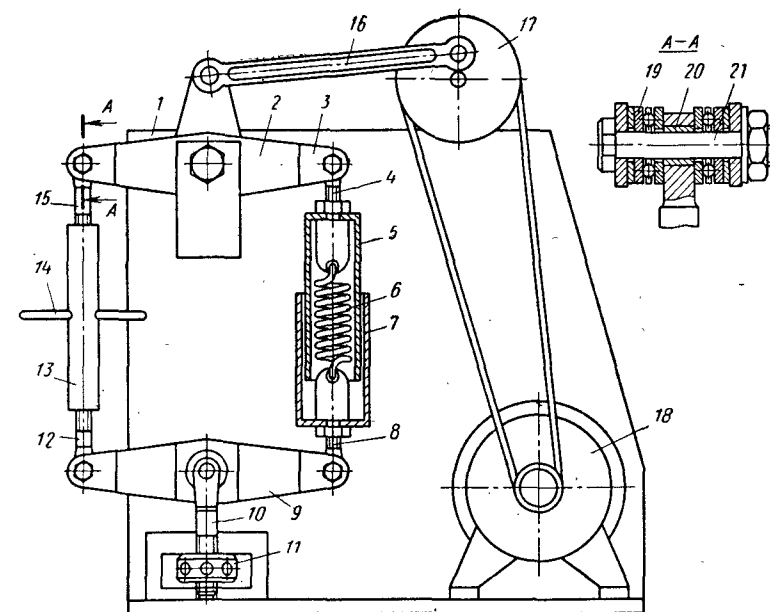


Рис. 52. Четырехпозиционная установка качательного движения

усилие прижимной пружины 16 становится недостаточным и не обеспечивает постоянный контакт ролика 14 с эксцентриком 15.

Четырехпозиционная лабораторная установка для испытания подшипников при качательном движении (рис. 52), спроектированная при участии Р. Б. Большакова и П. А. Коваленко, предназначена для испытания на износостойкость радиальных или шарнирных подшипников в условиях статического нагружения усилием до 100 кгс при качательном движении в одной плоскости с частотой до 10 Гц и угловой амплитудой до  $\alpha = 0,34$  (20°). Основу установки составляет параллелограмный механизм, образованный качалками 2 и 9 с проушинами 3, которые соединены одной тендерной и одной пружинной тягами. Качалка 2 установлена на станине 1 шарнирно, в то время, как шарнирной опорой качалки 9 служит подшипниковый узел тяги 10, которая перемещается в направляющих станины вращением гайки 11.

Тендерная тяга образована резьбовыми наконечниками 12 и 15 с разным направлением резьбы, которые ввинчиваются в полый стержень 13 с рукояткой 14. Пружинная тяга составлена стаканами 5 и 7, резьбовыми наконечниками 4 и 8 и пружиной 6. Качательное движение сообщается качалке 2 от эксцентрика 17, который приводится во вращение электродвигателем 18. Испытываемые подшипники 20 запрессованы в каждый из четырех резьбовых наконечников, сопряженными деталями служат

болты 21, шариковые упорные подшипники 19 центрируют узел трения относительно качалки.

При сборке параллелограммного механизма вначале верхняя и нижняя качалки соединяются пружинной тягой, а шарнирную опору нижней качалки перемещают в положение, при котором будет обеспечена требуемая величина усилия в пружине. Затем устанавливают тендерную тягу, длину которой предварительно соответствующим образом подбирают. Вращением стержня 13 тендерное устройство укорачивают до размера, при котором достигается взаимная параллельность противоположных звеньев параллелограммного механизма.

Усилие, возникающее в пружине 6, полностью определяется ее упругостью и расстоянием между качалками. Поскольку в процессе работы установки эти параметры не изменяются, остается постоянной и усилие пружины, независимо от частоты и амплитуды качаний.

Выбранная кинематика установки позволяет проводить одновременно испытание четырех пар трения в практически одинаковых условиях.

Стенд для испытания на износостойкость радиальных подшипников (рис. 53) использовали в условиях статического нагружения при качательном движении с частотой до 6 Гц и угловой амплитудой до  $\alpha = 0,087$  ( $5^\circ$ ). Применяли две модификации стенда: один стенд, предназначенный для испытания радиальных подшипников с диаметром не более 40 мм, рассчитан на приложение радиальной нагрузки до 10 000 кгс; второй, предназначенный для испытания подшипников диаметром до 100 мм, позволяет довести величину радиальной нагрузки до 100 000 кгс. Узел трения образован втулкой 2, двумя испытываемыми подшипниками 3, и втулкой 4, запрессованной в натурную деталь 5, к которой прикладывается усилие в направлении, показанном на рисунке стрелкой. Втулка 2 соединена с валом 6 при помощи шпонки. Качательное движение сообщается валу рычагом 7, связанным с эксцентриком 10 тензометрической тягой 9. Вал 6 центрируется в станине 8 посредством двух радиально-упорных подшипников 1, имеющих размеры, значительно превышающие размеры испытываемых подшипников.

Роликовый стенд (рис. 54)\* предназначен для проведения испытания на трение радиальных подшипников в условиях статического нагружения при колебательном движении с частотой до 6 Гц и угловой амплитудой до  $\alpha = 0,087$ . Основными деталями стенда являются цилиндрические ролики 1 и 2, которые перекачиваются один по другому. Вал 11 верхнего ролика жестко закреплен в нагрузочном рычаге 3, а вал нижнего ролика жестко закреплен в станине 9. Усилие к рычагу 3 прикладывается через дина-

мометр 7 от винтового силовозбудителя 8. Качательное движение сообщается нижнему и фрикционно связанному с ним верхнему роликам кинематическим звеном, включающим в себя двигательный рычаг 4, тензометрическую тягу 5 и эксцентрик 6. Испытываемые подшипники 10, установленные на валах 11, размещаются

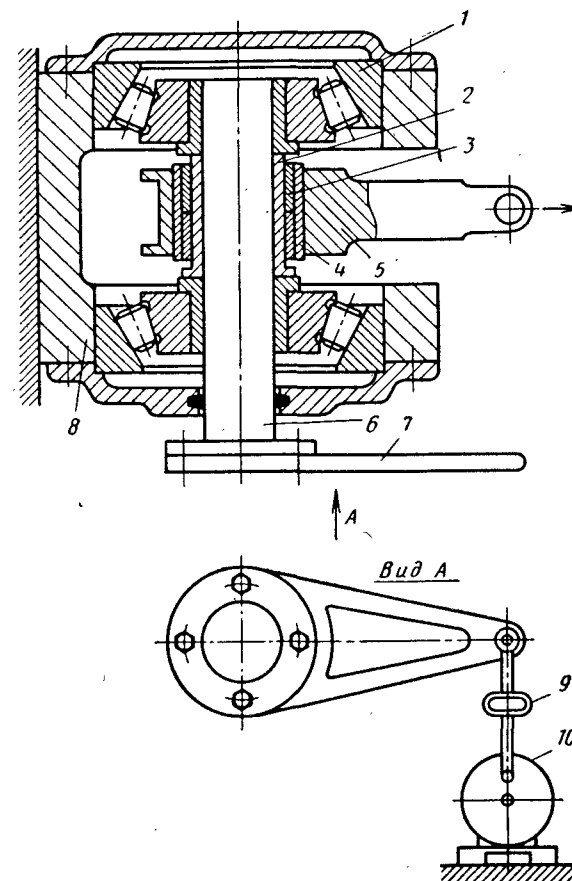


Рис. 53. Стенд для испытания радиальных подшипников

в центральных отверстиях роликов 1 и 2. Угловое смещение верхнего ролика измеряется устройством 12, основным элементом которого служит электропотенциометрический датчик. Термодатчики устанавливают в испытываемых подшипниках на расстоянии 1,5 мм от рабочей поверхности.

Стенд позволяет проводить испытания радиальных подшипников диаметром 50—90 мм и шириной не более 45 мм при нагрузке, не превышающей 15 000 кгс. Испытания дают осредненные характеристики трения двух подшипников, работающих в одинаковых

\* Альфельд В. С., Демин Н. Г., Савинский Ю. Э. Устройство для измерения трения подшипников скольжения. Авт. свид. № 363886, Бюллетень изобретений, 1973, № 4, с. 93.

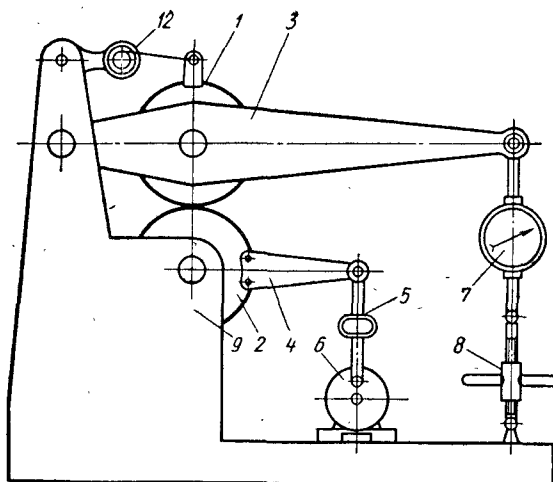


Рис. 54. Роликовый стенд

условиях. При испытании подшипника с повышенным коэффициентом трения целесообразно установить его только в нижний ролик с целью уменьшения погрешности, связанной с взаимным проскальзыванием роликов. При этом в верхний ролик устанавливают подшипник качения с известными характеристиками трения.

**Многопозиционная установка (рис. 55)** предназначена для проведения испытания на износ шарнирных подшипников, колебательное движение которых происходит в плоскости, перпендикулярной оси болта, сопряженного с внутренним кольцом подшипника, или в плоскости оси болта при воздействии переменной по величине или по величине и направлению радиальной нагрузки. Стенд позволяет проводить испытания одновременно четырех шарнирных подшипников с диаметром отверстия под болт, равным 20 мм, при качательном движении с частотой 4—6 Гц, угловой амплитудой до  $\alpha = 0,052$  ( $3^\circ$ ), и максимальной нагрузке, не превышающей 500 кгс.

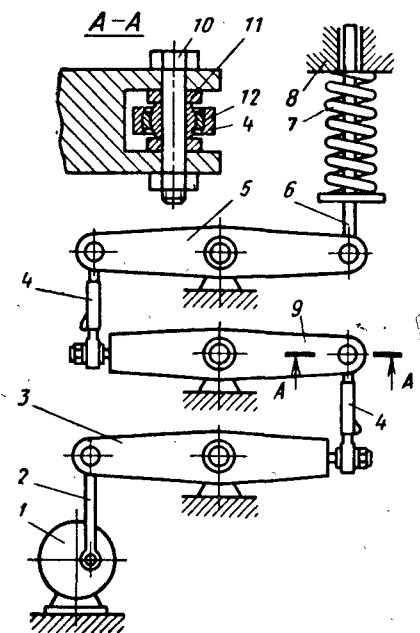


Рис. 55. Многопозиционная установка для испытания при динамическом нагружении

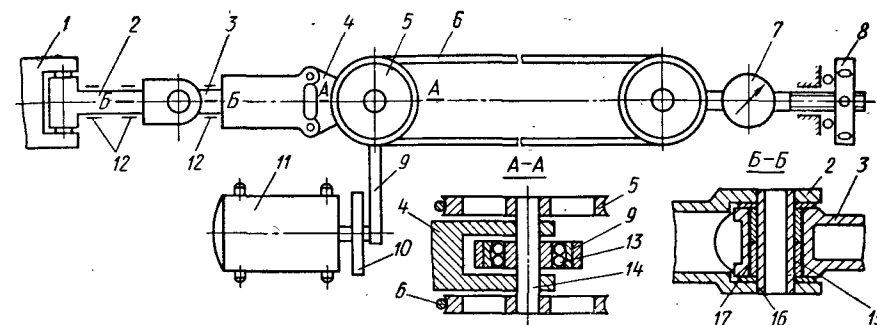


Рис. 56. Стенд вертикального шарнира несущего винта вертолета

Основой установки является кинематический механизм, образованный шарнирно прикрепленными к станине качалками 3, 5 и 9, которые зигзагообразно соединены между собой тягами 4. Испытываемые шарнирные подшипники 12 находятся в местах соединений тяг с качалками, которые с одной стороны заканчиваются валиками, имитирующими болты, а с другой стороны — проушинами качалок с болтами 10 и шайбами 11. Качательное движение сообщается устройству от эксцентрика 1 при помощи двигательного рычага 2; при этом тяга 6 перемещается в направляющих 8, а шайба, жестко установленная на тяге, периодически изменяет величину поджатия тарированной пружины 7. Величина динамической составляющей нагрузки пропорциональна жесткости пружины и амплитуде качаний. Статическая составляющая нагрузки регулируется изменением положения шайбы на тяге 6. При работе установки подшипники, установленные на болте качалки, перемещаются в плоскости его оси, а подшипники, установленные на противоположной стороне качалки — в перпендикулярной плоскости.

**Стенд вертикального шарнира несущего винта вертолета (рис. 56)** предназначен для испытаний на трение и износ подшипников, установленных в натурном узле трения вертикального шарнира втулки несущего винта вертолета, работающих в условиях колебательного движения с малыми угловыми амплитудами ( $\alpha \leq 0,02$ ) при высокой статической нагрузке. Втулка несущего винта 1 закрепляется на станине, а детали, служащие для прикрепления лопасти ко втулке, нагружаются растягивающей силой, имитирующей центробежную силу, развиваемую лопастью при вращении. Узел трения (вертикальный шарнир) образован проушинами детали 2, пальцем осевого шарнира 3, валиком 16, металлофторопластовыми втулками 15 и сопряженной с ними деталью в виде цилиндрической втулки 17. На детали 2 и пальце осевого шарнира наклеены тензодатчики 12, протарированные на изгиб в плоскости колебаний. Усилие от винтового (или гидравлического) силовозбудителя 8 через динамометр 7 передается на

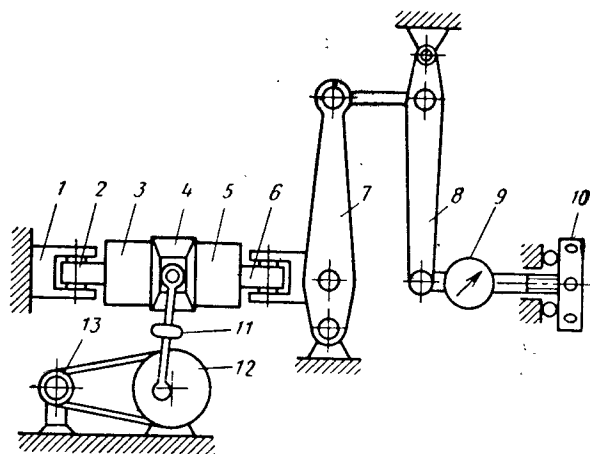


Рис. 57. Стенд осевого шарнира втулки несущего винта вертолета

испытываемое сочленение посредством тросов 6 на шкивах 5. Эксцентрик 10, приводимый во вращение электродвигателем 11, через тягу 9 воздействует на шарнирный узел переходной детали 4, возбуждая качательное движение деталей, находящихся правее вертикального шарнира, относительно его оси. Соединение двигателя рычага с валиком 14 выполнено с помощью сферического шарикоподшипника 13, который позволяет шарнирному узлу приспосабливаться к перекосам, возникающим в нем в процессе колебаний. При работе стенда производится измерение изгибающих моментов, действующих в плоскости колебаний деталей втулки по обе стороны вертикального шарнира. Величина момента трения вертикального шарнира определяется интерполяцией значений изгибающих моментов в момент прохождения колеблющимися деталями нейтрального положения, когда скорость скольжения наибольшая. Стенд позволяет проводить испытания подшипников при величине нагрузки до 100 000 кгс.

Стенд осевого шарнира втулки несущего винта вертолета (рис. 57) предназначен для испытаний на трение и износ упорного воспринимающего центробежную силу лопасти подшипника осевого шарнира несущего винта вертолета в условиях качательного движения с частотой 4—6 Гц, угловой амплитудой до величины  $\alpha = 0,087$  при статической осевой нагрузке до 25 000 кгс.

Осевой шарнир (рис. 58) имеет корпус 1, снабженный гребенкой для соединения с узлом лопасти винта, и палец 5, которые центрируются один относительно другого при помощи радиальных подшипников 2 и 4. Осевую силу, приходящую от лопасти, воспринимает упорный подшипник 3.

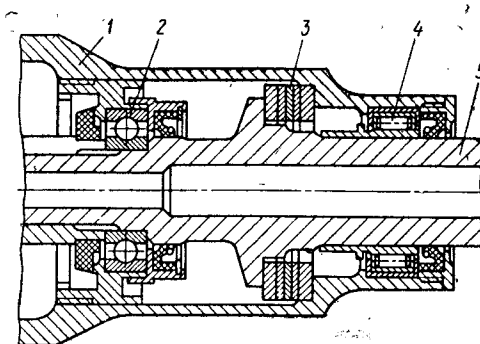


Рис. 58. Осевой шарнир

Для проведения испытаний на стенде собирают узел (см. рис. 57), состоящий из двух осевых шарниров 3 и 5, гребенки которых соединены между собой переходной деталью 4. Палец 2 одного осевого шарнира закрепляется на станине 1 стенда, палец 6 другого осевого шарнира скрепляется с нагружающим рычагом 7, который является звеном рычажного механизма 8. Нагружение рычажного механизма создается винтовым силовым возбудителем 10 через динамометр 9. Качательное движение подводится к переходной детали 4 тензометрической тягой 11 от эксцентрика 12, приводимого во вращение электродвигателем 13.

Стенд управления винтом соосного вертолета (рис. 59), конструкция которого является развитием конструкции стенда автоматов-перекоса\*, предназначен для испытания на изнашивание шарнирных соединений системы управления несущими винтами в близких к эксплуатационным условиям нагружения. Основными элементами стенда являются платформы 9 и 6, жестко соединенные с валами 11 и 15 верхнего и нижнего несущих винтов. На платформах установлено по три торсиона 10 и 7, поводок каждого из которых шарнирно сопряжен с одной из трех тяг верхней ползушки 12 и с одной из трех тяг нижней ползушки 14. Противоположное вращение валов верхнего и нижнего винтов обеспечивается редуктором 4 и электродвигателем 3. При этом отклонение автоматов-перекоса 5 и 8 из плоскости, перпендикулярной оси вала несущего винта, вызывает периодическое с частотой вращения вала, качательное движение в шарнирах кинематической цепи, а связанные с этой цепью торсионы испытывают переменное кручение, нагружая таким образом всю систему управления гармонически изменяющейся нагрузкой.

Вибрационное нагружение элементов системы управления с более высокой частотой создается эксцентриковыми устройствами

\* Стенд для динамических и ресурсных испытаний автоматов-перекоса вертолетов. Авт. свид. № 184497. Бюллетень изобретений, 1966, № 15. Авт. Ю. Э. Савинский, Л. П. Скляров, А. И. Дрейзин, Г. Ф. Лазарев.

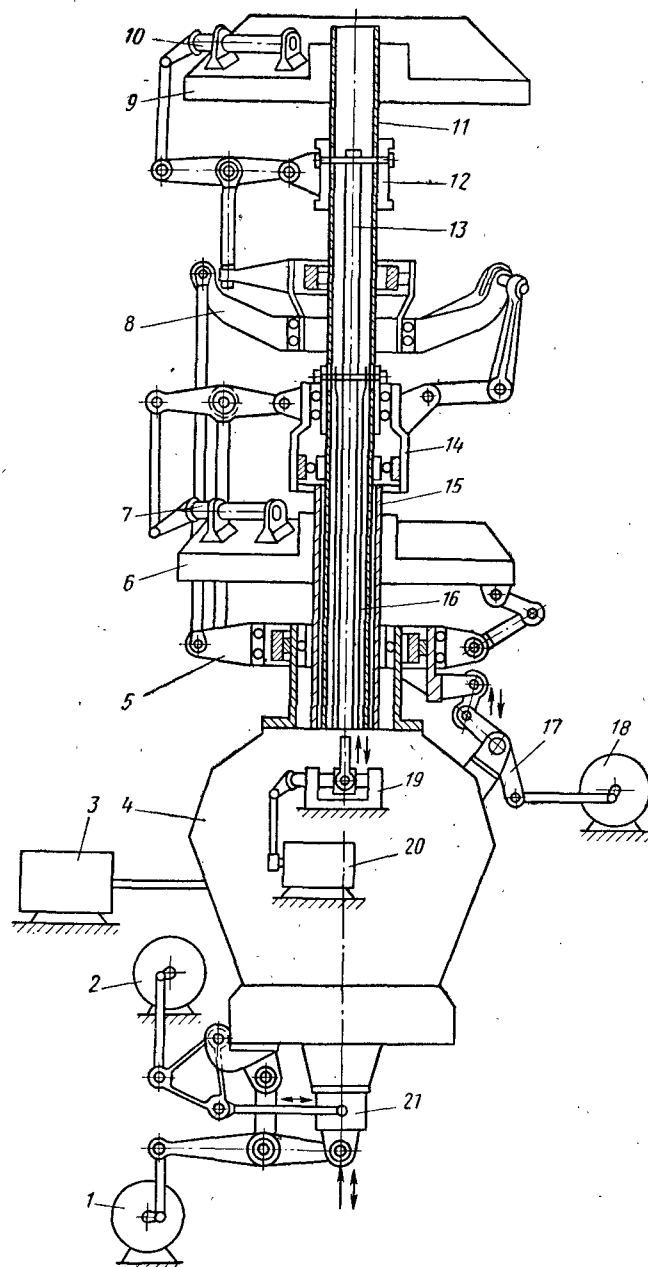


Рис. 59. Стенд для испытания системы управления несущих винтов соосного вертолета

18 и 20, которые через проводку управления 17 и 19 воздействуют на рычаги продольного и поперечного завала нижнего автомата — перекоса. Возвратно-поступательное движение тягам 13 и 16 вместе с установленными на них верхней и нижней ползушками 12 и 14 сообщается так называемым механизмом общего и дифференциального шага 21, причем синхронное движение обоих тяг происходит при задании движения со стороны эксцентрика 1, а движение тяг в противоположном направлении возникает при задании движения со стороны эксцентрика 2. В процессе испытаний производится тензоизмерение усилий в тягах при помощи двух ртутных токо-съемников, устанавливаемых на валах верхнего и нижнего винтов.

#### 4. Методика испытания на трение и изнашивание

**Подготовка рабочих поверхностей.** Для обеспечения работы узла трения всухую<sup>1</sup> перед его сборкой рабочие поверхности подшипника и сопряженной детали промывают в бензине «калоша».

При испытании с разовой смазкой на рабочую поверхность подшипника наносят тонкий слой консистентной смазки ЦИАТИМ.

Жидкую смазку маслом МС-20 применяют при испытании на изнашивание металлофторопластовых упорных шайб осевых шарниров несущего винта вертолета, поскольку в указанных шарнирах используются неработоспособные без смазки подшипники качения. С целью приближения условий работы упорных шайб осевых шарниров к условиям сухого трения в продолжение всего времени испытаний узел трения выдерживают под нагрузкой, что предотвращает возможность периодического обновления смазочной пленки на рабочих поверхностях, как это происходит в эксплуатации.

**Температура.** Основные испытания металлофторопластовых подшипников на изнашивание проведены при комнатной температуре.

Исследование влияния температурных условий на трение подшипников проведено при последовательном повышении температуры от комнатной до некоторой заданной, выдерживании при этой температуре узла трения в течение 30—40 мин и проведении кратковременных испытаний. После завершения испытаний при положительных температурах производили измерения при постепенном охлаждении узла трения. Для обеспечения заданной температуры исследуемый узел помещали в специальный контейнер, причем разогрев достигали подачей в контейнер горячего воздуха, а охлаждение — загрузкой карманов контейнера сухим льдом.

**Контроль режима испытаний.** Заданные параметры режима испытания контролировали: статическую нагрузку — динамометром или тензомером; переменную нагрузку — методом тензо-

<sup>1</sup> Где нет указаний относительно смазки, подразумеваются испытания всухую.

измерений при помощи протарированных датчиков сопротивления, усилительной аппаратуры 8АНЧ7 и шлейфового осциллографа К-20; угловое смещение — электропотенциометрическим датчиком МУ-611; скорость вращения эксцентрика, определяющую частоту колебаний — ручным магнитным тахометром ИО-70; температуру вблизи рабочей поверхности — записью на потенциометре ЭПП-09м с использованием хромель-копелевых термопар.

**Измерение износа.** Для определения массового износа подшипников использовали аналитические весы АД-200. Перед взвешиванием подшипники промывали в ацетоне и высушивали на воздухе. Наружный и внутренний диаметры цилиндрических подшипников измерялись соответственно микрометром и индикаторным нутромером. Диаметр крупногабаритных подшипников измеряли по трем сечениям в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, ориентированных относительно клейма на торце подшипника.

**Измерение трения.** В процессе испытания периодически или непрерывно измеряли усилие, возникающее в тензометрической тяге, передающей колебательное движение от эксцентрикового устройства к узлу трения. Момент этого усилия относительно оси качательного движения определяется трением испытываемого подшипника и подшипниковых узлов стэнда, а также инерционными силами в колеблющихся деталях, расположенных далее измерительного элемента. Составляющую усилия, обусловленную инерционными силами, измеряли в процессе работы стэнда при заданных параметрах колебательного движения без нагружения узла трения внешней силой. Трение в стеновых узлах, использующих стандартные подшипники качения, определяли расчетом по справочным данным.

Узел, предназначенный для исследования трения упорного подшипника, составлен из двух осевых шарниров, причем один из шарниров — обычного типа, применяющий в качестве упорного роликоподшипник, а второй в качестве упорного подшипника использует металлофторопластовую шайбу. Момент трения исследуемого металлофторопластового подшипника

$$M = M_{\Sigma} - 2M_0 + M_p,$$

где  $M_{\Sigma}$  — полный момент испытываемого узла относительно оси качения;  $M_0$  — полный момент одного осевого шарнира с упорным подшипником обычного типа;  $M_p$  — момент трения упорного роликоподшипника.

Моменты  $M_0$  и  $M_p$  определяли экспериментально, причем коэффициент трения роликового подшипника в диапазоне температур от  $-10$  до  $+40^\circ\text{C}$  (смазка МС-20 при положительных) температурах и ВНИИНП-25 при отрицательных) оказался стабильным: равным 0,003 для подшипника со средним диаметром сепаратора 100 мм, и равным 0,004 для подшипника со средним диаметром сепаратора 60 мм.

Перед проведением параметрических исследований трения производили приработку подшипников до получения достаточно стабильных значений коэффициента трения, но не менее 5 ч. После приработки исследуемый узел нагружали, затем выдерживали некоторое время при заданной температуре, после чего включали аппаратуру, регистрирующую колебательное движение и усилие двигательного рычага, и электродвигатель стэнда. По истечении 2—3 с работы узла трения на заданном режиме электродвигатель выключали. За счет инерции вращающихся масс двигателя и эксцентрика колеблющиеся детали привода до полного останова совершают 10—15 циклов постепенно замедляющихся качаний. Продолжительность одного цикла измерений ограничена таким образом, чтобы разогрев рабочих поверхностей от трения практически не сказывался на величине коэффициента трения подшипника. Расшифровкой осциллограмм движения и момента трения определяли зависимость коэффициента трения подшипника от амплитудного значения скорости скольжения при постоянных значениях величины удельной нагрузки и температуры (рис. 60). Данные измерений, полученных при различных удельных нагрузках и температурах, позволяют построить зависимости коэффициента трения подшипника от скорости скольжения, удельной нагрузки и температуры [47].

**Влияние инерционных сил на величину произведения  $pV$ .** В стэндах и лабораторных установках, предназначенных для испытания подшипников в условиях колебательного движения, узлы

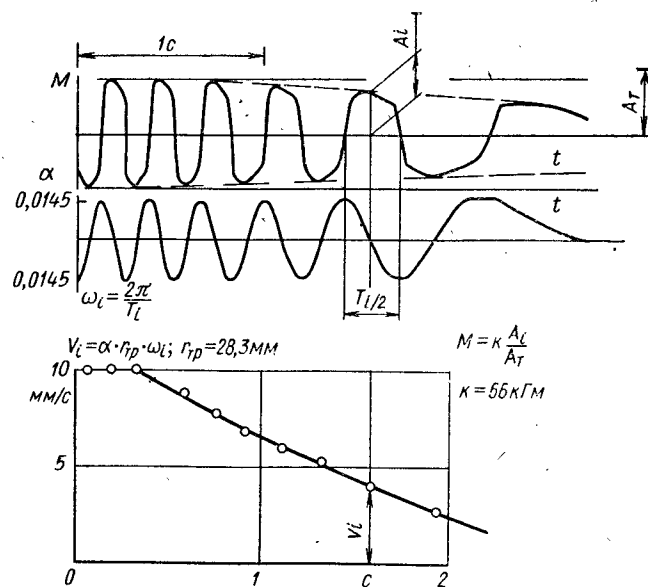


Рис. 60. Схема расшифровки осциллограммы момента трения

трения, нагруженные внешней силой, могут подвергаться воздействию дополнительных нагрузок, порожденных инерцией колеблющихся масс. Обычно эти дополнительные нагрузки малы. Однако при повышенных частоте и амплитуде колебательного движения узлы трения некоторых установок догружаются инерционными силами, сравнимыми по величине с задаваемой внешней нагрузкой. Поэтому при проведении испытания на долговечность необходимо оценить величину инерционных сил и ввести соответствующие ограничения параметров колебаний или учесть дополнительные силы при вычислении действительной величины произведения  $PV$ .

Так, при работе четырехпозиционной установки (см. рис. 52), узел трения нагружается статическим усилием, развиваемым пружиной, и динамическим усилием, обусловленным инерционностью подвижных масс, причем линии действия статического и динамического усилий примерно совпадают. При этом величина общей нагрузки, действующей на испытываемый узел,

$$P = P_c + P_a \sin \omega t,$$

где  $P_c$  — величина статического усилия;  $P_a$  — амплитудное значение инерционного усилия.

Относительная скорость смещения рабочих поверхностей узла трения достигает максимального значения, когда инерционные силы обращаются в ноль, т. е. сдвиг фаз между колебаниями скорости и нагрузки равен  $90^\circ$ . В соответствии с этим скорость скольжения описывается функцией

$$V = V_\alpha \cos \omega t,$$

а произведение общей нагрузки на скорость скольжения

$$PV = V_\alpha \left( P_c \cos \omega t + \frac{P_a}{2} \sin 2\omega t \right).$$

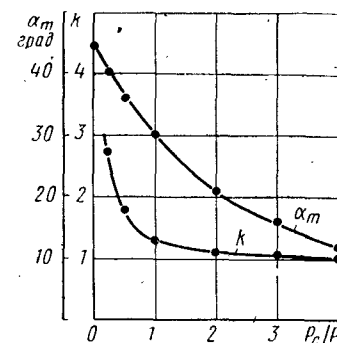
Для определения значения угла  $\omega t = \alpha_m$ , при котором произведение  $PV$  достигает наибольшего значения, выражение для  $PV$  дифференцируется по углу  $\alpha_m$ , а полученное выражение приравнивается нулю. Зависимость угла  $\alpha_m$  от отношений  $P_c/P_a$ :

$$\alpha_m = \arcsin \left[ -\frac{P_c}{4P_a} + \sqrt{\frac{P_c^2}{16P_a^2} + \frac{1}{2}} \right].$$

Отношение  $k$  максимального значения произведения нагрузки на скорость скольжения, определенного с учетом инерционных сил, к величине произведения статической нагрузки на амплитудное значение скорости скольжения  $P_c V_\alpha = (P_c V)_{\max}$  равно:

$$k = \frac{(PV)_{\max}}{(P_c V)_{\max}} = \cos \alpha_m + \frac{P_a}{P_c} \sin 2\alpha_m.$$

Рис. 61. Зависимости коэффициента  $k$  и угла  $\alpha_m$  от отношения  $\frac{P_c}{P_a}$ .



Зависимости коэффициента  $k$  и угла  $\alpha_m$  от отношения  $P_c/P_a$  показаны на рис. 61.

В соответствии с полученными результатами параметры колебательного движения, задаваемые для испытания подшипников на изнашивание, ограничивались таким образом, чтобы величина инерционного усилия не превышала одной третьей части величины внешней статической нагрузки (произведение  $PV$  увеличивается при этом менее чем на 5%).

Величина амплитудного значения действующего на узел трения инерционного усилия

$$P_a = \frac{J\alpha^2\omega^2}{a},$$

где  $J$  — массовый момент инерции деталей, приводимых в движение со стороны узла трения, относительно оси качения;  $a$  — амплитуда линейных перемещений узла трения при колебаниях.

## 5. Изнашивание и трение радиальных и шарнирных подшипников

**Испытание на изнашивание радиальных подшипников.** Подшипники с размерами  $D \times d \times l = 13 \times 10 \times 10$  мм, имеющие внутреннюю рабочую поверхность, испытаны на четырехпозиционном стенде (см. рис. 52) в паре с болтами из стали 30ХГСА ( $HRC 40$ , рабочая поверхность хромирована и полирована) и 12ХНЗА (рабочая поверхность цементирована и шлифована, твердость цементованного слоя  $HRC 60$ ). Параметры колебательного движения:  $\alpha = 0,262$  ( $15^\circ$ ),  $\nu = 9,6$  Гц, что соответствует амплитудному значению скорости скольжения  $V_\alpha = 0,075$  м/с. Испытания проводены при двух значениях радиальной нагрузки:  $P = 40$  и  $P = 100$  кгс (соответствующие значениям  $p = 40$  и  $100$  кгс/см<sup>2</sup>). Произведение удельной нагрузки на амплитудное значение скорости скольжения составляло при этом 3 и 7,5 кгс/см<sup>2</sup> · м/с. Время нормальной работы подшипников в паре с болтами из стали 30ХГСА на первом режиме составило в среднем 350 ч, на втором режиме — 90 ч (по результатам испытаний восьми пар трения каждого типа). Для подшипников, работающих в паре с болтами из стали 12ХНЗА, аналогичные показатели — 540 и 150 ч. Разница между наибольшими и наименьшими значениями долговечности на первом режиме 200 ч, на втором 35 ч.



Подшипники с размерами  $D \times d \times l = 38 \times 34 \times 22$  мм, имеющие внутреннюю рабочую поверхность, испытаны на стенде радиальных подшипников (см. рис. 53) в паре с валом из стали 30ХГСА (HRC 40, рабочая поверхность шлифована) при удельных нагрузках от 300 до 600 кгс/см<sup>2</sup>, частоте колебаний 4—5 Гц и угловой амплитуде  $\alpha = 0,005—0,01$  ( $0^\circ 17'—0^\circ 35'$ ). Наименьшие значения долговечности по результатам испытаний двух подшипников на каждом режиме следующие: при величине произведения  $pV = 1,5$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с долговечность равна 1500 ч при  $pV = 2$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с — 1000 ч; при  $pV = 5—800$  ч.

Четыре втулки марки «DU» производства фирмы «Гласир» испытаны при удельной нагрузке 270 кгс/см<sup>2</sup>, частоте качаний 6 Гц и угловой амплитуде  $\alpha = 0,052$ , что соответствует величине  $pV = 10$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с. Минимальное значение долговечности втулок 115 ч.

На стенде радиальных подшипников проведены также испытания втулок с внешней рабочей поверхностью размерами  $D \times d \times l = 56,6 \times 50,6 \times 44,6$  и  $78 \times 70 \times 100$  мм. Подшипники испытывали в паре со втулками из стали 12ХНЗА с цементированной на глубину 0,8—1,2 мм рабочей поверхностью (твердость цементованного слоя HRC 60, шероховатость обработки  $\nabla 8$ ). Втулки с диаметром рабочей поверхности 56,6 мм нагружались радиальным усилием 18 100 кгс (приходящимся на две втулки), что соответствует удельной нагрузке 360 кгс/см<sup>2</sup>. Частота колебаний была равна 4 Гц, а угловая амплитуда  $\alpha = 0,0058$  ( $0^\circ 20'$ ); 0,0087 ( $0^\circ 30'$ ) и 0,017 ( $1^\circ$ ).

На первом режиме при  $pV = 1,4$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с было проведено испытание 20 пар втулок продолжительностью 500 ч и трех пар втулок продолжительностью 1000 ч, причем на одной из втулок, прошедших 1000-часовые испытания, отмечено незначительное повреждение рабочей поверхности. Максимальный линейный износ после 500 ч нормальной работы подшипников 0,05 мм, после 1000 ч — 0,06 мм.

На втором режиме испытано восемь пар втулок. Результаты испытаний на изнашивание радиальных подшипников ( $D = 56,6$  мм;  $p = 360$  кгс/см<sup>2</sup>;  $pV = 2,1$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с) приведены ниже:

Время работы подшипников, ч	300	300	325	300	520	620	600	330
Время нормальной работы, ч	300	200	140	300	300	310	220	330
Линейный износ, мм	40	40	15	20	20	35	45	35

При величине произведения  $pV = 2,1$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с средняя долговечность оказалась равной 260 ч, а максимальный линейный износ достиг 0,045 мм.

На третьем режиме ( $pV = 4,2$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с) испытаны три пары втулок продолжительностью 100 ч. В двух из них после заверше-

ния испытаний отмечено повреждение рабочих поверхностей, однако линейный износ не превышал 0,04 мм.

Втулки с диаметром рабочей поверхности 78 мм испытывали с разовой смазкой при удельной нагрузке  $p = 330$  кгс/см<sup>2</sup> и качательном движении с параметрами:  $v = 4,8$  Гц,  $\alpha = 0,0058$ . Амплитудное значение скорости скольжения при этом составляло 0,006 м/с, а произведение  $pV = 2$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с. Всего испытано шесть подшипников на базе 500 ч, причем нормальная работа одного подшипника длилась 350 ч, а у остальных сохранялась в течение всего времени испытания.

Подшипники с размерами  $D \times d \times l = 56,6 \times 50,6 \times 44,6$  и  $78 \times 70 \times 100$  мм были испытаны также, когда обе их поверхности, наружная и внутренняя, являлись рабочими. Подшипники испытывали в паре с охватывающей их втулкой и валом, изготовленными из стали 12ХНЗА с цементированными, шлифованными рабочими поверхностями, на режимах с произведением  $pV$ , равным соответственно 2,1 и 2 кгс/см<sup>2</sup>·м/с. В начале испытаний скольжение происходило по внутренней поверхности, создающей меньшее сопротивление движению. Скольжение по наружной поверхности появлялось только после начала развития процессов разрушения внутренней поверхности. При этом момент трения подшипника несколько возрастал. После 600 ч работы подшипника наружная рабочая поверхность оставалась в хорошем состоянии.

**Испытание на изнашивание шарнирных подшипников.** Шарнирные подшипники с размером под болт диаметром 20 мм испытаны на износ на многопозиционной установке (см. рис. 55). В процессе качательного движения с частотой 4 Гц и амплитудой  $\alpha = 0,07$  ( $4^\circ$ ) подшипники нагружали переменным по величине радиальным усилием, статическая составляющая которого равнялась 250 кгс, а амплитуда переменной составляющей 150 кгс, что соответствует удельной нагрузке  $70 \pm 43$  кгс/см<sup>2</sup> и амплитудному значению скорости скольжения 0,024 м/с. Определенное с учетом сдвига фазы между колебаниями нагрузки и скорости скольжения произведение  $pV$  составляло при этом 1,9 кгс/см<sup>2</sup>·м/с. В течение 1500 ч было испытано четыре подшипника, причем два из них работали в плоскости, перпендикулярной оси болта, сопряженного с внутренним кольцом подшипника, а два — в плоскости оси болта. После наработки 1000 ч радиальный зазор в подшипниках не превышал 0,2 мм, по завершении испытаний величина зазора достигла 0,6 мм.

Сравнительные испытания на износостойкость металлофторопластовых и типа ШС-20 стальных шарнирных подшипников проведены на стенде управления несущими винтами (см. рис. 59) в условиях нагружения, близких к наиболее тяжелым эксплуатационным условиям. По два металлофторопластовых и по одному подшипнику ШС-20 было установлено в каждое из четырех типовых шарнирных соединений системы управления соосного вертолета: в соединение тяги, идущей от верхней ползушки к верхнему

автомату-перекоса; в соединение тяги, идущей от нижней ползушки к нижнему автомату-перекоса; в соединение тяги подвески верхнего автомата-перекоса с ним же; в соединение тяги подвески верхнего автомата-перекоса с нижним автоматом-перекоса. При сборке подшипники ШС-20 обильно смазывали смазкой ЦИАТИМ-201. Все подшипники находились в резиновых чехлах, надетых на наконечники тяг.

В процессе испытаний валы несущих винтов приводились во вращение с частотой 240 об/мин, автоматы-перекоса отклонялись от плоскости, перпендикулярной оси валов, на  $1^\circ$ , тяги продольного и поперечного управления нижним автоматом-перекоса нагружали усилиями, равными соответственно 390 и 112 кгс, а к механизму общего и дифференциального шага со стороны рычага общего шага прикладывали усилие, равное 560 кгс. При этом на подшипники действовали переменные нагрузки с частотой 4 Гц, изменяющиеся по величине за время одного оборота вала винта от нуля до 420 кгс; с этой же частотой происходило колебательное движение в шарнирах, амплитуда которого составляла  $1^\circ$ . Испытания длились 90 ч. Прошедшие испытания металлофторопластовые подшипники находились в хорошем состоянии, радиальный зазор в них отсутствовал, рабочие поверхности семи подшипников не имели существенных изменений, приработочный слой рабочей поверхности одного подшипника выработался до обнажения бронзовых частиц. На всех четырех испытанных подшипниках ШС-20 имелись следы механической выработки и фреттинг-коррозии; отмечен в этих подшипниках также незначительный радиальный зазор.

**Испытание на трение радиальных подшипников.** На величину коэффициента трения металлофторопластового подшипника наибольшее влияние оказывают следующие факторы: условия работы (удельная нагрузка, скорость скольжения, температура); время (наработка, продолжительность контакта); конструкция узла трения (толщина приработочного слоя подшипника, радиальный зазор, шероховатость обработки и твердость контртела); наличие или отсутствие смазки. Особенно неопределенным и трудно предсказуемым является трение в начале работы, когда одновременно изменяется фактическая площадь контакта (а стало быть и фактическая удельная нагрузка), температура (из-за разогрева от трения), состояние рабочих поверхностей подшипника и контртела (из зоны трения удаляются следы смазки и загрязнений, на сопряженную с подшипником поверхность переносятся частички фторопласта с наполнителем). Это приводит к тому, что даже при одинаковых условиях работы, но в зависимости от индивидуальных особенностей подшипника коэффициент трения в первые часы работы может уменьшаться, увеличиваться или оставаться постоянным. Поэтому параметрическое исследование трения следует производить после некоторой приработки подшипника.

Зависимость коэффициента трения от времени работы подшипников прослежена в процессе длительных испытаний подшипников размерами  $D \times d \times l = 56,6 \times 50,6 \times 44,6$  мм на стенде вертикального шарнира несущего винта. Испытания проводили при комнатной температуре на режиме, характеризующемся величиной  $pV = 1,4$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с ( $p = 360$  кгс/см<sup>2</sup>;  $v = 4,2$  Гц;  $\alpha = 0^\circ 20'$ ). Сопряженной с подшипником деталью являлась втулка из стали 12ХНЗА (HRC 60;  $\nabla 9$ ). Перед сборкой испытываемого узла рабочие поверхности подшипника и контртела смазывали ЦИАТИМ-221. От трения температура вблизи рабочих поверхностей повысилась до  $35\text{--}40^\circ\text{C}$ . Результаты проведенных измерений показаны на рис. 62.

У подшипников, приработочный слой которых имеет толщину, превышающую 0,1 мм, коэффициент трения в продолжение всех 500 ч работы остается в пределах значений 0,03—0,04. Подшипники с толщиной приработочного слоя, равной 0,01—0,04 мм, в первые 100—150 ч испытаний увеличивают коэффициент трения от 0,03—0,04 до 0,09—0,10; в дальнейшем коэффициент трения увеличивается незначительно. Уменьшение толщины приработочного слоя до минимума (порядка 0,01 мм) приводит к тому, что уже в начале работы коэффициент трения равен 0,08—0,09, а затем быстро увеличивается и остается до конца испытаний в пределах 0,11—0,12.

Для одного из подшипников с толщиной приработочного слоя 0,01—0,04 мм перед началом испытаний и через каждые 100 ч работы определены температурные зависимости коэффициента трения (с искусственным разогревом и охлаждением). На основании полученных данных можно судить об изменении коэффициента трения с увеличением времени работы подшипников при различных температурах (рис. 63). Интересно отметить, что при возрастании коэффициента трения с увеличением времени работы подшипников разница между максимальным и минимальным значениями коэффициента трения в диапазоне температур  $-30 \div +60^\circ\text{C}$  остается практически неизменной и равной примерно 0,13.

При описанных выше условиях определены сравнительные температурные зависимости коэффициента трения подшипников после 5 ч приработки с целью выявления влияния смазки, толщины приработочного слоя, вида наполнителя. Полученные результаты приведены на рис. 64—66. Введение разовой смазки и утолщение приработочного слоя несколько снижает трение. Введение во фторопласт в качестве наполнителя свинца, вместо дисульфида молибдена существенно увеличивает трение. Однако во всех случаях характер и градиент температурных зависимостей коэффициента трения металлофторопластовых подшипников остается неизменным.

Практически идентичные представленным выше получены температурные зависимости коэффициента трения при испытании подшипников размерами  $D \times d \times l = 78 \times 70 \times 100$  мм в паре со

втулками из стали 12ХН3А и 4Х13 ( $HRC\ 50$ ;  $\nabla 9$ ). Для последнего варианта определены также зависимости коэффициента трения от амплитудного значения скорости скольжения при различных температурах (после 5 ч приработки на режиме  $p = 300\text{ кгс/см}^2$ ;  $v = 4,5\text{ Гц}$ ;  $\alpha = 0^\circ 20'$ ). Эти испытания проводили без смазки, с искусственным подогревом или охлаждением. Величину трения определяли в ходе кратковременной работы узла при качательном движении с частотой 4,5 Гц и угловой амплитудой  $1^\circ$  и затем в процессе постепенно замедляющихся колебаний до частоты 0,75 Гц. Полученные зависимости показаны на рис. 67.

Исследование сухого трения подшипника размерами  $D \times d \times l = 56,6 \times 50,6 \times 44,6\text{ мм}$ , работающего в паре со втулкой из стали 12ХН3А, проведено также на роликовом стенде. Результаты, полученные при испытании подшипника с толщиной прирабочного слоя 0,1 мм, показаны на рис. 68. Измерения производили после 5 ч приработки при  $p = 400\text{ кгс/см}^2$  и амплитудном значении скорости скольжения 1 см/с. Графики, показанные на рис. 68, а, иллюстрируют влияние температуры на коэффициент трения при двух значениях амплитудной скорости скольжения. В исследованном диапазоне температур от  $-48$  до  $+60^\circ\text{C}$  коэффициент трения изменяется примерно в 3 раза. Изменение удельной нагрузки от 200 до  $500\text{ кгс/см}^2$  (рис. 68, в), влияет на коэффициент трения незначительно. Существенное возрастание коэффициента трения при увеличении скорости скольжения отмечается при положительных температурах (рис. 68, б). В диапазоне температур от  $-30$  до  $-50^\circ\text{C}$  изменение скорости скольжения от 0 до 1 см/с практически перестает влиять на величину коэффициента трения, что приводит к характерному изменению вида осциллограмм трения, показанных на рис. 69.

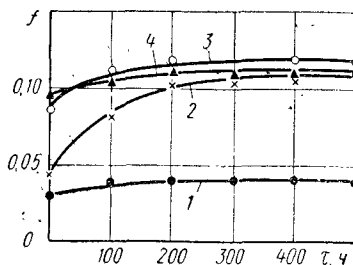


Рис. 62. Зависимости коэффициента трения от времени наработки подшипников с прирабочным слоем  $\delta$ :  
1 — 0,1—0,16; 2 — 0,01—0,04; 3 — 0,01—0,02; 4 — 0,005—0,01 мм, наполнитель — Pb (25% по объему)

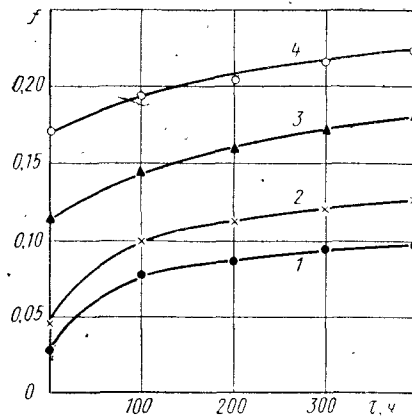


Рис. 63. Зависимости коэффициента трения от наработки подшипников при температуре рабочей поверхности:  
1 —  $(+60^\circ\text{C})$ ; 2 —  $(+30^\circ\text{C})$ ; 3 —  $(0^\circ\text{C})$ ; 4 —  $(-30^\circ\text{C})$

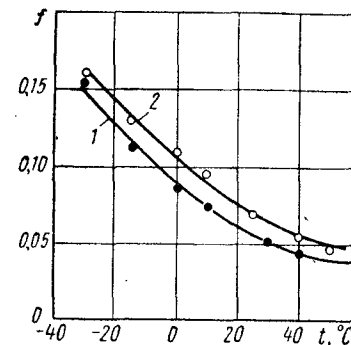


Рис. 64. Влияние разовой смазки на температурную зависимость коэффициента трения подшипника с прирабочным слоем  $\delta = 0,02—0,04\text{ мм}$ :  
1 — разовая смазка ЦИАТИМ-221; 2 — сухое трение

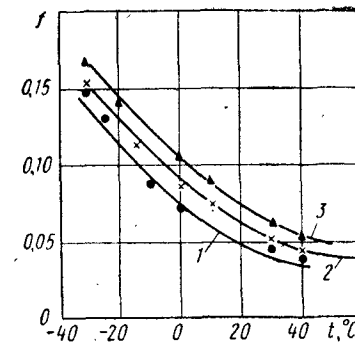


Рис. 65. Температурные зависимости коэффициента трения (разовая смазка ЦИАТИМ-221) при толщине прирабочного слоя  $\delta$ :  
1 — 0,1—0,16; 2 — 0,02—0,04; 3 — 0,01—0,02 мм

Испытаниям на роликовом стенде подвергнут также подшипник после того, как он проработал 500 ч в эксплуатационных условиях нагружения ( $pV = 1,4\text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ ,  $p = 360\text{ кгс/см}^2$ ). Относительная площадь, занимаемая бронзой, на рабочей поверхности этого подшипника была близка к максимальной (70—80%). Измерения проведены при удельной нагрузке  $400\text{ кгс/см}^2$  и амплитудном значении скорости скольжения до 1 см/с (рис. 70). В исследованном диапазоне температур коэффициент трения подшипника изменяется в пределах 0,13—0,25. Работа такого подшипника сопровождается значительным тепловыделением из-за трения,

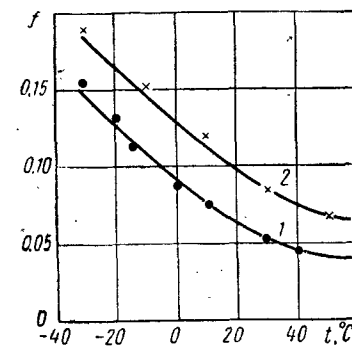


Рис. 66. Температурные зависимости коэффициента трения (разовая смазка ЦИАТИМ-221,  $\delta = 0,02—0,03\text{ мм}$ ) при наполнителе фторопласта в виде:  
1 — дисульфида молибдена; 2 — свинца (25% по объему)

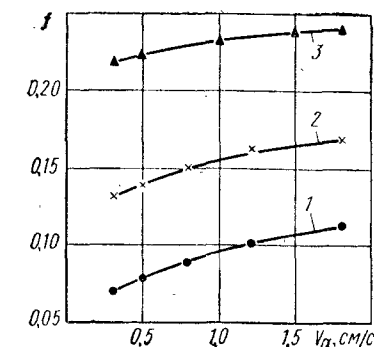


Рис. 67. Зависимости коэффициента трения от амплитудного значения скорости скольжения ( $\delta = 0,02—0,03\text{ мм}$ ) при температуре рабочей поверхности:  
1 —  $(+40^\circ\text{C})$ ; 2 —  $(0^\circ\text{C})$ ; 3 —  $(-40^\circ\text{C})$

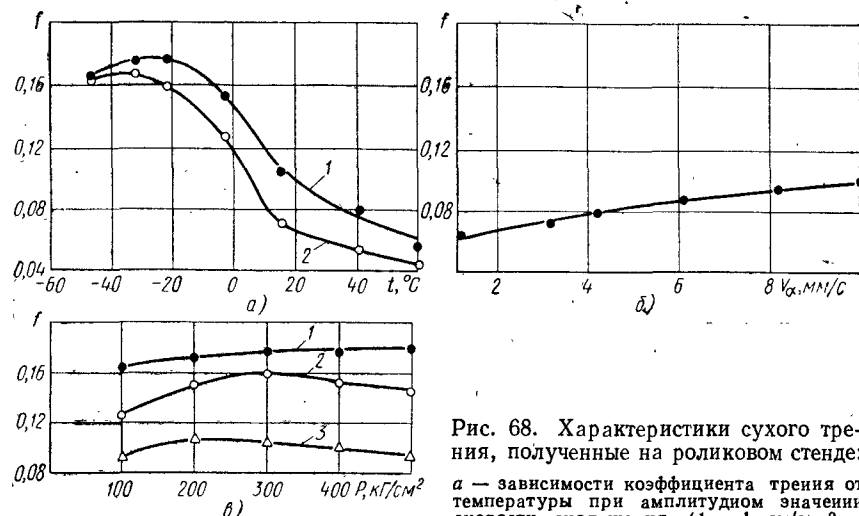


Рис. 68. Характеристики сухого трения, полученные на роликовом стенде:

а — зависимости коэффициента трения от температуры при амплитудном значении скорости скольжения (1 — 1 см/с; 2 — 2 мм/с); б — зависимость коэффициента трения от скорости скольжения при температуре 15  $^{\circ}\text{C}$ ; в — зависимости коэффициента трения от удельной нагрузки при  $v_{\text{с}} = 1$  см/с 1 — (-22  $^{\circ}\text{C}$ ); 2 — (0  $^{\circ}\text{C}$ ); 3 — (+15  $^{\circ}\text{C}$ )

показателем чего служат приведенные на рис. 71 зависимости температуры вблизи поверхности скольжения (рис. 71, а) и, соответственно, коэффициента трения (рис. 71, б) бронзофторопластового слоя от времени испытания.

Для определения влияния вида наполнителя фторопласта на температурные зависимости коэффициента трения металлофторопластового материала на роликовом стенде испытаны подшипники размерами  $D \times d \times l = 56,6 \times 50,6 \times 44,6$  мм с толщиной прирабочного слоя 0,1 мм. Испытания проведены без смазки при удельной нагрузке на подшипник, равной 400  $\text{кгс/см}^2$  и амплитудном значении скорости скольжения 1 см/с, после 5 ч работы подшипников на указанном режиме. Результаты измерений сведены в табл. 18.

Таблица 18

ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПОЛНИТЕЛЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ПОДШИПНИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Наполнитель (25% по объему)	Коэффициент трения при температуре, $^{\circ}\text{C}$			
	-30	0	+30	+60
Дисульфид молибдена	0,18	0,15	0,08	0,06
Графит	0,19	0,16	0,09	0,06
Свинец	0,22	0,16	0,11	0,07
Нитрид бора	0,18	0,14	0,10	0,08

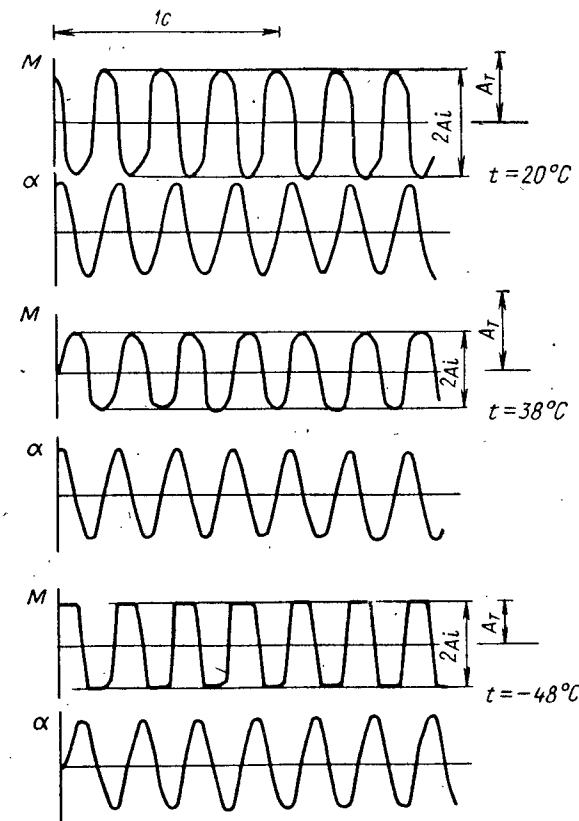


Рис. 69. Осциллограммы сухого трения подшипника при разных температурах

Изменение коэффициента трения металлофторопластового подшипника в зависимости от продолжительности работы и от температуры окружающей среды является существенным недостатком, если подшипник предназначен выполнять роль демпфера в таком ответственном узле, каким является вертикальный шарнир несущего винта вертолета. В этом случае необходимо предусмотреть дополнительные меры с тем, чтобы свести к минимуму возможную нестабильность демпфирующих свойств. Следует, в частности, ограничить ресурс подшипника с тем, чтобы он работал либо в пределах прирабочного слоя, утолщенного до 0,1—0,2 мм, либо по бронзофторопластовому слою, когда толщина прирабочного слоя не превышает 0,02.

В первом варианте применения коэффициент трения подшипника должен быть увеличен введением во фторопласт-4 повышенного количества наполнителей, таких как свинец или нитрид бора, или комбинированным применением в качестве наполнителей

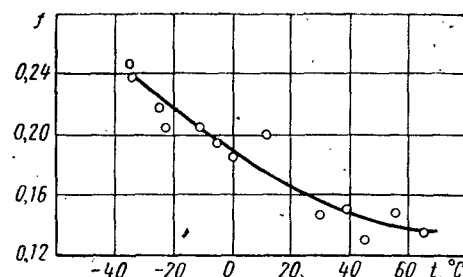


Рис. 70. Зависимость коэффициента трения от температуры при работе подшипников всухую после длительной наработки

твердых смазок и полимеров, обладающих повышенным трением (например, фторопласта-40). При этом коэффициент трения подшипника при температурах 40–60° С может быть увеличен в 2 раза (примерно с 0,05 до 0,1), а при низких температурах относительное повышение коэффициента трения оказывается не столь существенным (примерно с 0,18 до 0,23). Наконец, определенная стабилизация демпфирующих свойств достигается непродолжительной (до 5 ч) приработкой подшипника в реальном узле трения на эксплуатационном режиме работы. Указанными способами можно ограничить изменение коэффициента трения металлофторопластового подшипника, ориентировочно, диапазоном значений 0,1–0,23.

Если по условиям прочности конструкции, использующей металлофторопластовый подшипник-демпфер, и такой диапазон значений является неприемлемо широким, то для уменьшения трения при низких температурах можно предложить следующие пути: введение дополнительной теплоизоляции узла трения; искусственный разогрев подшипника; смазку подшипника.

**Испытание на трение шарнирных подшипников** при возвратно-вращательном движении болта относительно своей оси проведено на стенде, подобном показанному на рис. 53. Результаты измерений в виде зависимостей коэффициента трения от тем-

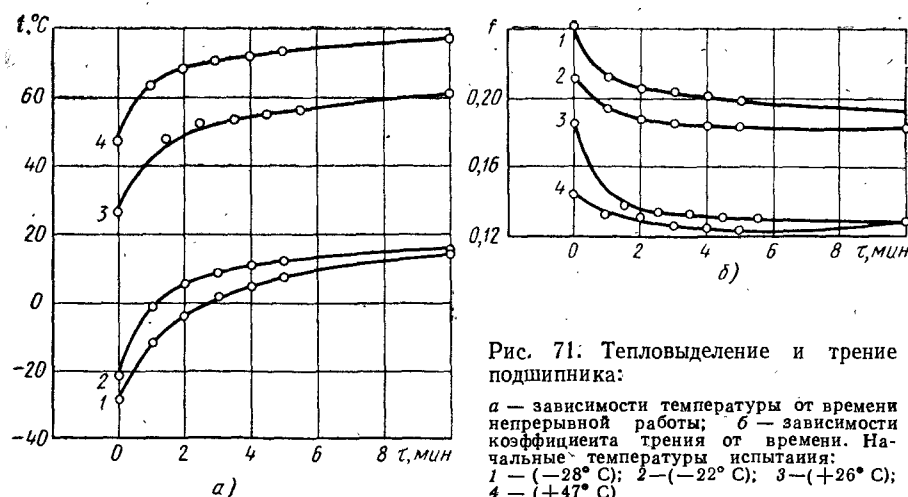


Рис. 71. Тепловыделение и трение подшипника:

а — зависимости температуры от времени непрерывной работы; б — зависимости коэффициента трения от времени. Начальные температуры испытания: 1 — (–28° С); 2 — (–22° С); 3 — (+26° С); 4 — (+47° С)

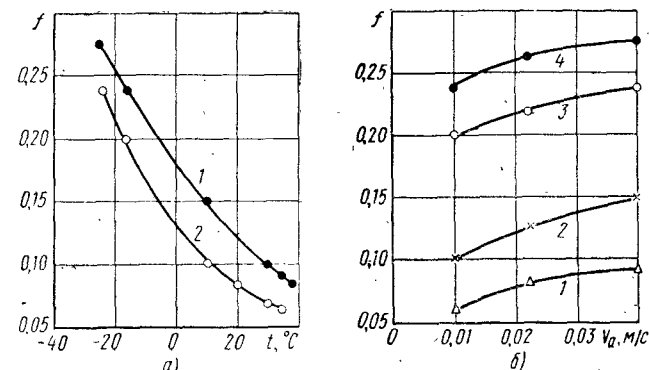


Рис. 72. Характеристики сухого трения шарнирного подшипника:

а — зависимости коэффициента трения от температуры при амплитудных значениях скорости скольжения (1 — 0,04 м/с; 2 — 0,01 м/с); б — зависимости коэффициента трения от скорости скольжения при температурах: 1 — (+34° С); 2 — (+22° С); 3 — (–11° С); 4 — (–25° С)

пературы и скорости скольжения ( $p = 100 \text{ кгс/см}^2$ ) показаны на рис. 72. Характер этих зависимостей такой же, как у радиальных подшипников.

На этом же стенде исследовано трение шарнирного подшипника при качательном движении его наружного кольца в плоскости оси болта. Оказалось, что в этом случае момент трения шарнирного подшипника примерно на 30% меньше, чем при качательном движении в плоскости, перпендикулярной оси болта. Это объясняется тем, что при движении в плоскости оси болта плечо сил трения для различных участков рабочей поверхности уменьшается от величины, равной радиусу сферы, до некоторого минимального значения, в то время, как при движении первого типа плечо сил трения практически равно радиусу сферы.

**Сравнительное испытание на износостойкость и трение металлофторопластовых и бронзовых подшипников при высоких удельных нагрузках.** В. М. Горюнов, В. Д. Лимончиков и С. И. Дякин исследовали работоспособность металлофторопластовых свертных втулок конструкции Климовского машиностроительного завода при удельных нагрузках от 300 до 2500 кгс/см<sup>2</sup> в диапазоне скоростей скольжения 0,2–9,57 см/с в сравнении с работоспособностью подшипника из бронзы Бр. АЖМц10-3-1,5 при тех же условиях [8]. Подшипники испытывали в паре с валом из стали 30ХГСА, закаленным до  $\sigma_b = 170 \text{ кгс/мм}^2$  с шероховатостью рабочей поверхности  $\nabla 7$ , по схеме «колеблющийся вал — неподвижная втулка». Металлофторопластовые подшипники смазывали ЦИАТИМ-201 один раз перед сборкой; в зону трения шарниров с бронзовыми подшипниками смазка вносилась через каждые 150 циклов колебательного движения.

Испытания проводили при  $\alpha = 2; 4; 6; 8; 10$  и  $15^\circ$ , что соответствовало  $V = 3,23; 3,82; 4,41; 5,67; 6,82$  и  $9,57 \text{ см/с}$ , и  $p = 300$ ;

900 и 1500 кгс/см<sup>2</sup> (величина произведения  $pV$  от 9,69 до 143 кгс/см<sup>2</sup>·м/с). Продолжительность работы на каждом из 18 режимов составляла 150 циклов. Температура, измеряемая на расстоянии 0,5 мм от поверхности трения, достигала при работе бронзового подшипника 178°С, а среднее значение коэффициента трения изменялось при этом в диапазоне 0,1—0,31. Во время работы шарнира с металлофторопластовым подшипником температура достигала 122°С, а средний коэффициент трения оставался в пределах 0,05—0,07. Таким образом, при этих условиях металлофторопластовый подшипник обеспечил более стабильное и низкое трение, а также меньшую температуру.

Шарнир с металлофторопластовыми подшипниками был испытан также при  $p = 2500$  кгс/см<sup>2</sup> и  $V_{\alpha} = 0,2$  см/с. В продолжении 500 циклов качаний коэффициент трения был равен примерно 0,05, а температура рабочей поверхности не превышала 50—60°С.

## 6. Изнашивание и трение упорных шайб

**Испытание на износ.** На установке торцового трения (см. рис. 51) проведено испытание на износ упорных шайб размерами  $D \times d \times h = 10 \times 6 \times 1,8$  мм, имеющих одну рабочую поверхность, при их работе в паре с образцами из стали 30ХГСА и 12ХНЗА. Толщина прирабочного слоя шайб составляла 0,05—0,06 мм, стальные образцы были термически обработаны до твердости HRC 40, а их рабочие поверхности шлифованы. При испытаниях  $p = 1000$  кгс/см<sup>2</sup>,  $v = 14,6$  гц,  $\alpha = 0,011$  (0° 38'), что соответствует  $V_{\alpha} = 0,5$  см/с и  $pV = 5$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с (здесь и далее при вычислениях амплитудного значения скорости скольжения упорных шайб радиус принимается равным внешнему радиусу шайбы).

Испытания вели на базе  $2,5 \cdot 10^6$  и  $5 \cdot 10^6$  циклов, что соответствует пути трения 0,5 и 1 км, или времени работы подшипников 50 и 100 ч. Каждую пару образцов, выдержавшую определенное число циклов колебательного движения, с установки снимали. Перед испытаниями образцы промывали в ацетоне. Результаты измерения массового износа образцов в зависимости от числа циклов колебаний приведены в табл. 19.

Для определения влияния обработки поверхности контртела на износостойкость исследуемой пары трения проведены испытания упорных шайб при их работе по образцам из стали 12ХНЗА, имеющих хромированную полированную поверхность трения (слой хрома 30—40 мкм, HRC 60, шероховатость обработки  $\nabla 10$ ). После испытаний на базе  $5 \cdot 10^6$  циклов колебаний износ шайбы составил 3,8 мг. Из двух образцов, испытанных на базе  $5 \cdot 10^6$  циклов, один полностью разрушился, а износ другого составил 12 мг. Таким образом, увеличение твердости в сочетании с хромированием и понижением шероховатости поверхности сопряженного образца повысило долговечность металлофторопластовой шайбы более чем в 2 раза.

Таблица 19

ИЗМЕНЕНИЕ МАССЫ МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВЫХ И СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗНОС, мг ( $p = 1000$  кгс/см<sup>2</sup>,  $pV = 5$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с)

Материал образца	Изменение массы образцов (мг) при числе циклов колебательного движения $N \cdot 10^{-6}$				
	5	10	15	20	25
30ХГСА	3,6 (0)	6,4 (+2,8)	7 (2)	14 (4)	86 (5)
12ХНЗА	5 (+0,6)	2 (+1,2)	6,8 (0,2)	16,6 (4)	66 (6)

Примечание. Изменение массы стального образца указано в скобках, причем знаку + отвечает увеличение массы.

Изучение изменения состояния рабочих поверхностей образцов при увеличении их времени работы, а также микрошлифов испытанных шайб и величины линейного износа антифрикционного слоя, определяемой расчетным путем, исходя из данных массового износа (в расчете принимали, что плотность фторопласта с наполнителем равна 2,5 г/см<sup>3</sup>, плотность бронзофторопластового слоя равна 7 г/см<sup>3</sup>, а толщина прирабочного слоя составляет 0,05 мм), позволило установить, что процесс изнашивания металлофторопластового материала происходит в соответствии с описанными выше (см. рис. 2) тремя характерными стадиями.

На первой стадии процесса изнашивания срабатывается прирабочный слой. При этом на стальном контртеле образуется блестящая и гладкая поверхность. Примерно так же выглядит антифрикционная поверхность. Масса стального образца незначительно увеличена в то время, как массовый износ металлофторопластового образца довольно велик. Продолжительность этого периода зависит от толщины прирабочного слоя. В описываемом эксперименте прирабочный слой срабатывался за первые  $10^6$  циклов колебаний, что соответствует скорости изнашивания  $I_{\tau} = 5$  мкм/ч или интенсивности линейного износа  $I_h = 0,5 \cdot 10^{-6}$ .

Вторая стадия процесса изнашивания начинается, когда в контакт со стальным образцом входят отдельные бронзовые частицы металлофторопластового образца. Площадь контакта по бронзе постепенно увеличивается и достигает 70—80% от номинальной площади касания. Кольцевой отпечаток на стальном образце светлеет, а сам стальной образец начинает терять в массе. Линейный износ равен 0,03 мм, что при длительности этой стадии  $10^6$  циклов, соответствует скорости изнашивания металлофторопластовой шайбы  $I_{\tau} = 3$  мкм/ч, или интенсивности линейного износа  $I_h = 0,3 \cdot 10^{-6}$ .

Третья стадия процесса изнашивания наступает, когда подпитка поверхностного слоя фторопластом с наполнителем ста-



новится недостаточной, чтобы разделять отдельные бронзовые частицы, которые в некоторых местах начинают соединяться между собой, образуя довольно обширные пятна контакта стали с бронзой. При этом условия смазки металлических поверхностей нарушаются, и начинают развиваться явления схватывания бронзы со сталью. Коэффициент трения увеличивается, становится возможным усталостное выкрашивание бронзовых частиц и даже отслаивание бронзового слоя от стальной основы. Все это обуславливает катастрофический износ антифрикционного слоя за время, соответствующее  $0,5 \cdot 10^6$  циклов колебаний. Скорость изнашивания при этом  $I_t = 100$  мкм/ч, интенсивность линейного износа,  $I_h = 10^{-5}$ .

Испытания до полного износа металлофторопластовых образцов на установке торцового трения были проведены при их работе в паре со стальными образцами, закаленными до твердости HRC 60 (рабочая поверхность цементирована на глубину 0,8—1 мм, материал — сталь 12ХН3А, шероховатость обработки  $\nabla 8$ ). Удельная нагрузка при испытаниях равнялась  $1000$  кгс/см<sup>2</sup>, частота колебательного движения — 14,6 Гц.

На режиме испытаний, когда угловая амплитуда колебательного движения задавалась равной  $0,043$  ( $2^\circ 30'$ ), что соответствует амплитудному значению скорости скольжения  $V_\alpha = 0,02$  м/с и величине произведения  $pV = 20$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с, испытано по три металлофторопластовых образца индивидуального производства, производства фирмы «Гласир» (марки «DU») и производства Климовского машиностроительного завода. Соответствующие значения времени работы шайб до их полного износа составили: 7 ч 30 мин, 6 ч и 8 ч; 9 ч, 3 ч 10 мин и 9 ч; 39 ч, 4 ч 30 мин и 30 ч.

По два образца указанных выше типов испытано при амплитуде  $\alpha = 0,021$  ( $1^\circ 12'$ ), что соответствует значениям  $V_\alpha = 0,01$  м/с и  $pV = 10$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с. На этом режиме до полного износа шайбы работали: 23 ч и 45 ч, 38 и 27 ч, 36 и 114 ч.

Результаты проведенных испытаний свидетельствуют о том, что в условиях колебательного движения при высокой удельной нагрузке износостойкость металлофторопластового материала зарубежного и отечественного производства приблизительно одинакова.

На стенде осевого шарнира втулки несущего винта вертолета (см. рис. 57) испытаны шайбы размерами  $D \times d \times h = 69 \times 42 \times 1,5$  мм, имеющие рабочую поверхность с обеих сторон, при работе в паре с кольцами из стали ШХ15 (HRC 60, шероховатость обработки  $\nabla 9$ ).

При изготовлении шайб в качестве наполнителя фторопласта был использован дисульфид молибдена в количестве 25% по объему, толщина прирабочного слоя равнялась 0,08—0,1 мм. Испытываемые шайбы устанавливали в осевой шарнир, заправленный маслом МС-20. В эксплуатационных условиях нагружение упорных шайб осевого шарнира в основном определяется центро-

бежными силами, развиваемыми лопастью при ее вращении. При стоянке вертолета появляется возможность проникновения смазки между поверхностями трения. Таким образом, в эксплуатации упорный подшипник осевого шарнира работает как бы с периодическим внесением в зону трения смазки.

В процессе испытаний на износ периодической разгрузки осевого шарнира не производили, что приближало условия работы металлофторопластовых шайб к условиям сухого трения. Всего испытано три шайбы на режиме с параметрами:  $p = 135$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\alpha = 0,052$ ;  $v = 6$  Гц ( $V_\alpha = 0,067$  м/с,  $pV = 9$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с). Испытания проводили до полного срабатывания прирабочного слоя, когда коэффициент трения упорного подшипника в процессе работы не выходил за пределы значений 0,02—0,035. При этих условиях время работы металлофторопластовых шайб составило 250, 270 и 330 ч (скорость изнашивания менее 1 мкм/ч).

**Испытание на трение упорных шайб.** На стенде осевого шарнира втулки несущего винта вертолета исследовано трение упорной шайбы размерами  $D \times d \times h = 118 \times 75,5 \times 1,8$  мм, имеющей рабочую поверхность с обеих сторон с толщиной прирабочного слоя, равной 0,07—0,09 мм, при ее работе в паре с закаленными до твердости HRC 60 кольцами из цементованной стали 12Х2Н4А-СШ (обработка поверхности  $\nabla 9$ ). Перед проведением измерений произведена кратковременная приработка шайбы.

Измерения проводили на режиме качательного движения с угловой амплитудой  $\alpha = 0,052$ , частотой  $v = 4$  Гц ( $V_\alpha = 6,5$  см/с) при  $p = 300$  кгс/см<sup>2</sup> (осевое усилие  $P = 19\,200$  кгс). Первоначальная температура узла трения  $12^\circ$  С, коэффициент трения шайбы 0,07. После 1 ч работы упорные кольца разогрелись до температуры  $100^\circ$  С, а коэффициент трения металлофторопластовой шайбы понизился до значения 0,015. Одновременное измерение коэффициента трения и температуры вблизи рабочей поверхности позволило построить график зависимости коэффициента трения шайбы от температуры (рис. 73, а). Проведено также испытание по определению влияния на коэффициент трения скорости скольжения и удельной нагрузки. Соответствующие результаты этих испытаний приведены на рис. 73, б (где по оси абсцисс отложено амплитудное значение суммарной скорости скольжения по обеим поверхностям металлофторопластовой шайбы) и на рис. 73, в. Обращает на себя внимание значительное, более чем в 2 раза, уменьшение коэффициента трения плоской металлофторопластовой шайбы при увеличении удельной нагрузки от 50 до 400 кгс/см<sup>2</sup>.

Близкие к представленным выше зависимости коэффициента трения от температуры, удельной нагрузки и скорости скольжения получены при испытании шайб размерами  $D \times d \times h = 69 \times 42 \times 1,5$  и  $82 \times 45 \times 2$  мм при их работе в паре с кольцами из стали ШХ15. Определено также влияние смазки на коэффициент трения шайбы, имеющей меньшие размеры. Были проведены испы-

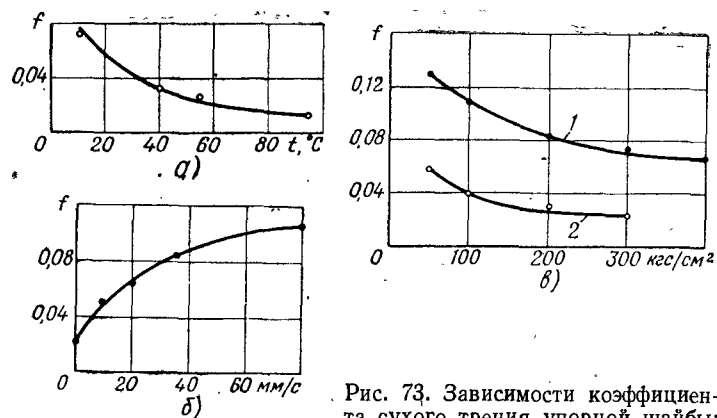


Рис. 73. Зависимости коэффициента сухого трения упорной шайбы:

а — от температуры; б — от скорости скольжения при температуре  $5^\circ\text{C}$ ; в — от удельной нагрузки при температуре  $12^\circ\text{C}$  и амплитудных значениях скорости скольжения 1 —  $6,5 \text{ см/с}$ ; 2 —  $1 \text{ мм/с}$ .

тания этой шайбы при ее нагружении осевым усилием  $4500 \text{ кгс}$  на режиме качательного движения с угловой амплитудой  $\alpha = 0,052$ , частотой  $\nu = 6 \text{ Гц}$  ( $p = 185 \text{ кгс/см}^2$ ,  $V_\alpha = 0,065 \text{ м/с}$ ). Первоначальная температура узла трения соответствовала комнатной.

Сравнение результатов измерения, проведенного при испытаниях всухую и при наличии в осевом шарнире масла МС-20, показало, что смазка приводит к существенному уменьшению коэффициента трения упорного подшипника только в первые 10—15 мин. работы. На рис. 74 показана зависимость коэффициента трения шайбы от времени при работе со смазкой (сплошная линия) и без смазки (пунктирная линия). Трение стабилизируется после 1 ч работы шайбы. После 2 ч работы со смазкой кратковременно разгрузили узел трения и коэффициент трения металлофторопластовой шайбы снизился. Однако уже через 20 мин коэффициент трения восстановился на прежнем уровне.

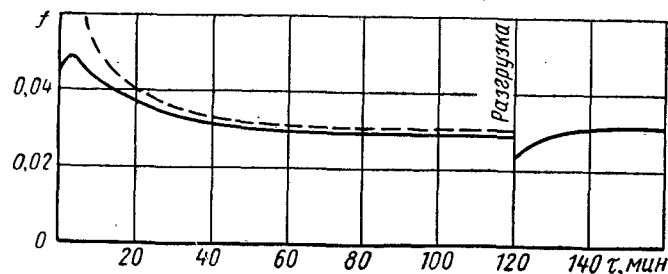


Рис. 74. Зависимость коэффициента трения упорной шайбы от времени непрерывной работы со смазкой МС-20 и всухую

## 7. Оценка долговечности подшипников в условиях колебательного движения и пути повышения долговечности.

Оценка долговечности металлофторопластовых подшипников, предназначенных для работы без смазки в узлах колебательного движения, производится на основе ожидаемой в условиях эксплуатации величины произведения  $pV$ . При статическом нагружении эта величина определяется произведением удельной нагрузки на амплитудное значение скорости скольжения; в том случае, когда действующая нагрузка существенно непостоянна, долговечность оценивают на основе величины  $(pV)_{\text{max}}$ , определенной с учетом сдвига фазы между колебаниями удельной нагрузки и скорости скольжения.

По результатам проведенных испытаний нормальная работа металлофторопластовых подшипников в течение 1000 ч обеспечивается, если величина произведения  $pV$  не превышает значений  $1,4\text{—}2,2 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ . Меньшие значения  $pV$  служат для оценки долговечности крупногабаритных тяжело нагруженных подшипников, в которых наиболее сильно проявляются краевые эффекты, связанные с неравномерностью нагружения подшипника по его длине, а большие значения  $pV$  служат для оценки долговечности небольших и относительно мало нагруженных подшипников. Указанные значения произведения  $pV$  согласуются с результатами исследований М. Нила [90], который ограничивает область работоспособности металлофторопластовых подшипников при колебательном движении в условиях сухого трения, как показано на рис. 75.

Прямой участок линии, ограничивающей область работоспособности, соответствует постоянной величине  $3,5 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ . Однако это условие сохраняется только для умеренных удельных нагрузок, изменяющихся от 1 до  $100 \text{ кгс/см}^2$ . С повышением удельной нагрузки допустимая величина произведения  $pV$  уменьшается, и при удельной нагрузке  $400 \text{ кгс/см}^2$  она становится равной  $2 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ .

Работоспособность металлофторопластовых подшипников сохраняется в течение некоторого времени при значениях величины  $pV$ , превышающих  $100 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$  [8].

Для оценки долговечности подшипника в зависимости от величины произведения удельной нагрузки на скорость скольжения может быть использована следующая формула:

$$\tau = \frac{A}{(pV)_{\text{max}}^2},$$

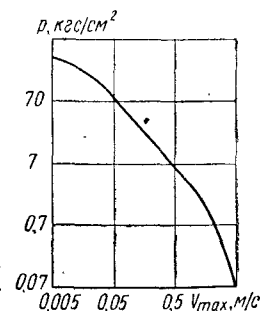


Рис. 75. Область работоспособности металлофторопластовых подшипников при колебательном движении без смазки по данным М. Нила [90]

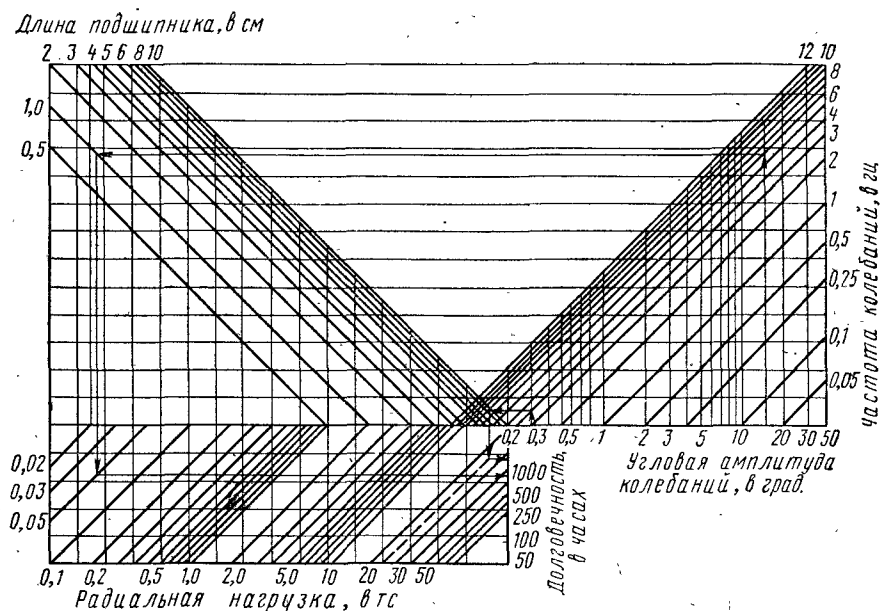


Рис. 76. Номограмма для оценки долговечности подшипников, работающих без смазки

где  $t$  — оценка ожидаемой долговечности подшипника, ч;  $(pV)_{\max}$  — максимальная величина произведения удельной нагрузки на скорость скольжения, кгс/см<sup>2</sup>·м/с;  $A$  — эмпирический коэффициент, принимаемый равным 2000 при оценке долговечности упорных шайб и тяжело нагруженных радиальных подшипников, и принимаемый равным 5000 при оценке долговечности небольших мало нагруженных радиальных подшипников.

При выборе размеров радиального подшипника на этапе проектирования можно пользоваться номограммой, показанной на рис. 76, которая построена исходя из величины коэффициента  $A = 5000$ . Номограмма позволяет определить ожидаемую долговечность подшипника по заданным параметрам колебательного движения, нагрузке и длине подшипника, как это показано стрелками для значений  $\alpha = 0,3^\circ$  ( $0^\circ 18'$ ),  $\nu = 4$  Гц,  $l = 9$  см,  $P = 24\,000$  кгс и  $\alpha = 15^\circ$ ,  $\nu = 6$  Гц,  $l = 1$  см,  $P = 50$  кгс. С другой стороны, по заданной долговечности с использованием известных значений нагрузки и параметров колебательного движения может быть определена длина подшипника. Если полученная длина больше размера, равного удвоенному диаметру подшипника, величину диаметра целесообразно увеличить во избежание чрезмерной неравномерности нагружения подшипника.

За время нормальной работы металлофторопластового подшипника его линейный износ обычно не превышает величины, определяемой по формуле

$$\Delta h = \delta + 0,03 \text{ мм},$$

где  $\delta$  — толщина прирабочного слоя подшипника.

В тех случаях, когда конструкция узла трения допускает возможность повышенных значений линейного износа, толщина прирабочного слоя может быть увеличена до 0,1—0,2 мм. При этом осредненное значение скорости изнашивания прирабочного слоя может быть оценено величиной 0,2 мкм/ч для режима работы, характеризующимся  $pV = 1,4$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с. Для работы с  $pV = 4\text{—}5$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с скорость изнашивания прирабочного слоя оценивается значением  $I_{\tau} = 1\text{—}5$  мкм/ч.

Периодическое внесение смазки в зону трения значительно снижает скорость изнашивания как прирабочного, так и бронзофторопластового слоя, а нормальная работа подшипника сохраняется в процессе изнашивания антифрикционного слоя на всю его глубину. Соответственно увеличивается и долговечность подшипника.

**Пути повышения долговечности.** Повышение износостойкости, грузоподъемности и долговечности металлофторопластовых подшипников может быть достигнуто: улучшением состава композиции фторопласта с наполнителем; применением порошков бронзы с улучшенными антифрикционными свойствами и более стабильных по гранулометрическому составу; совершенствованием технологического процесса изготовления подшипников, а также некоторых конструкций узла трения. Из наиболее реальных способов, обеспечивающих значительное повышение грузоподъемности и долговечности подшипников, следует остановиться на двух. Один из них связан с подбором наиболее рациональной геометрии подшипника, второй способ основан на принципе использования в узле трения нескольких одновременно работающих рабочих поверхностей («многоповерхностный подшипник»).

**Выбор рациональной геометрии подшипника.** В тяжело нагруженных радиальных подшипниках более интенсивно изнашиваются рабочие участки, прилегающие к торцам втулок, и разрушение антифрикционной поверхности обычно начинается с краев подшипника (краевой эффект). Это явление в основном вызывается неравномерностью нагружения радиального подшипника по его длине. Например, в часто встречающемся сопряжении типа «ухо — вилка» радиальный подшипник обычно устанавливается в проушине, расположенной по оси симметрии сопряжения. При этом соединяющий относительно подвижные детали вал, опертый на концах, прогибается под воздействием внешней нагрузки таким образом, что его центральный участок отходит от поверхности подшипника, причем края подшипника в соответствующей степени перегружаются.

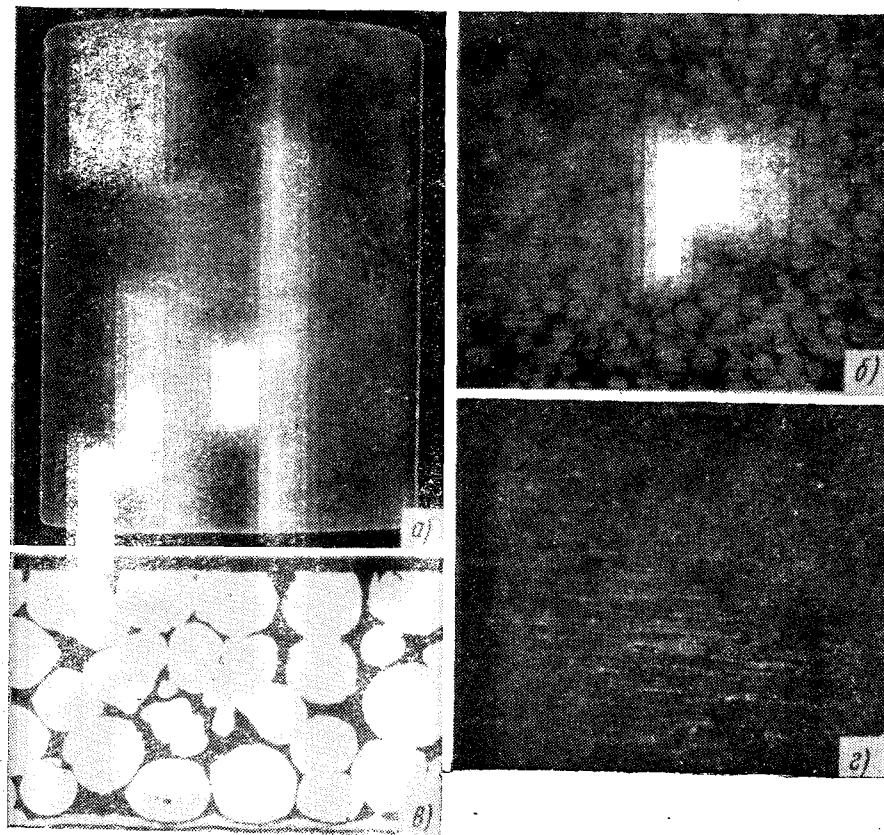


Рис. 77. Неравномерность срабатывания рабочего слоя подшипника по его длине: а — общий вид ( $\times 0,8$ ); б — вид поверхности наиболее нагруженного участка ( $\times 40$ ); в — микрошлиф поперечного сечения наиболее нагруженного участка ( $\times 100$ ); г — вид поверхности центрального участка

На рис. 77 показан общий вид рабочей поверхности радиального подшипника размерами  $D \times d \times l = 78 \times 70 \times 100$  мм после его работы в течение 500 ч под воздействием радиальной нагрузки  $P = 26000$  кгс, при колебательном движении с угловой амплитудой  $\alpha = 0,0058$  и частотой  $\nu = 4,8$  Гц ( $pV = 2$  кгс/см<sup>2</sup>  $\times$  м/с). Подшипник испытывали в сопряжении типа «ухо — вилка», причем вал сопряжения имел в сечении размеры  $D \times d = 70 \times 56$  мм. На краях подшипника отмечается значительный износ бронзофторопластового слоя (рис. 77, б и 77, в). В то же время видно, что центральный участок подшипника, занимающий половину всей его длины, практически не работал — на нем заметны лишь незначительные следы скольжения по приработочному слою (рис. 77, г).

С целью уменьшения неравномерности нагружения данного подшипника его внутренняя, сопрягаемая с валом, поверхность была выполнена с коническими участками. Длина каждого конического участка, расположенного на краю втулки, составляла одну треть от длины подшипника, угол конусности был равен  $0^\circ 20'$ . При этом, центральная часть внутренней поверхности подшипника осталась без изменений. Испытания такого подшипника, проведенные на указанном выше режиме, но при увеличенной до одного градуса амплитуде качаний ( $pV = 6$  кгс/см<sup>2</sup>  $\cdot$  м/с) на базе 100 ч показали, что введение конических участков в конструкцию обеспечивает практически равномерное по длине нагружение радиального подшипника. Рациональную геометрию подшипника следует подбирать применительно к конкретным условиям его нагружения в различных узлах трения.

**Применение многоповерхностного подшипника.** Значительное увеличение допустимых при заданной долговечности значений произведения удельной нагрузки на скорость скольжения может быть достигнуто применением металлофторопластовых подшипников с несколькими, одновременно работающими рабочими поверхностями. Одним из удачных является использование такого «многоповерхностного» подшипника в конструкции подпятника<sup>1</sup>. Упорный многоповерхностный подшипник выполнен в виде пакета плавающих чередующихся между собой металлофторопластовых и промежуточных стальных шайб. Металлофторопластовые шайбы имеют рабочую поверхность с обеих сторон. Рабочим слоем при этом может являться приработочный слой металлофторопластового подшипника, толщину которого целесообразно увеличить до 0,1—0,2 мм. Одновременное включение в процесс скольжения многих рабочих поверхностей обуславливается тем, что при увеличении скорости скольжения значительно возрастают силы трения, особенно когда подшипник работает по слою фторопласта с наполнителем. Пары трения, которым сообщена повышенная, по сравнению с другими парами, скорость, тормозятся соответственно увеличенным моментом трения и передают движение парам, имеющим меньшую скорость и меньший момент сопротивления движению. Таким образом, качательное движение, передаваемое шарнирным соединением, распределяется между несколькими рабочими поверхностями так, что амплитудное значение скорости скольжения и соответственно величина  $pV$  уменьшаются пропорционально числу рабочих поверхностей.

При увеличении числа рабочих поверхностей в многоповерхностном подшипнике его момент трения уменьшается за счет уменьшения динамической составляющей коэффициента трения металлофторопластового материала. Соответственно, влияние числа рабочих поверхностей на момент трения тем более существенно,

<sup>1</sup> Савинский Ю. Э. Противовибрационный подшипник-демпфер. Авт. свид. № 149680. Бюллетень изобретений, 1969, № 2, с. 184.

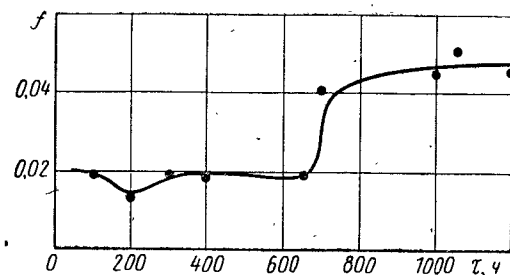


Рис. 78. Зависимость коэффициента трения упорного многоповерхностного подшипника от наработки

чем больше амплитуда колебаний, передаваемая подшипником. Испытания упорных много-

поверхностных подшипников на износ проведены на стенде осевого шарнира втулки несущего винта вертолета (см. рис. 57) в условиях, характерных для условий эксплуатации этих шарниров.

Испытан упорный подшипник, состоящий из четырех металлофторопластовых шайб размерами  $D \times d \times h = 82 \times 45,5 \times 1,8$  мм и трех промежуточных стальных шайб размерами  $82 \times 45,5 \times 0,4$  мм. Металлофторопластовые шайбы имели рабочую поверхность с обеих сторон, толщина приработочного слоя находилась в пределах 0,08—0,1 мм. Промежуточные кольца были изготовлены из полированной стали Ст10 с твердым покрытием хромом толщиной 4—5 мкм. Испытания продолжительностью 1200 ч проведены при следующих параметрах режима работы:  $P = 7700$  кгс ( $p = 210$  кгс/см<sup>2</sup>),  $\alpha = 0,0435$  ( $2^\circ 30'$ ),  $v = 4,6$  Гц ( $V_\alpha = 0,052$  м/с,  $pV = 11$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с).

Испытания проведены при наличии в осевом шарнире масла МС-20 без разгрузки узла трения. В процессе работы масло в шарнире разогревалось до температуры 60—90° С. Зависимость коэффициента трения подшипника от времени его работы показана на рис. 78. В продолжении 700 ч работы коэффициент трения подшипника был равен примерно 0,02. Затем коэффициент трения увеличился до значений 0,04—0,05. Осмотр показал, что приработочный слой на всех металлофторопластовых шайбах сработался до обнажения вершин сферических бронзовых частиц на некоторых участках шайб.

Упорный подшипник, состоящий из четырех металлофторопластовых и трех промежуточных стальных шайб с размерами, соответственно,  $69 \times 42 \times 1,5$  и  $69 \times 42 \times 1$  мм, испытан при следующих параметрах:  $P = 5500$  кгс,  $\alpha = 0,052$ ,  $v = 6$  Гц ( $p = 235$  кгс/см<sup>2</sup>,  $V_\alpha = 0,065$  м/с,  $pV = 15,5$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с). При изготовлении металлофторопластовых шайб в качестве наполнителя фторопласта был использован дисульфид молибдена в количестве 25% по объему, толщина приработочного слоя составляла 0,05—0,07 мм. Промежуточные шайбы изготавливали из стали 30ХГСА, термически обрабатывали до твердости HRC 40 и притирали до шероховатости рабочей поверхности  $\nabla 9$ . Испытываемый пакет помещали между боковыми упорными кольцами из стали ШХ15 (HRC 60, шероховатость поверхности  $\nabla 9$ ). Полное сраба-

тывание приработочных слоев упорного подшипника при этих испытаниях произошло за время 500 ч. Коэффициент трения подшипника оставался в пределах 0,03—0,04.

Проведены испытания упорного подшипника, состоящего из пяти металлофторопластовых и четырех промежуточных шайб размерами, соответственно  $118 \times 75,5 \times 1,8$  и  $118 \times 75,5 \times 0,25$  мм. Толщина приработочного слоя металлофторопластовых шайб составляла 0,05—0,07 мм. Промежуточные шайбы изготавливали из полированной стальной ленты. Испытываемый подшипник устанавливали между боковыми упорными кольцами из стали 12Х2Н4А-СШ с цементированными рабочими поверхностями (твердость цементованного слоя HRC 60, шероховатость обработки  $\nabla 9$ ).

Испытания этого подшипника проведены при следующих параметрах режима работы:  $P = 20000$  кгс;  $\alpha = 0,435$ ;  $v = 4$  Гц ( $p = 300$  кгс/см<sup>2</sup>;  $V_\alpha = 0,065$  м/с;  $pV = 19,5$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с). Первые 400 ч упорный подшипник испытывали при отрицательных температурах окружающего воздуха, причем осевой шарнир был заправлен маслом ВНИИНП-25, а последние 300 ч — при комнатной температуре и при смазке осевого шарнира маслом МС-20. К концу испытаний коэффициент трения подшипника возрос до 0,06—0,07. За 700 ч работы подшипника приработочный слой металлофторопластовых шайб сработался полностью до обнажения бронзы. Осмотром выявлено также разрушение одного промежуточного стального кольца. Видимо, промежуточные шайбы нагружаются разрывающими усилиями из-за неравномерности распределения сил трения по периметру шайб, особенно во время, когда на некоторых участках рабочей поверхности обнажается бронза. В связи с этим имеются определенные ограничения минимальной толщины промежуточных шайб по условиям их прочности.

Проведенные испытания показали, что при весьма тяжелых условиях нагружения долговечность многоповерхностного упорного подшипника сравнима и даже превосходит долговечность лучших из применяющихся для колебательного движения с малыми амплитудами упорных роликоподшипников. Использование многоповерхностных подшипников существенно расширяет область работоспособности металлофторопластовых подшипников, работающих при колебательном движении без смазки.

Более сложной является проблема создания многоповерхностных радиальных подшипников, поскольку из-за различия диаметров втулок, составляющих такой подшипник, моменты, оказывающие сопротивление движению этих втулок, существенно различаются. Тем не менее, предварительные испытания показали, что при достаточно большой амплитуде качаний применение дополнительных рабочих поверхностей повышает грузоподъемность также и радиального подшипника.

Радиальный подшипник, состоящий из вставленных одна в другую двух металлофторопластовых и одной промежуточной стальной втулки был испытан на износ на стенде радиальных подшип-

ников (см. рис. 53). Металлофторопластовые втулки размерами  $D \times d \times l = 44 \times 40 \times 32$  и  $38 \times 34 \times 32$  мм, имели антифрикционное покрытие на внешней и внутренней поверхностях с толщиной прирабочного слоя 0,05—0,07 мм. Содержание дисульфида молибдена во фторопласте составляло 25% по объему. Промежуточная стальная втулка размерами  $D \times d \times l = 39,5 \times 33,5 \times 32$  мм была изготовлена из стали 30ХГСА (HRC 40, шероховатость обработки рабочих поверхностей  $\nabla 8$ ). Перед сборкой рабочие поверхности подшипника были смазаны тонким слоем консистентной смазки ЦИАТИМ-203. Сопряженные с многоповерхностным радиальным подшипником вал и охватывающая втулка были изготовлены из стали 30ХГСА, твердостью HRC 40, а их рабочие поверхности шлифовали. Вал, кроме того, был хромирован.

В узел трения устанавливали два испытываемых радиальных подшипника. Нагрузка на оба подшипника составляла 9500 кгс, качательное движение происходило с  $\alpha = 1,5^\circ$  и  $v = 4,2$  Гц, что соответствует  $p = 480$  кгс/см<sup>2</sup>,  $V_\alpha = 0,0116$  м/с (последние данные относятся к поверхности втулки, сопряженной с валом) и  $pV = 5$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с. Испытания проведены на базе 440 ч. Осмотр показал, что поверхность с наибольшим радиусом трения не участвовала в работе. На остальных рабочих поверхностях прирабочный слой был сработан почти на всю глубину.

Равномерное включение в процесс относительного движения всех рабочих поверхностей радиального подшипника можно достигнуть уменьшением трения поверхностей большего радиуса либо введением различных наполнителей во фторопласт, либо изменением геометрии подшипников (в частности, последовательным уменьшением ширины втулок большего диаметра с соответствующим увеличением на них удельных нагрузок, что обуславливает уменьшение коэффициента трения.)

В некоторых случаях может оказаться целесообразным использование механических устройств, обеспечивающих принудительное включение в работу всех рабочих поверхностей многоповерхностного подшипника. Применительно к радиальному подшипнику это может быть осуществлено введением, например, имеющих определенные зазоры продольных шлицевых соединений между всеми рабочими поверхностями. Тогда каждая рабочая поверхность будет иметь возможность относительного (с соседней рабочей поверхностью) движения только в пределах предусмотренного углового зазора, а дальнейшее движение будет происходить по следующей рабочей поверхности. Поверхность наибольшего радиуса при этом должна иметь возможность неограниченного скольжения для обеспечения подвижности шарнира при любых возникающих при эксплуатации амплитудах качательного движения или при других возможных движениях.

## ГЛАВА VI

### Служебные свойства металлофторопластовых подшипников при вращательном движении

#### 1. Лабораторные установки и стенды

Известно большое количество установок и методик испытания самосмазывающихся материалов подшипников скольжения. Часть из них описана в работах И. Я. Альшица с сотрудниками [1]. Здесь рассмотрим лишь установки и стенды, на которых проводились исследования металлофторопластовых подшипников.

Установка, реализующая трение по схеме «стальной шарик — сферическая пята» (рис. 79). Возможность проведения испытания на трение по данной схеме предусмотрена в конструкции четырехшариковой машины КТ-2 и в машине МАСТ-1, являющейся промышленным вариантом установки КТ-2 [33]. Шарик 2 из стали ШХ15, закрепленный в державке 1, вращается с постоянной скоростью. Нижний образец 3, имеющий кольцевой пояс, закреплен в державке 4, удерживаемой от проворота упругим элементом 5, угол закручивания которого пропорционален моменту сил трения. При частоте вращения 1 об/мин и диаметре шарика, равном 19 мм обеспечивается скорость скольжения, равная 0,0004 м/с. Электронагреватель создает температуру на рабочих образцах до 400°С.

Стенд, реализующий трение по схеме «вращающийся вал — неподвижная втулка» (рис. 80) предназначен для проведения испытания радиального подшипника на износ и трение при работе без смазки и небольших значениях удельной нагрузки. Испытываемый подшипник 3 запрессовывается в корпус 2 и консольно устанавливается на вал 4, который приводится во вращение с постоянными оборотами от электродвигателя с редуктором 1. Нагрузка на подшипник создается грузом 5, подвешиваемым к корпусу подшипника. Момент сил трения определяется по углу отклонения груза.

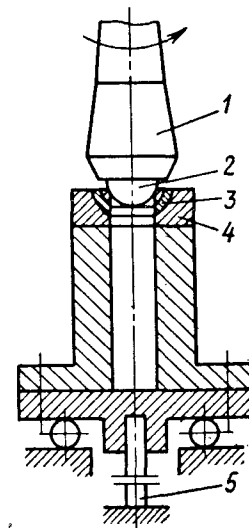


Рис. 79. Установка, реализующая трение по схеме «стальной шарик — сферическая пята»



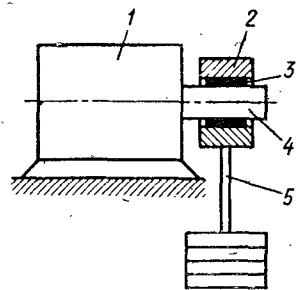


Рис. 80. Схема испытания «вращающийся вал — неподвижная втулка»

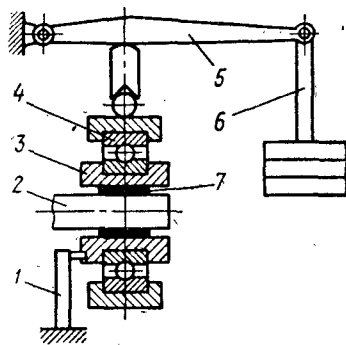


Рис. 81. Схема узла трения испытательной головки десятипозиционного стенда

Десятипозиционный стенд, разработанный А. И. Ефимовым [19], предназначен для испытания на трение и износ подшипников, изготовленных из металлофторопластовой ленты. Стенд имеет две платформы, на каждой из которых установлено по пять испытательных головок. На рис. 81 схематически изображен узел трения испытательной головки. Испытываемый подшипник 7, предварительно запрессованный в корпус 3, консольно устанавливается на валу 2. Вал приводится во вращение электродвигателем через клиноременную передачу. Нагрузка на узел трения может создаваться двумя способами. Один способ, предусматривающий использование гидравлической месдозы конструкции Н. П. Истомина, позволяет нагружать подшипник усилием до 500 кгс. Недостатком месдозы является возможность изменения величины развиваемого ею усилия в процессе работы при нагревании масла и вследствие недостаточной герметичности уплотнений. При другом способе нагружение узла трения осуществляется, как показано на рис. 81, при помощи груза 6 и рычажного устройства 5. Грузовое рычажное устройство позволяет нагружать подшипник усилием до 120 кгс. Момент трения испытываемого подшипника измеряется либо посредством упругого элемента 1, препятствующего повороту корпуса 3 относительно наружного кольца шарикоподшипника 4, либо по величине деформации кручения вала при помощи тензодатчиков и ртутно-амальгированного токосъемника.

Для определения линейного износа узел трения оснащен рычажно-индикаторным устройством, позволяющим измерять смещение вала относительно испытываемого подшипника. На одной из десяти головок стенда предусмотрена возможность поддержания определенной температуры узла трения в диапазоне 20—300° С. Для этого внутри корпуса подшипника устанавливается электрический нагреватель, включенный в автоматизированный терморегулируемый электрический контур, включающий стабилиза-

тор напряжения, автотрансформатор, вольтметр, потенциометры и реле. Температура измеряется на расстоянии 0,2—0,3 мм от поверхности трения вращающегося вала при помощи хромель-копелевых термопар, токосъемника и осциллографа Н-700 с усилителем ТА-5. Частота вращения вала может устанавливаться в диапазоне значений 40—4000 об/мин. Предусмотрена также возможность установки валов диаметром от 15 до 40 мм, для чего консольный вал выполнен съемным. Особенность реализованной на данном стенде схемы испытаний заключается в плохих условиях теплоотвода из зоны трения (теплоотдача от корпуса подшипника происходит через шарикоподшипник).

Машина для испытания материалов на трение и изнашивание в широком диапазоне атмосферных условий [13], разработанная А. П. Дорошукон, предназначена для проведения испытаний на трение и износ радиального подшипника по схемам «вал — втулка» и «вал — частичный вкладыш» при различных атмосферных условиях. В машине узел трения, представляющий собой испытываемый подшипник, закрепленный в корпусе и установленный на валу, находится внутри термокамеры с электронагревателем и охладителем. Для охлаждения используется жидкий азот, поступающий из сосуда Дьюара под действием избыточного давления. Задаваемая температура поддерживается автоматически с помощью специальных терморегуляторов, температура в образце измеряется хромель-копелевыми термопарами. Повышенная относительная влажность внутри термокамеры создается смещением в определенных количествах сухого и влажного воздуха. Кинематика машины позволяет проводить испытания при частоте вращения вала от 0,5 до 2500 об/мин, а нагрузочное устройство способно создавать на испытываемый подшипник усилие до 1000 кгс.

## 2. Испытание на изнашивание материала марки «DP» [87]

Испытание на износ радиальных подшипников проводили на стенде (рис. 80). Упорные плоские шайбы испытывали по схеме торцового трения. Втулки с внутренним диаметром от 9,5 до 25,4 мм испытывали при воздействии на них радиальной нагрузки до 70 кгс. Частоту вращения вала изменяли от 250 до 6000 об/мин. Диапазон изменения величин удельной нагрузки и скорости скольжения составлял при этом, соответственно, 0,8—21 кгс/см<sup>2</sup> и 0,2—2,5 м/с. Упорные шайбы, имеющие размеры наружного и внутреннего диаметров, соответственно, 40 и 23 мм подвергали нагружению осевым усилием до 114 кгс, создаваемым гидравлическим устройством. Наибольшая удельная нагрузка при этом была 13,5 кгс/см<sup>2</sup>, а скорость скольжения изменялась в диапазоне значений 1,22—4,94 м/с.

В процессе испытания определяли: влияние скорости скольжения, удельной нагрузки, произведения удельной нагрузки на скорость скольжения, химического состава бронзовых частиц,

толщины прирабочного слоя, пористости бронзовой матрицы, состояния поверхности контртела и размеров подшипников на их долговечность в условиях работы при вращательном движении без смазки.

**Состав пористой матрицы.** Влияние состава пористой матрицы на износостойкость материала выявлено испытаниями упорных шайб, подвергнутых осевому нагружению до удельных нагрузок 2,1 и 4,2 кгс/см<sup>2</sup> при скорости скольжения 1,68 м/с. Результаты сравнительных испытаний различных матриц, заполненных фторопластом, приведены в табл. 20. Испытания проводились до линейного износа шайб, равного 0,125 мм.

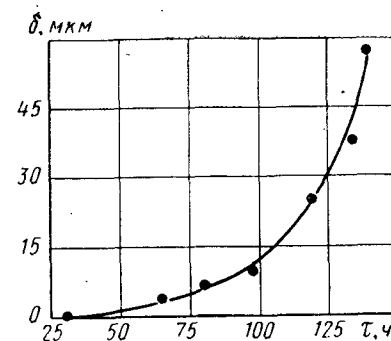
**Пористость матрицы.** Зависимость долговечности материала от объемного соотношения фторопласта и бронзы в бронзо-фторопластовом слое определяли при испытаниях упорных шайб, имеющих толщину прирабочного слоя 0,005 мм. Заполнение пор матрицы фторопластом достигали вакуумной пропиткой. Испытания проводили при величине произведения удельной нагрузки на скорость скольжения 3,56 кгс/см<sup>2</sup>·м/с, до получения линейного износа 0,125 мм. Получили зависимость долговечности от величины объемного соотношения фторопласта и бронзы, которая в полулогарифмических координатах (по одной оси откладывается величина объемного соотношения в обычных координатах, а по другой — время работы подшипников в часах в логарифмических координатах) изображается прямой линией.

Увеличение объемной доли фторопласта от 10 до 20 и 30% привело к соответствующему увеличению долговечности материала от 6 до 25 и 100 ч. Полученные результаты испытаний дали основание для предположения, что обычное для металлофторопластового материала отношение объема фторопласта к объему бронзы,

Таблица 20  
РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОС МАТЕРИАЛА  
С РАЗЛИЧНЫМ СОСТАВОМ МАТРИЦЫ

Состав матрицы	Время (ч) срабатывания шайбы на глубину 0,125 мм при значениях удельной нагрузки, кгс/см <sup>2</sup>	
	4,2	2,1
Материал, соответствующий материалу «ДР»	200	1000
Частицы бронзы дендритного строения (90% меди, 10% олова)	40	110
Частицы свинцовой бронзы (70% меди, 30% свинца)	11	18
Частицы нержавеющей стали (18% хрома, 8% никеля)	9	17
Бронзовая сетка (100 меш)	7	—
Фосфатированная сталь (толщина слоя 0,078 мм)	2	8

Рис. 82. Зависимость долговечности упорной шайбы «ДР» от толщины  $\delta$  прирабочного слоя



равное 32%, близко к оптимальному, причем оптимальное значение объемного соотношения должно быть несколько выше. Эти же испытания показали, что толщина бронзофторопластового слоя в пределах 0,25—1,25 мм не влияет на износостойкость материала. Несущественным оказалось и наличие в бронзовой матрице заполненных воздухом пор, если их объем не превышал 9%, а соотношение объемов фторопласта и бронзы оставалось неизменным.

**Толщина прирабочного слоя.** Проведено испытание на износ упорных шайб с толщиной прирабочного слоя, изменяющейся в пределах 0—0,07 мм при скорости скольжения 1,68 м/с и удельной нагрузке 3,85 кгс/см<sup>2</sup>, что соответствует произведению  $pV = 6,5$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с. Результаты испытания изображены на графике, приведенном на рис. 82. Утолщение прирабочного слоя от пренебрежимо малого значения до 0,01 мм приводит к повышению долговечности примерно в четыре раза. Увеличение толщины прирабочного слоя сверх 0,035 мм практически не сказывается на долговечности материала.

**Соотношение между величиной линейного износа и временем работы.** Испытания втулок диаметром 15,9 мм при однонаправленной нагрузке и произведении удельной нагрузки на скорость скольжения, изменяющимся от 1,85 до 2,85 кгс/см<sup>2</sup>·м/с показали, что кривая износа материала имеет вид, показанный на рис. 2. При указанных значениях  $pV$  длительность периода приработки подшипников не превышает 40 ч. Период нормальной работы с минимальной интенсивностью изнашивания длится 100 ч при величине  $pV = 2,85$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с и 300 ч при величине  $pV =$

Таблица 21  
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА ВТУЛОК ПОСЛЕ РАБОТЫ  
1000 ч ПРИ  $pV = 1,85$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с

Определяемая величина	Среднее значение, мкм	Размах варьирования, мкм
Начальный износ (после работы втулок приблизительно 40 ч)	28	±20
Износ после 1000 ч работы	37	±29
Износ в период нормальной работы	10	±18
Износ вала после 1000 ч работы	1,2	±3,8

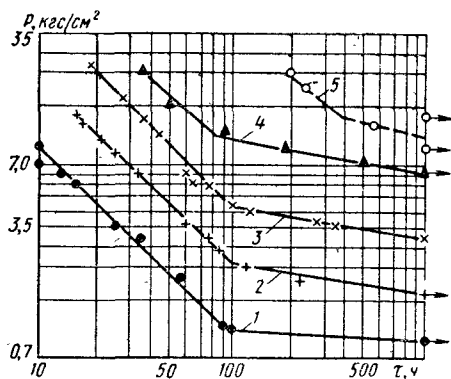


Рис. 83. Зависимости долговечности втулок «DP» от удельной нагрузки при скорости скольжения, м/с:

1—2,51; 2—1,25; 3—0,63; 4—0,33; 5—0,2

= 2,32 кгс/см²·м/с. Втулки (20 шт), испытанные на базе 1000 ч при  $pV = 1,85$  кгс/см²·м/с, выдержали испытания без разрушения. Результаты испытаний, характеризующие износ втулок, приведены в табл. 21.

**Зависимость долговечности от нагрузки и скорости скольжения.** Испытания подшипников диаметром 15,9 мм и шириной 19 мм в диапазоне удельных нагрузок 0,84—22,4 кгс/см² и скоростей скольжения 0,2—2,5 м/с, проведенные до начала ускоренного изнашивания материала, позволили выявить зависимости времени  $\tau$  нормальной работы подшипников от удельной нагрузки при нескольких значениях скорости скольжения (рис. 83). При  $pV \geq 2,86$  кгс/см²·м/с соотношение между этой величиной и долговечностью описывается выражением

$$\tau = \frac{250}{pV}.$$

На более легких режимах

$$\tau = \left( \frac{5}{pV} \right)^8.$$

В логарифмических координатах скорости скольжения и удельной нагрузки область работоспособности испытанных втулок в течение 1000 ч ограничивается наклонной линией, соответствующей величине произведения  $pV = 2,07$  кгс/см²·м/с, как это показано на рис. 84.

**Размер втулок.** Проведены сравнительные испытания на износ втулок длиной 19 мм, диаметры которых равнялись 9,5, 15,9 и 22,2 мм. Испытания вели при постоянной частоте вращения

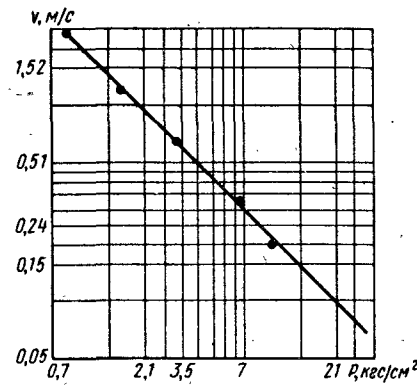


Рис. 84. Область работоспособности втулок «DP» в течение 1000 ч при  $pV = 2,07$  кгс/см²·м/с

Таблица 22  
РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОС ПОДШИПНИКОВ  
РАЗНЫХ ДИАМЕТРОВ ПРИ ЧЕТЫРЕХ ЗНАЧЕНИЯХ ВЕЛИЧИНЫ  
ПРОИЗВЕДЕНИЯ  $pV$

$pV$ , кгс/см²·м/с	Нагрузка, кгс	Долговечность подшипника (ч) при значениях диаметра, мм		
		9,5	15,9	22,2
14,3	69	19	24	31
7,1	34,5	30	46	55
3,6	17,7	54	79	114
2,1	10,4	112	500	>1000

вала, равной 750 об/мин и различных нагрузках. Полученные при испытаниях результаты приведены в табл. 22.

Время до достижения предельно допустимого износа подшипника прямо пропорционально его диаметру. Благоприятное влияние масштабного фактора связано, видимо, с улучшением условий теплоотвода при увеличении размеров узла трения.

**Долговечность при действии вращающейся относительно подшипника нагрузки.** На рис. 85 дана зависимость долговечности подшипника от величины произведения  $pV$ , полученная по результатам испытания на износ, когда радиальная нагрузка не оставалась однонаправленной, а вращалась по отношению к подшипнику, диаметр которого равнялся 15,9 мм.

При  $pV > 3,2$  кгс/см²·м/с соотношение между этой величиной и долговечностью описывается выражением

$$\tau = \frac{535}{pV}.$$

На более легких режимах

$$\tau = \left( \frac{4,5}{pV} \right)^{16}.$$

Долговечность подшипников, работающих под воздействием вращающейся нагрузки, увеличивается более чем вдвое по сравнению с долговечностью подшипников, работающих под воздействием однонаправленной нагрузки. Это объясняется, видимо тем, что при вращении нагрузки более чем в 2 раза уве-

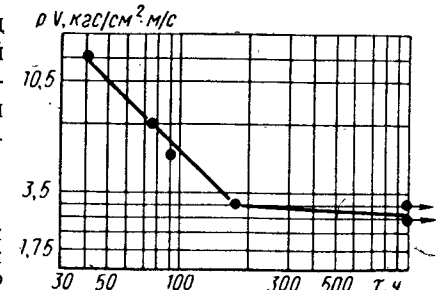


Рис. 85. Зависимость долговечности втулок «DP» от величины  $pV$  при нагрузке, вращающейся относительно вала

Таблица 23

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ УПОРНЫХ ШАЙБ  
ДО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ИХ РАБОТЕ С СОПРЯЖЕННЫМИ  
ДЕТАЛЯМИ ИЗ РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Материал контртела	Долговечность (ч) при $pV$ , кгс/см <sup>2</sup> ·м/с	
	7,1	14,2
Мягкая сталь	50	25
Сталь, плакированная свинцом	>396	98
Сталь, покрытая фторопластом	322	50
Сталь, покрытая $MoS_2$	150	73
Хромированная сталь	67	29
Фосфатированная сталь	55	35
Анодированный алюминий	62	10
Сталь, плакированная оловом	20	5
Спеченная свинцовая бронза	10	3
Медь	4	3

Таблица 24

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА  
ПРИ ЕГО РАБОТЕ В ПАРЕ СО СТАЛЬНЫМ ВАЛОМ  
РАЗЛИЧНОЙ ТВЕРДОСТИ

Твердость вала по Виккерсу, кгс/мм <sup>2</sup>	Долговечность (ч) при $pV$ , кгс/см <sup>2</sup> ·м/с	
	3,55	7,1
163	54	35
300	223	75
600	>1000	158
900	>1000	147

личивается площадь контакта рабочих поверхностей пары трения.

**Материал и твердость сопряженной детали.** Для определения влияния, которое оказывает на долговечность материала подшипника материал сопряженной детали, проведены испытания на износ до разрушения упорных шайб при двух значениях величины  $pV$ . Результаты испытаний приведены в табл. 23.

В табл. 24 приведены данные, иллюстрирующие влияние твердости вала на долговечность радиального подшипника. Увеличение твердости вала от  $HV$  163 до  $HV$  600 значительно увеличивает время нормальной работы подшипника. Дальнейшее повышение твердости влияет незначительно.

При всех описанных выше испытаниях втулок и шайб из материала «DP», кроме оговоренных случаев, сопряженные с подшипниками детали выполняли из мягкой стали, причем их рабочие

поверхности притирали тонкой карборундовой пастой или шлифовали абразивной бумагой с окончательной промывкой в растворителе. Испытания вели без прирабочных режимов до износа 0,125 мм или до возникновения явления заедания.

### 3. Служебные свойства подшипников марки «DU»

**Испытание подшипников на износ** с внутренним диаметром 15,9 мм проведено по схеме «вращающийся вал — неподвижная втулка», приведенной на рис. 80 [94]. Подшипники работали в паре с валом из незакаленной стали. Частота вращения вала равнялась 750, 1500 и 3000 об/мин, что соответствует скорости скольжения 0,625, 1,25 и 2,5 м/с. Результаты испытаний, приведенные на рис. 86, свидетельствуют, что имеется линейная зависимость между логарифмами длительности нормальной работы и величиной произведения удельной нагрузки на скорость скольжения. Работоспособность подшипника в течение 1000 ч обеспечивается при условии, что величина произведения  $pV$  не превосходит значения 3,6 кгс/см<sup>2</sup>·м/с. Величине произведения  $pV = 18$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с соответствует долговечность подшипника в пределах 200 ч.

**Ограничения по нагрузкам.** Как указано в фирменном проспекте, предел текучести материала «DU» под давлением равен 3200 кгс/см<sup>2</sup>. Величины предельно-допустимых значений удельной нагрузки  $[p]$  в зависимости от типа действующей нагрузки приведены ниже.

Тип нагрузки	$[p]$ кгс/см <sup>2</sup>
Постоянная нагрузка, незначительное или очень медленное движение	1410
Постоянная нагрузка при вращательном или колебательном движении, но при отсутствии перемещения точки приложения нагрузки относительно поверхности материала	565
Постоянная нагрузка при ее перемещении относительно поверхности материала или переменная нагрузка: для умеренных колебаний нагрузки и умеренных температур	282
для больших колебаний нагрузки и высоких температур	141

**Допустимые для заданной долговечности значения произведения удельной нагрузки на скорость скольжения.** В табл. 25 приведены рекомендованные фирмой-изготовителем подшипников допустимые значения произведения  $pV$  для непрерывной работы в течение 1000 и 10 000 ч.

Приведенные в табл. 26 значения  $pV$  для долговечности 1000 ч значительно выше значения  $pV$ , полученного при испытании на износ подшипника «DU» диаметром 15,9 мм (см. рис. 86). Возможно рекомендации фирмы относятся к работе подшипников

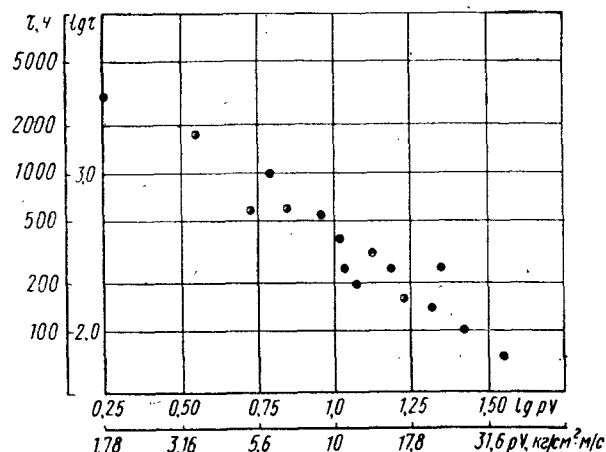


Рис. 86. Логарифмическая зависимость долговечности от  $pV$  для втулок «DU»

с улучшенными условиями теплоотвода или несколько завышены по рекламным соображениям.

**Определение размеров подшипников на этапе проектирования.** Необходимые размеры подшипников, обеспечивающие требуемую долговечность для заданных условий работы выбирают в следующем порядке.

1. Из табл. 25 выбирают значение  $K = pV$ , соответствующее заданным условиям работы и требуемой долговечности.

2. Вычисляют длину подшипника

$$l = \frac{\pi P n}{600K},$$

где  $n$  — число оборотов вала в минуту (для возвратно-вращательного движения  $n$  вычисляют как произведение числа циклов в минуту на амплитуду колебаний в частях одного оборота).

3. Проверяют, не превышает ли при выбранном  $l$  значение удельной нагрузки предельно допустимого значения в соответствии с приведенными на стр. 167. Если превышает, то  $l$  определяют по формуле

$$l = \frac{100P}{[p] D}.$$

4. Выбирают подшипник большей стандартной длины, чем вычисленное значение  $l$ .

Аналогично выполняют расчет и для плоского кольцевого упорного подшипника (подпятника).

1. Из табл. 25 выбирают значение  $K = pV$ .

2. Вычисляют ширину упорного кольцевого подшипника

$$\frac{D-d}{2} = \frac{nP}{600pV},$$

где

$$V = \frac{\pi n \frac{D+d}{2}}{60 \cdot 1000}.$$

3. Проверяют не превышает ли значение удельной нагрузки предельно допустимого значения, приведенного на стр. 167. Если полученное значение удельной нагрузки не превышает  $[p]$ , то выбирают стандартный кольцевой упорный подшипник, ширина которого не меньше вычисленного значения  $\frac{D-d}{2}$ ; если полученное значение превышает  $[p]$ , то  $D$  вычисляют по формуле

$$D = \sqrt{d^2 + \frac{400P}{[p] \pi}}.$$

Втулки и упорные кольцевые подшипники можно выбирать меньших размеров, чем полученные по расчету, если окружная скорость  $V$  ниже 0,05 м/с, или когда частота вращения превышает 15000 об/мин. Наличие жидкости или жидкой смазки улучшает условия теплоотвода и в этих случаях можно принимать за основу расчета более высокие значения произведения  $pV$ .

Таблица 25  
ЗНАЧЕНИЯ  $K = pV$ , кгс/см<sup>2</sup>·м/с  
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ДЕТАЛЕЙ

Типовые случаи применения	Вал из мягкой стали *		Вал из закаленной стали HB 540, кгс/мм <sup>2</sup>	
	Продолжительность работы, ч			
	1000	10 000	1000	10 000
Упорные кольцевые подшипники (подпятники) . . . . .	8,8	4,25	10,6	5,3
Направляющие . . . . .	4,25	2,1	4,6	2,5
Цилиндрические подшипники:				
с постоянной нагрузкой (фиксированной по отношению к положению втулки) . . . . .	5,65	4,25	8,8	6,7
с нагрузкой, вращающейся относительно втулки . . . . .	8,8	6,7	10,6	8,5
с фиксированной нагрузкой и возвратно-вращательным движением вала . . . . .	10,6	8,15	11,7	8,5

\* Эти цифры применимы также для чугуна, аустенитных нержавеющей сталей, анодированного алюминия и для хромированной мягкой стали.

Описанная схема выбора размера подшипников по заданной долговечности достаточно удобна для конструкторов, особенно, если учитывать, что в логарифмических координатах имеется прямолинейная зависимость между величиной произведения  $pV$  и долговечностью подшипника (см. рис. 86). Вследствие этого можно определить величину  $K = pV$  для любого заданного времени работы подшипника. Задача конструктора облегчается еще тем, что в фирменном проспекте для стандартных размеров подшипников даются допуски на диаметры вала и гнезда втулки (применительно к стандартным зазорам и уменьшенным для механизмов повышенной точности). Благодаря очень узкому полю допусков на толщину ленты, а следовательно, и стенок втулок величина автоматически получаемого начального зазора строго выдерживается в заданных пределах.

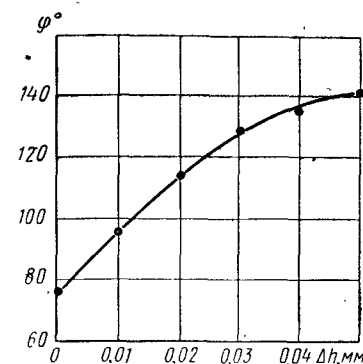
Конструкторам дается еще ряд дополнительных советов, связанных, например, с учетом жесткости гнезда втулки и с учетом температуры. Значения  $pV$ , приведенные в табл. 25, пригодны в диапазоне температур от  $-200$  до  $+280^\circ\text{C}$ , с введением при температурах свыше  $+120^\circ\text{C}$  поправочного коэффициента, обусловленного тем, что, начиная с этой температуры нагрузочная способность постепенно снижается и достигает при  $+280^\circ\text{C}$  приблизительно половины начальной величины.

**Трение подшипников.** При низких скоростях скольжения (от 0,05 до 0,1 м/с) и высоких удельных нагрузках коэффициент трения материала имеет минимальное значение, изменяясь в пределах 0,05—0,1. При наиболее часто встречающихся в практике удельных нагрузках, изменяющихся в пределах 1—100 кгс/см<sup>2</sup>, и при скоростях скольжения 0,2—5 м/с величина коэффициента трения может изменяться от 0,1 до 0,2, т. е. находится в тех же пределах, что и для обычных подшипниковых материалов, работающих при условиях граничной смазки. При понижении температуры коэффициент трения повышается, но материал успешно работает и при температуре жидкого азота.

#### 4. Служебные свойства подшипников производства Климовского машиностроительного завода

**Испытание втулок на десятипозиционном стенде.** Исследование износа и трения свертных металлофторопластовых втулок проведено А. И. Ефимовым [16, 17, 18, 20] на десятипозиционном стенде, реализующем трение по схеме «вращающийся вал — неподвижная втулка» с нагружением испытываемого узла через подшипник качения, как показано на рис. 81. Для испытаний было отобрано приблизительно 1300 серийных подшипников, внутренний диаметр которых составлял 10, 15, 20, 25, 30, 40 и 55 мм. Длина втулок равнялась их диаметру, конусность не превышала 0,01 мм. Втулки запрессовывали в стальные обоймы. Диаметральный зазор для подшипников диаметром 55, 40 и 30 мм составлял 0,06 мм; диаметром 30, 25 и 20 мм — 0,05 мм; диаметром 20, 15 и

Рис. 87. Зависимость угла контакта от линейного износа



10 мм — 0,04 мм. Основной объем испытаний проведен со втулками диаметром 30 мм и контртелом в виде шлифованных до шероховатости  $\nabla 9$  валов из стали 45, закаленных до твердости HRC 48—50. При испытаниях удельная нагрузка изменялась от 0,1 до 50 кгс/см<sup>2</sup>, а скорость скольжения — от 0,01 до 2 м/с. В тех случаях, когда подшипник должен был работать без смазки, перед сборкой рабочие поверхности промывали в бензине, ацетоне и спирте.

Испытания показали, что процесс изнашивания подшипников подразделяется на три стадии, в соответствии с характерной для металлофторопластового материала кривой износа (см. рис. 2). Период нормальной работы при трении без смазки заканчивается после достижения линейного износа 0,14—0,16 мм. При работе со смазкой значения предельного износа возрастают до 0,20—0,25 мм. Превышение предельного износа приводит к возрастанию коэффициента трения, возникновению шума с высокочастотным спектром и выходу сопряжения из строя. Но даже при этом схватывания подшипника с валом не происходит.

Приработка сопряжения сопровождается увеличением фактической площади контакта вала с подшипником в соответствии с зависимостью угла контакта от линейного износа, показанной на рис. 87. Эти результаты получены при испытаниях подшипника диаметром 30 мм, имеющего диаметральный зазор 0,06 мм, когда номинальная удельная нагрузка составляла 10 кгс/см<sup>2</sup> (повышение давления до 30 кгс/см<sup>2</sup> приводит к увеличению первоначального угла контакта до  $100^\circ$ ). В процессе приработки претерпевает также существенные изменения структура рабочей поверхности подшипника — по мере изнашивания в контакт с валом начинают входить бронзовые частицы. Это приводит к тому, что с увеличением времени работы подшипников коэффициент трения растет, и интенсивность изнашивания уменьшается до некоторого минимального значения, характерного для периода нормальной работы сопряжения.

Наиболее резко снижается скорость массового износа в период приработки при относительно легких режимах работы, когда  $pV = 0,5 — 1$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с. Величина массового износа пропорциональна значению  $pV$ ; в то же время интенсивность износа зависит от произведения  $pV$  в гораздо меньшей степени (рис. 88, а, б). При увеличении произведения  $pV$  до 5 — 20 кгс/см<sup>2</sup>·м/с ( $p = 5 — 20$  кгс/см<sup>2</sup>,  $V = 0,5 — 1$  м/с) температура вблизи рабочей



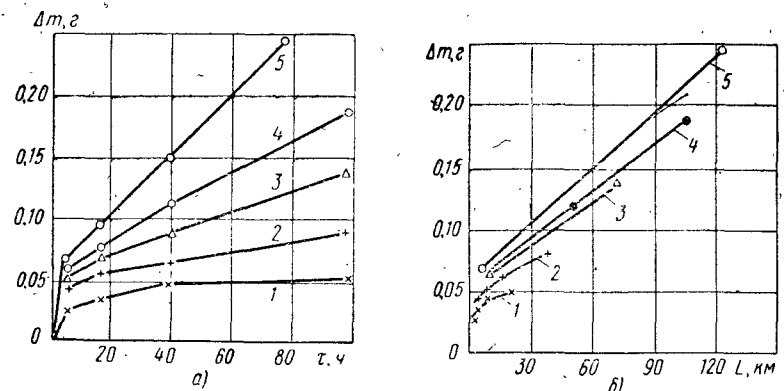


Рис. 88. Зависимости массового износа от времени наработки (а) и от пути трения (б) при скоростях скольжения, м/с:  
1 — 0,05; 2 — 0,1; 3 — 0,2; 4 — 0,3; 5 — 0,4

поверхности быстро повышается до  $200 \div 300^\circ \text{C}$ , коэффициент трения возрастает до 0,28 — 0,30, и подшипник выходит из строя через несколько часов.

Испытания подшипников диаметром 30 мм на различных режимах позволили установить зависимость их долговечности от величины  $pV$ . Эту зависимость можно описать следующими данными: при  $pV = 4 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$   $\tau = 100 \div 800 \text{ ч}$ ; при  $pV = 3 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$   $\tau = 200 \div 2000 \text{ ч}$ ; при  $pV = 2 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$   $\tau = 400 \div 4000 \text{ ч}$ . Меньшие значения долговечности относятся к режимам с наибольшими скоростями скольжения, когда из-за повышенного тепловыделения температура рабочих поверхностей приближается к  $200^\circ \text{C}$ . При повышенных удельных нагрузках и сравнительно небольшой скорости скольжения температура рабочей поверхности равнялась  $40 \div 50^\circ \text{C}$ , а долговечность подшипника была при этом наибольшей.

Влияние температуры подшипника на его долговечность определяли также экспериментально с искусственным подогревом пары трения. Массовый износ подшипника, проработавшего 100 ч при удельной нагрузке  $10 \text{ кгс/см}^2$  и скорости скольжения  $0,2 \text{ м/с}$  в условиях искусственного подогрева до  $220^\circ \text{C}$ , оказался примерно в 1,5 раза больше, чем без подогрева, когда температура не превышала  $70^\circ \text{C}$ . Принудительное охлаждение узла трения струей воздуха в соответствующем отношении уменьшало интенсивность изнашивания.

Сравнительными испытаниями на базе 100-часовой работы подшипника при удельной нагрузке  $10 \text{ кгс/см}^2$  и скорости скольжения  $0,2 \text{ м/с}$  определяли влияние шероховатости обработки вала на интенсивность массового износа подшипника диаметром 30 мм. Наименьший износ оказался у подшипника, работавшего в паре с валом, у которого высота микронеровностей рабо-

чей поверхности составила  $0,6 \div 1,5 \text{ мкм}$ , что соответствует 9—10-му классу шероховатости. Увеличение высоты микронеровностей в 5—7 раз привело к увеличению интенсивности изнашивания в 2,5—5,5 раза. Незначительное повышение износа отмечено и при снижении шероховатости рабочей поверхности вала выше 10-го класса. Исследование показало, что в процессе работы шероховатость вала незначительно изменяется. Она увеличивается, если первоначальная высота микронеровностей была меньше  $3 \text{ мкм}$ , и уменьшается в противоположном случае.

Определение влияния температуры на коэффициент трения произведено при работе подшипников в паре с валами из стали 45, закаленными до твердости HRC 48 и полированными до 10-го класса шероховатости. При испытаниях скорость скольжения была  $1 \text{ мм/с}$ , а удельная нагрузка  $10$  и  $30 \text{ кгс/см}^2$ . Низкая скорость практически исключала разогрев подшипника от самого процесса трения. При увеличении температуры внешнего нагрева от  $25$  до  $250^\circ \text{C}$  коэффициент трения уменьшался соответственно от 0,105 до 0,06 при  $p = 10 \text{ кгс/см}^2$  и от 0,083 до 0,043 при  $p = 30 \text{ кгс/см}^2$ .

Таким образом, исследования показали, что увеличение нагрузки и температуры приводит к уменьшению коэффициента трения. Повышение скорости скольжения при сохранении температуры неизменной способствует увеличению коэффициента трения. Однако в процессе длительной работы при увеличении скорости скольжения, вследствие большего тепловыделения температура повышается. В результате в некоторых случаях зависимость коэффициента трения от скорости скольжения, определенная измерениями на установившихся режимах работы, получается сложной — сначала коэффициент трения растет, затем начинает снижаться. В зависимости от режимов работы коэффициент трения подшипников в период нормальной работы без смазки может иметь значения от 0,04 до 0,23.

**Исследование трения на машине КТ-2.** Определение зависимости коэффициента трения от температуры произведено при испытании на трение по схеме «стальной шарик — сферическая пята» (см. рис. 79) [20]. Контакт металлофторопластовых шайб со стальным шариком диаметром  $12,74 \text{ мм}$  (сталь ШХ9, HRC 60, полированная до 11-го класса шероховатости) осуществлялся по кольцевому сферическому пояску с радиусом  $6,32 \text{ мм}$ . Перед испытаниями образцы последовательно промывали в бензине, ацетоне и эфире и прирабатывали при комнатной температуре в течение 60 мин (частота вращения шарика  $n = 1 \text{ об/мин}$ ). Испытания проводили при ступенчато изменяющейся (через  $50^\circ \text{C}$ ) температуре. Выдержка при заданной температуре составляла 30 мин. Испытания длительностью 1 мин проводились при удельной нагрузке  $p = 19,8 \text{ кгс/см}^2$  и скорости скольжения  $0,4 \text{ мм/с}$ . Проведение испытаний при низкой скорости практически исключало дополнительный разогрев рабочих поверхностей вследствие

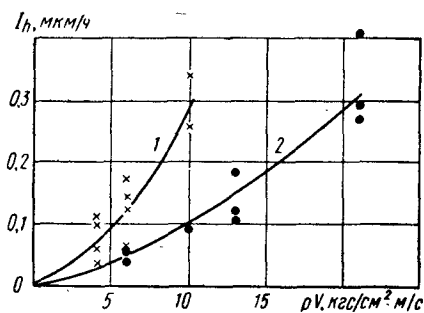


Рис. 89. Зависимости скорости изнашивания от величины  $pV$  при смазке: 1 — разовой; 2 — периодической

тепловыделения при трении. В результате проведенных испытаний получено, что при увеличении температуры от 25 до 300° С коэффициент трения непрерывно уменьшается от 0,12 до 0,04.

**Испытание на износ в условиях разовой и периодической смазки.** Исследования изнашивания металлофторопластовых подшипников в условиях разовой и периодической смазки, моделирующих условия работы подшипниковых узлов шпиндельных коробок агрегатных станков, проведено Э. А. Майоровой и др. [36]. Разовую смазку ЦИАТИМ-201 наносили на предварительно обезжиренные рабочие поверхности перед сборкой испытываемого узла. Периодическая смазка осуществлялась подачей в зону трения жидкого минерального масла Индустриальное-20 в количестве одной капли в 1—2 мин. Шероховатость поверхности контртела при стендовых испытаниях была по 7-му классу. Полученные результаты показаны на рис. 89 в виде зависимостей скорости изнашивания от величины произведения  $pV$  при двух типах смазки рабочих поверхностей для случая вращающихся подшипников. Переход к схеме испытания: «вращающийся вал — неподвижная втулка» увеличил скорость изнашивания металлофторопластовых подшипников в 3 раза. Предельно допустимая величина линейного износа подшипника определена при этих испытаниях равной 0,2—0,25 мм.

**Испытание на износ при различных атмосферных условиях** проведено А. П. Дорошуком на разработанной им машине [13, 14]. Трение в установке осуществлялось по схеме «вращающийся вал — частичный вкладыш» при коэффициенте взаимного перекрытия (отношении площадей трения контактирующих деталей), равном 0,024. Вал, изготовленный из стали 45, термически обрабатывали до твердости  $HRC\ 30—35$ , а его рабочую поверхность доводили до 9-го класса шероховатости накаткой роликом. Испытания вели без смазки при удельной нагрузке 1000 кгс/см<sup>2</sup> и скорости скольжения 0,005 м/с, что соответствует величине  $pV = 5 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ .

Испытания показали, что изменение относительной влажности воздуха от 55 до 98% не влияет на антифрикционные свойства металлофторопластового вкладыша. При комнатной температуре интенсивность линейного износа вкладыша оказалась равной  $3,4 \cdot 10^{-6}$  (соответствует скорости изнашивания  $I_n = 60 \text{ мкм/ч}$ ). Повышение температуры узла трения до значений 35, 50 и 70° С привело к снижению интенсивности изнашивания, соответ-

ственно, в 1,15; 1,6 и 1,9 раза. Понижение температуры до —25 и до —50° С уменьшило интенсивность изнашивания более, чем в 2 раза.

## 5. Сравнительное испытание на износ и трение металлофторопластового материала отечественного и зарубежного производства

Оценка антифрикционных свойств металлофторопластового материала, изготовленного по принятой в нашей стране технологии, а также материала марки «DU» производства фирмы «Гласир» проведена сравнительными испытаниями на трение без смазки по схеме «стальной шарик — сферическая пята» на лабораторной машине, схематически показанной на рис. 79 [59]. Применяли шарики из стали ШХ15 диаметром 19 мм. Перед испытаниями шарики и образцы обезжиривали промывкой в органических растворителях. Предварительно образцы прирабатывали в течение 13 ч при удельной нагрузке в контакте 6 кгс/см<sup>2</sup> и скорости скольжения 0,37 м/с. Затем испытания вели непрерывно при ступенчатом повышении нагрузки и неизменной скорости скольжения. Продолжительность испытаний на каждой ступени 50 мин.

У образца, изготовленного без введения наполнителя во фторопласт (материал типа «DP»), коэффициент трения после приработки при давлении 5 кгс/см<sup>2</sup> был равен 0,3. Удельным нагрузкам 10, 15, 30 и 45 кгс/см<sup>2</sup> соответствовали значения коэффициента трения 0,26, 0,22, 0,175 и 0,19. На этом испытании данного образца были прекращены, поскольку по всей его площади контакта обнажилась бронза, а на стальном шарике образовались кольцевые риски.

При испытаниях образца из английского материала «DU» и образца, изготовленного по принятой в нашей стране технологии с введением во фторопласт дисульфида молибдена в количестве 25% по объему, получены практически одинаковые результаты. При удельных нагрузках 10, 15, 30, 45, 60, 75 и 95 кгс/см<sup>2</sup> коэффициенты трения были равны, соответственно 0,21 и 0,22; 0,19 и 0,205; 0,15 и 0,18; 0,13 и 0,15; 0,11 и 0,12; 0,1 и 0,115; 0,11 и 0,11. После испытания на последнем режиме, когда величина произведения  $pV$  достигла 35 кгс/см<sup>2</sup> · м/с, на небольшом участке контакта образца из материала «DU» обнажилась бронза в то время, как остальная поверхность была гладкой и без рисок. На образце, изготовленном с использованием дисульфида молибдена, после таких же испытаний участков обнаженной бронзы не наблюдалось, и вся поверхность контакта была гладкой. В обоих случаях рабочая поверхность стального шарика оставалась гладкой, без царапин и рисок и приобретала зеленоватый цвет.

Для определения температурных пределов работоспособности образца, изготовленного с использованием в качестве наполнителя

дисульфида молибдена, после указанных выше испытаний образец был подвергнут дополнительным испытаниям на машине КТ-2 при той же схеме трения «шарик — сферическая пята». В этих опытах при малой скорости скольжения (0,0004 м/с) и постоянной удельной нагрузке 10 кгс/см<sup>2</sup> измеряли коэффициент трения при ступенчатом повышении температуры. Испытания показали, что при повышении температуры от 20 до 280° С коэффициент трения снижается от 0,115 до 0,09. При более высокой температуре коэффициент трения возрастает; возникает прерывистое скольжение, сопровождаемое скачкообразными колебаниями регистрируемого коэффициента трения. Причиной этого может быть окисление дисульфида молибдена или повышение адгезионной способности фторопласта к стали.

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод о близости рабочих характеристик материала марки «DU» и материала, изготавливаемого по принятой в нашей стране технологии с использованием в качестве наполнителя фторопласта дисульфида молибдена.

## ГЛАВА VII

### Применение металлофторопластовых подшипников

#### 1. Условия эксплуатации, благоприятствующие применению металлофторопластовых подшипников

Основной областью применения металлофторопластовых подшипников являются узлы сухого трения. Как было показано выше, имеется значительное число подшипниковых материалов, способных в определенных условиях работать без смазки. По отдельным рабочим характеристикам некоторые из этих материалов имеют наилучшие показатели. Например: материал, представляющий собой металлическую основу с приклеенной к ней фторопластовой тканью, допускает удельную нагрузку до 5600 кгс/см<sup>2</sup> и обладает хорошими демпфирующими свойствами [74]; графиты и углеграфиты допускают высокие температуры, хорошо противостоят действию агрессивных сред; пористые металлы, пропитанные фторопластом, и фторопласты, наполненные металлическими порошками, имеют высокую теплопроводность, хорошие демпфирующие свойства. В то же время, фторопластовая ткань имеет существенные ограничения по допустимой скорости скольжения и температуре; у других материалов низка прочность, как по отношению к статическим, так особенно, и по отношению к вибрационным нагрузкам. У металлофторопластового материала все рабочие характеристики близки к наилучшим, что делает этот материал наиболее универсальным по своим свойствам. Наиболее ценные из этих свойств состоят в том, что при работе без смазки металлофторопластовый материал допускает очень большие удельные нагрузки (до 3500 кгс/см<sup>2</sup>) [46]; имеет высокие значения произведения  $pV$  для заданной долговечности; сохраняет работоспособность в широком диапазоне температур (от —250 до +280° С); обладает нужными для демпфирования вибраций характеристиками трения; имеет теплопроводность и коэффициент термического расширения почти такие же, как у стали. Кроме того, металлофторопластовые подшипники с лужеными (а также серебряными или покрытыми свинцом) кромками и спинкой можно использовать для работы в некоторых коррозионных средах. Сочетание в металлофторопластовом материале ряда ценных свойств определяет возможность массового применения его при самых разнообразных условиях и незаменимость в некоторых сложных условиях эксплуатации.

Из условий, благоприятствующих применению металлофторопластовых подшипников, можно выделить следующие.

**Колебательное движение при высокой удельной нагрузке и небольшой скорости скольжения.** Такие условия реализуются в шарнирных соединениях втулки с лопастями несущего винта вертолета и тянущего винта самолета, в узлах подвески воздушных рулей и устройств механизации самолетных крыльев, в шарнирно-болтовых сопряжениях шасси. При колебательном движении с небольшими амплитудами резко ухудшаются условия смазки, как подшипников скольжения, так и подшипников качения; первых из-за того, что смазка выдавливается из зоны трения, и гидродинамический клин образоваться не может, вторых в связи с тем, что в момент изменения направления движения тело качения возвращается на участок контакта, откуда непосредственно перед этим смазка была выдавлена. Недостаточная износостойкость перечисленных узлов трения, применяющих обычные смазываемые подшипники, в ряде случаев ограничивает долговечность конструкции.

**Движение при очень высокой удельной нагрузке и очень низкой скорости скольжения.** Подобные условия характерны для опор мостов, зданий и других строительных сооружений, предназначенных для предотвращения чрезмерных напряжений в конструкции из-за температурных деформаций, для многочисленных малоподвижных сопряжений, подверженных воздействию высоких нагрузок вибрационного типа. Обычные подшипниковые материалы в этих условиях не обеспечивают необходимую прочность или являются полностью неработоспособными.

**Нежелательность использования смазки.** Во многих машинах по условиям технологического процесса использование смазки в узлах трения является недопустимым или крайне нежелательным. Такие машины работают в пищевой, кондитерской, текстильной, табачной, бумажной, химической отраслях промышленности. В некоторых случаях попадание смазки в вырабатываемый продукт приводит к браку, в других — нарушает безопасность производства. Во многих узлах трения таких машин движение происходит со значительной скоростью и производство удельной нагрузки на скорость скольжения является высоким. В этих условиях применение металлофторопластовых подшипников обеспечивает наибольшую долговечность конструкции.

**Неэффективность смазки.** Эффективность смазки уменьшается в условиях криогенных или повышенных температур, которые возникают при эксплуатации узлов управления реактивного или газотурбинного двигателя, расположенных вблизи камеры сгорания, насосов перекачки жидких газов, шарнирных соединений космических аппаратов и транспортных средств, предназначенных для эксплуатации на космических объектах, а также в условиях эксплуатации в жарких странах и на крайнем севере. Во многих из этих случаев, когда повышенные или пониженные температуры сочетаются с воздействием высоких удельных на-

грузок, применение металлофторопластовых подшипников является практически единственно возможным.

**Тяжелые пусковые режимы в узлах трения с гидродинамической или газовой смазкой.** В подпятниках гидрогенераторов, в узлах трения высокооборотных компрессоров и насосов, использующих газовые подшипники, в моменты пуска и останова возникают тяжелые условия работы, когда удельная нагрузка и скорость скольжения значительны, а смазочный слой, разделяющий контактирующие детали, еще не образовался. Спроектированные для современных сверхмощных гидрогенераторов подпятники с использованием подшипникового материала (баббита Б83) имеют настолько большие габариты, что оказываются неприемлемыми по условиям изготовления и транспортирования [15]. Применение в таких узлах трения металлофторопластовых подшипников, хорошо работающих как без смазки, так и со смазкой, позволяет создавать наиболее рациональные конструкции.

**Возможность возникновения автоколебательной неустойчивости.** Подвижность некоторых шарнирных соединений, обеспечиваемая подшипниками качения, обуславливает возможность возникновения при определенных условиях ряда специфических самовозбуждающихся колебаний, быстро нарастающих по амплитуде до разрушения конструкции. Примерами таких автоколебаний являются земной резонанс вертолета, связанный с колебаниями лопасти несущего винта относительно вертикального шарнира втулки, флаттер аэродинамических рулей летательного аппарата, связанный с колебаниями относительно узлов подвески, шимми в колесах автомобилей и самолетов, связанный с возможностью колебания колес относительно поворотных шкворней. Необходимость предотвращения таких колебаний в ряде случаев вынуждает вводить в конструкцию специальные демпфирующие устройства. Применение в таких шарнирных соединениях металлофторопластовых подшипников, позволяющих обеспечить благоприятные демпфирующие характеристики шарниров, способствует повышению надежности конструкции.

Описанные примеры дают представление об основных, наиболее характерных областях, в которых применение металлофторопластовых подшипников может оказаться или безусловно является целесообразным, но отнюдь не исчерпывают их. Металлофторопластовые подшипники можно применять: в ответственных агрегатах с гидродинамической смазкой для обеспечения кратковременной работы в случае внезапного отказа смазочного устройства и масляного голодания подшипника; в тяжело нагруженных и труднодоступных местах, где даже периодическая смазка является нежелательной; в многочисленных приборах и машинах бытовой техники.

## 2. Опыт применения металлофторопластовых подшипников в различных отраслях машиностроения

Авиационная промышленность является одним из основных потребителей металлофторопластовых подшипников. Известно, что еще на реактивном пассажирском самолете «Комета» было установлено около 400 подшипников на основе тефлона [38]. Только для обеспечения подвижности поворотных лопаток спрямляющего аппарата авиационного газотурбинного двигателя Роллс Ройс Эвон RA 29 в нем использовано 100 радиальных подшипников марки «DU». В шарнирных соединениях систем управления, шасси, в узлах подвески двигателей зарубежных вертолетов и самолетов широко используются шарнирные металлофторопластовые подшипники.

Удачным оказалось внедрение металлофторопластовых подшипников в узел вертикального шарнира втулки несущего винта. \* Обычно в этом шарнире используется два шариковых упорных и несколько радиальных игольчатых подшипников, предусматривается система смазки и устанавливается специальный демпфер гидравлического или фрикционного типа, тормозящий развитие вредных самовозбуждающихся колебаний. Установка в вертикальный шарнир металлофторопластовых упорных шайб и цилиндрических втулок вместо подшипников качения позволила отказаться от смазки шарнира и от использования на нижнем винте демпфирующего устройства, что упростило конструкцию и повысило ее эксплуатационную надежность. В процессе эксплуатации было установлено, что металлофторопластовые подшипники по сравнению с фрикционными демпферами обеспечивают более высокое демпфирование малых колебаний за счет отсутствия зоны свободного хода, присущей фрикционному демпферу из-за люфтов и зазоров в многочисленных сопряжениях, а также из-за своих антифрикционных свойств, заключающихся в увеличении сил трения при повышении скорости скольжения.

Недостатком металлофторопластовых подшипников как демпферов является зависимость их коэффициента трения от температуры. При низких температурах момент трения в вертикальном шарнире возрастает и, соответственно, увеличиваются дополнительные вибрационные нагрузки в конструкции. Тем не менее, как показали проведенные исследования, за счет более равномерного нагружения вертикального шарнира, использующего металлофторопластовые подшипники (нагрузки от фрикционного демпфера передаются на проушину шарнира несимметрично посредством шлицевого соединения), предел выносливости конструкции в расчетном сечении увеличивается и ресурс втулки несущего винта в итоге практически не изменяется.

\* Применение подшипников скольжения с плавающими самосмазывающимися втулками в качестве фрикционного демпфера. Авт. свид. № 304181. Бюллетень изобретений, 1971, № 17, с. 66. Авт. Ю. Э. Савинский, В. С. Альтфельд, Н. Г. Демин, А. С. Кизиляев, Е. Г. Пак, И. А. Эрлих.

Интересный опыт связан с применением металлофторопластовых упорных шайб в другом основном шарнире втулки несущего винта — в горизонтальном шарнире. Использование этих шайб вместо шариковых подшипников качения позволило высвободить место для уменьшения габаритов работающего в наиболее тяжелых условиях игольчатого подшипника и существенно увеличить долговечность узла. Опыт эксплуатации показал, что упорные металлофторопластовые подшипники в горизонтальном шарнире успешно работают при удельных нагрузках до  $100 \text{ кгс/см}^2$  и скорости скольжения до  $0,1 \text{ м/с}$ , что соответствует величине произведения  $(pV)_{\text{max}} = 10 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ . Такое высокое значение  $pV$  достигнуто за счет того, что хотя упорные подшипники в этом шарнире специально не смазываются, масло в их зону трения попадает из рабочей полости, предназначенной для смазки игольчатого подшипника. Линейный износ подшипников после наработки 500 ч не превышает  $0,2 \text{ мм}$ .

Успешно эксплуатируются шарнирные металлофторопластовые подшипники, установленные в шарниры систем управления и в шарнирноболтовые сопряжения самолетов и вертолетов, где удельные нагрузки достигают  $2500 \text{ кгс/см}^2$ . Проводятся работы в направлении дальнейшего расширения применения металлофторопластовых подшипников.

При эксплуатации металлофторопластовых подшипников, в которых в качестве наполнителя фторопласта был использован дисульфид молибдена, в некоторых случаях после длительного хранения подшипников на поверхности внутреннего кольца из стали ШХ15 наблюдались следы коррозии. Продолжительный контакт металлофторопластовых втулок с валом из стали 12ХНЗА при необеспечении герметизации узла трения также иногда сопровождался коррозией. Эти явления связаны с химической активностью дисульфида молибдена [80]. Поэтому в ряде случаев детали, сопряженные с металлофторопластовыми подшипниками, приходилось выполнять из нержавеющей стали (типа 4Х13).

В текстильных машинах [39] разных типов функционирует огромное количество самых разнообразных узлов трения, работающих в основном при сравнительно небольших удельных нагрузках и умеренных скоростях скольжения (до  $2-3 \text{ м/с}$ ). Применение в этих узлах металлофторопластовых подшипников позволяет ликвидировать многочисленные смазочные устройства, ликвидировать брак из-за замасливания производимой продукции, повысить долговечность машин, работающих в условиях высоких температур и в агрессивных средах, уменьшить периодичность регламентных и ремонтных работ.

Повышение качества продукции, в частности, достигнуто применением металлофторопластовых подшипников в прядильном производстве на ленточных машинах ЛНС-51-1. В этих машинах в опорах применяли ранее игольчатые подшипники, смазываемые не реже чем 1 раз в смену. Эксплуатационные условия

Таблица 26

УСЛОВИЯ НАГРУЖЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ  
В МАШИНЕ ЛНС-51-1

№ линии	Скорость скольжения, м/с	Удельная нагрузка, кгс/см <sup>2</sup>	Произведение $pV$ , кгс/см <sup>2</sup> ·м/с
1	0,7	4,6	3,2
3	0,49	5,1	2,0
4	0,29	6,0	1,7
5	0,23	4,6	1,1

нагружения узлов трения пяти линий рифцилиндров приведены в табл. 26.

Пятилетний опыт эксплуатации ленточных машин на ленинградском комбинате «Красный маяк» показал, что металлофторопластовые подшипники работают вполне удовлетворительно при незначительном износе.

Хорошие результаты получены при испытаниях металлофторопластовых подшипников, установленных в узлах кареток, сушильной камеры, механизма подъема и опускания клапана красильно-формовочного агрегата УКФ-60. На каждом из 11 агрегатов было установлено по 74 металлофторопластовых втулки с внутренним диаметром 15, 30 и 40 мм. Эксплуатационные условия нагружения узлов трения характеризуются удельной нагрузкой, не превышающей 4 кгс/см<sup>2</sup> и максимальной скоростью скольжения 0,17 м/с ( $pV$  не более 0,6 кгс/см<sup>2</sup>·м/с). Подшипники бесперебойно в три смены работали в среде стороса и толуола при температуре до 130°С в течение полутора лет, в то время, как срок службы применявшихся ранее шарикоподшипников составлял 3 мес.

490 свертных металлофторопластовых втулок установлено и успешно эксплуатируется в тяговой цепи ЦТ-70 чулочно-формовочной машины ЧФО-70У Тишино-сокольнической фабрики. Ранее бронзо-стальные сопряжения палец—втулка цепи раз в смену смазывали минеральным маслом и при прохождении цепи через термокамеру повышенная температура приводила к образованию масляных паров, ухудшающих качество выпускаемой продукции. Были случаи заедания поворотных звеньев цепи из-за ухудшения условий смазки втулочно-болтовых сопряжений.

Широкие производственные испытания металлофторопластовых втулок проведены в процессе эксплуатации пяти ткацких станков типа АТ-10-5М. 700 подшипников было установлено в узлах трения боевого механизма (веретено, каточки), вильяна, автомата смены шпулек (упорная собачка, курок, клапан), приводе и в других узлах. В большинстве случаев после непрерывной эксплуатации в течение трех месяцев (наработка 1500 ч) износ металлофторопластовых подшипников и сопряженных деталей был

незначителен. Неудовлетворительные результаты получены только в узлах трения каточков боевого механизма, подверженных воздействию больших ударных нагрузок. В этих узлах после завершения испытаний образовался зазор в пределах 0,7—0,8 мм. В других тяжело нагруженных узлах трения боевого механизма состояние рабочих поверхностей оставалось удовлетворительным, а величина износа не превышала допустимых значений. По результатам проведенных испытаний металлофторопластовые подшипники установлены в узлах трения ткацких станков, что позволило получить большой народнохозяйственный эффект.

Сравнительные испытания чугунного, пористого металлокерамического и металлофторопластового подшипников проведены на быстроходной швейной машине 252 класса [50]. Подшипники устанавливали в опоры главного вала. Частоте вращения 3000 об/мин соответствовала величина  $pV = 2,5$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с, частоте вращения 3900 об/мин — 6 кгс/см<sup>2</sup>·м/с. Узлы трения смазывались вазелиновым маслом при помощи хлопчатобумажного фитиля; испытания металлофторопластовых подшипников проводили также без смазки. Лучшие результаты получены при работе металлофторопластового подшипника со смазкой — в этом случае при наиболее тяжелых условиях температура в наиболее нагретой зоне не превышала 46°С. При работе без смазки нагрев металлофторопластовых подшипников во всем диапазоне скоростей вала был меньше, чем нагрев металлокерамического подшипника, и лишь при скорости вращения вала, превышающей 3600 об/мин ( $pV = 4,5$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с), разогрев металлофторопластового подшипника оказался выше, чем чугунного, работающего со смазкой.

**Легкая промышленность.** Успешно прошли производственные испытания металлофторопластовых подшипников, установленных в узлах трения обувных машин типа ОМ-4М, ЗНК и ЗПК и машин для вставки блочек [18].

В машинах ЗНК и ЗПК металлофторопластовые направляющие, установленные вместо стальных, удовлетворительно работали без смазки при температуре 150—160°С и средней величине произведения  $pV = 0,4$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с. Их износ за 5 мес. двухсменной работы не превышал 0,06 мм. Применение металлофторопластовых подшипников в узлах трения машины ОМ-4М ( $pV = 1,2 \div 1,6$  кгс/см<sup>2</sup>·м/с) вместо бронзовых подшипников позволило в 2 раза снизить износ сопряжений.

**Автомобилестроение.** Металлофторопластовые подшипники находят применение в отечественном автомобилестроении. Более 5 лет используются металлофторопластовые втулки в конструкции четырехскоростной коробки передач автомобиля ГАЗ-24 (седло пружины рычага переключателя). Удовлетворительные результаты получены при испытаниях металлофторопластовых втулок шкворней поворотных кулачков на автомобилях ГАЗ-53, втулок, установленных в тормозных узлах и сцеплении автомо-



бия ЗИЛ-130 (вилка выключателя сцепления, вал педали сцепления, колодки тормоза разжимных кулачков). Подшипники, снабженные грязезащитными уплотнениями, безотказно работали за время пробега более 200 000 км при удельных нагрузках 140—400 кгс/см<sup>2</sup> и скорости скольжения до 0,3 м/с. Более долговечными, чем бронзовые оказались металлофторопластовые подшипники, установленные в осях сателлитов дифференциалов. При работе со смазкой выявилось четырехкратное преимущество металлофторопластовых подшипников по сроку службы [25, 37].

Положительные результаты дало использование металлофторопластовых подшипников вместо игольчатых 942/20 в сверлильных станках мод. 6А840, предназначенных для обработки крышки редуктора автомобиля ЗИЛ-130 [36]. Подшипники диаметром 20 мм работали в паре с шейками шпинделей, шероховатость поверхности которых соответствовала 9-му классу, в условиях затрудненной смазки. После годичной двусменной работы станков на режиме, характеризующемся скоростью скольжения 0,56 м/с и произведением  $pV = 1,5 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ , средний линейный износ металлофторопластовых подшипников составил 7 мкм. Изнаса шеек шпинделей обнаружить не удалось. По ориентировочным расчетам долговечность металлофторопластовых подшипников в этих условиях во много раз превышает срок службы игольчатых подшипников.

**Другие отрасли машиностроения.** Значительное преимущество металлофторопластового материала перед баббитом Б-83 выявлено в условиях работы тяжелого пускового трения, характерного для эксплуатации подпятников гидрогенераторов [41]. Исследования проведены на упорных самоустанавливающихся подушках с опорной поверхностью площадью 136 и 95 см<sup>2</sup> при нагрузках, достигающих до 10 000 кгс, в ванне, заполненной маслом МС. Металлофторопластовые подшипники обеспечивают безопасное развитие гидродинамического эффекта при удельных нагрузках значительно больших, чем допускаемые для баббита. Результаты исследований подтверждены натурными испытаниями металлофторопластовых подпятников гидрогенераторов [15].

При работе со смазкой хорошо работают металлофторопластовые подшипники марки «DU», установленные в опорах вала поршневого компрессора с числом оборотов 3000 в минуту (удельная нагрузка 100 кгс/см<sup>2</sup>, температура масла 100° С); шестеренчатого насоса с числом оборотов 1000 в минуту ( $p = 300 \text{ кгс/см}^2$ ,  $t = 100^\circ \text{С}$ ) [99].

Положительные результаты получены при эксплуатационных испытаниях металлофторопластовых торцовых упоров букс тепловозов, работающих со смазкой при удельных нагрузках 1—2 кгс/см<sup>2</sup> и скорости скольжения, превышающей 4 м/с [2], при эксплуатационных испытаниях металлофторопластовых подшипников в погружных электродвигателях [12].

Имеется опыт применения металлофторопластовых подшипников для обеспечения пусковых режимов подшипников с газовой смазкой. Газовую смазку используют во многих быстро развивающихся областях техники, связанных с низкими и высокими температурами и с очень высокими скоростями, в таких, как вычислительная техника, точное приборостроение, ядерная энергетика. Необходимость обеспечения достаточной несущей способности газового подшипника при малой скорости в моменты пуска и останова вынуждает в ряде случаев вводить внешний наддув, что связано с установкой насоса и системы отвода отработанных газов.

Примером успешного применения металлофторопластовых подшипников служит гелиевый циркуляционный насос, построенный французской фирмой для английского реактора «Дракон» [40]. Насос, мощностью 120 л. с. предназначен для перекачки по теплообменному циклу гелия, имеющего температуру 350° С. Вал насоса, покрытый стеллитом, вращается с частотой 12000 об/мин. Опорой вала служит металлофторопластовый подшипник диаметром 80 мм, состоящий из трех сегментов, штампованных из материала «DU». В процессе разгона переход к газовой смазке происходит при 1600 об/мин, а при останове скольжение в радиальном подшипнике возникает при 1500 об/мин. Удельная нагрузка на подшипник не превосходит 0,11 кгс/см<sup>2</sup>, максимальная скорость скольжения— 6,5 м/с [ $(pV)_{\text{max}} = 0,7 \text{ кгс/см}^2 \cdot \text{м/с}$ ]. После 3000 пусков и остановов (время скольжения  $\tau = 50 \text{ ч}$ ) поверхность металлофторопластового подшипника находилась в хорошем состоянии, а время выбега возросло с 40 до 58 с. Аналогичные результаты получены для упорного подшипника, состоящего из шести сегментов, штампованных из материала «DU».

К металлофторопластовым подшипникам, работающим в узлах с газовой смазкой, предъявляются повышенные требования к точности изготовления. Рекомендуется применять сегментные подшипники, которые получают обработкой цилиндра с прорезями, имеющего на концах сплошные кольца. Цилиндр шлифуют и затем доводят до нужного размера и шероховатости свинцовыми притирами. После притирки кольца цилиндров удаляют. Иногда металлофторопластовые подшипники доводят алмазным инструментом. Необходимо, чтобы непараллельность образующих не превышала 1 мкм на каждый сантиметр радиуса внутренней поверхности подшипника.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альшиц И. Я., Семенова Л. М. Вопросы оценки работоспособности полимерных материалов. В кн.: Методы испытания и оценки служебных свойств материалов для подшипников скольжения. М., «Наука», 1972, с. 140.
2. Антифрикционные полимерные материалы в узлах трения подвижного состава. М., «Транспорт», 1970, 114 с.
3. Белобородов И. А., Ненахов А. В. Металлопластмассовые антифрикционные материалы на основе сферических и несферических порошков. В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Вып. III, Киев, УкрНИИТИ, 1970, с. 24.
4. Брейтуэйт Е. Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. Пер. с англ. М., «Химия», 1967, 320 с.
5. Вайштейн В. Э. и Трояновская Г. И. Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. М., «Машиностроение», 1968, 180 с.
6. Воронков Б. Д. Подшипники сухого трения. Л., «Машиностроение», 1968, 140 с.
7. Ганз С. Н., Пархоменко В. Д. Антифрикционные химически стойкие материалы в машиностроении. М., «Машиностроение», 1965, 148 с.
8. Горюнов В. М., Лимончиков В. Д., Дякин С. И. Применение металлофторопласта в тяжело нагруженных шарнирах. В кн.: Оптимальное использование антифрикционных материалов в узлах трения машин. М., «Наука», 1973, с. 77—81.
9. Горяинова А. В., Божков Г. К., Тихонова М. С. Фторопласты в машиностроении. М., «Машиностроение», 1971, 232 с.
10. Голубков Л. А., Резников Г. Т. Исследование процесса спекания и физико-механических свойств изделий из сферической бронзовой дробин. — «Порошковая металлургия», 1973, № 1, с. 79.
11. Гринченко В. Е. Влияние некоторых наполнителей на износостойкость фторопластовых композиций. — В кн.: Трение, износ и смазка, Т. 263, Новочеркасск, 1971, с. 85 (Труды НПИ).
12. Гусев Б. А., Кичигин В. Н., Малько М. Г. Исследование работы металлофторопластовых подшипников скольжения в погружных электродвигателях. — «Машин и нефтяное оборудование», 1971, № 3, с. 21.
13. Дорошук А. П. Машина для испытания материалов на трение и износ в широком диапазоне атмосферных условий. — «Заводская лаборатория», 1970, № 2, с. 233—235.
14. Дорошук А. П. Экспериментальное исследование металлофторопласта как антифрикционного материала для тяжело нагруженных узлов трения. — В кн.: Надежность и долговечность металлургического оборудования. Вып. 10. (Труды НИИПТМАШ.) Краматорск, 1970, с. 65—69.
15. Дьячков А. К., Маховенко А. И. Улучшение конструкции упорных подшипников при применении антифрикционного материала С-1-V. — «Вестник машиностроения», 1973, № 1, с. 33—35.
16. Ефимов А. И. Износ подшипников скольжения, изготовленных из металлофторопластовой ленты и работающих без смазки. — В кн.: Технология машиностроения, № 3. М., ЦНИИТЭлеггншемаш, 1970, с. 25.
17. Ефимов А. И. Некоторые результаты испытаний подшипников скольжения из металлофторопластовой ленты. — В кн.: Методы испытания и оценки служебных свойств материалов для подшипников скольжения. М., «Наука», 1972, с. 110.
18. Ефимов А. И. Применение подшипников скольжения, изготовленных из металлофторопластовой ленты, в обувных машинах. — В кн.: Машиностроение для легкой промышленности, № 3. М., ЦНИИТЭлеггншемаш, 1970, с. 7.
19. Ефимов А. И. Стенд для испытания подшипников, изготовленных из металлофторопластовой ленты, на трение и изнашивание. В кн.: Технология машиностроения, № 1—2. ЦНИИТЭлеггншемаш, М., 1970, с. 1.
20. Ефимов А. И., Дорошенко Н. И., Дынкин С. Я. Свойства металлофторопластовых подшипников скольжения. М., ЦНИИТЭлеггншемаш, 1973, 68 с.
21. Истомин Н. П. Антифрикционные свойства и износостойкость фторопласта-4 с различными наполнителями. В кн.: Полимеры в машинах, НИИМАШ, С-IX, М., 1968, с. 223.
22. Истомин Н. П., Хрущев М. М. Исследование антифрикционных свойств композиций фторопласта-4 с графитом в зависимости от ориентации плоскостей спайности графита. — В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев, УкрНИИТИ, 1970, Вып. IV, с. 57.
23. Карагузов И. Х., Борзенков Г. Н. Результаты испытаний антифрикционных материалов на основе фторопласта-4. — В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев, УкрНИИТИ, Вып. VI, с. 62.
24. Кнузянц И. Л., Фокин А. В. Покорение неприступного элемента. М., Изд-во АН СССР, 1963, 192 с.
25. Кокорев А. А., Зорина Н. С., Кальмансон Д. Д. Применение ленточного металлофторопласта для подшипников сухого трения. — «Автомобильная промышленность», 1971, № 11, с. 31.
26. Кудрявцева Б. М. К методике определения оптимальных составов антифрикционных композиций. — В кн.: Проблемы трения и изнашивания. Киев, «Техника», 1972, Вып. 2, с. 128.
27. Кудрявцева Б. М., Виноградов Ю. М. Выбор оптимальных составов антифрикционных композиций на основе фторопласта. — В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев, УкрНИИТИ, 1970, Вып. IV, с. 73.
28. Курицына А. Д., Истомин Н. П. Композиционные материалы и покрытия на базе фторопласта-4 для сухого трения в подшипниках скольжения. М., НИИМаш, Серия IX, 1971, 52 с.
29. Кутков А. А., Сиренко Г. А., Корнопольцев Н. В. Исследование процесса изготовления и физико-механических свойств самосмазывающегося материала на основе фторопласта-4. — В кн.: Полимеры в машиностроении. Том VI. Изд-во Харьковского Гос. Университета, 1972, с. 120.
30. Лазар М., Радо Р., Климан Н. Фторопласты. М.—Л., «Энергия», 1965.
31. Липатов Ю. С. Физико-химия наполненных полимеров. Киев, «Наукова Думка», 1967, 234 с.
32. Майорова Л. А. Твердые неорганические вещества в качестве высокотемпературных смазок. М., «Наука», 1971, 96 с.
33. Матвеевский Р. М. Исследование трения некоторых пластмасс на машине КТ-2 в условиях смазки и без смазки. — В кн.: Пластмассы как антифрикционные материалы. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 22.
34. Матвеевский Р. М., Поздняков В. В., Семенов А. П. Влияние наполнителей на износостойкость фторопласта-4 при трении по стали без смазки. — В кн.: Пластмассы в подшипниках скольжения. М., «Наука», 1965, с. 65.
35. Металлопластмассовые материалы на основе несферических порошков. — «Порошковая металлургия», 1969, № 6, с. 71—76. Авт.: И. М. Федорченко, Л. И. Пугина, И. И. Белобородов, В. Ф. Афанасьев, С. Е. Кондратюк.
36. Металлофторопластовые подшипники скольжения (МФПС) в агрегатных станках. — В кн.: Металлообрабатывающие станки и автоматические линии. Вып. 5, М., 1973, НИИМАШ, с. 28—31. Авт.: Э. А. Майорова, А. Л. Левин, В. М. Лебусев, В. С. Кутаренко.
37. Металлофторопластовый ленточный материал для подшипников, работающих без смазки. — В кн.: Полимеры в маш. М., НИИМАШ, с.

рия С-IX, 1968, с. 249. Авт.: А. А. Кокорев, В. В. Саклинский, Н. С. Зорина, Н. И. Дорошенко, А. А. Жуков, С. Я. Дынкина, Н. Д. Похил, А. П. Семенов.

38. Пластмассы как антифрикционные материалы. Изд-во АН СССР, М., 1961.

39. Подшипники из металлофторопластовой ленты и их применение в текстильном машиностроении. М., ЦНИИТЭлегпишемаш, 1969, 88 с. Авт.: Н. И. Дорошенко, П. Г. Шишляков, В. И. Любвин, А. А. Жуков, С. Я. Дынкина.

40. Подшипники с газовой смазкой. Пер. с англ. Под ред. Н. С. Грессема и Дж. У. Пауэлла. М., «Мир», 1966, 424 с.

41. Подшипниковый материал для тяжелого пускового трения. — «Вестник машиностроения», 1960, № 11, с. 50. Авт.: А. К. Дьячков, Н. Л. Летков, А. А. Кокорев, С. В. Бельская.

42. Полимерные материалы в узлах трения. М., НИИМАШ, С-IX, 1969, 104 с.

43. Применение материалов на основе пластмасс для опор скольжения и уплотнений в машинах. М., «Наука», 1968, 152 с.

44. Применение полимеров в качестве антифрикционных материалов. Днепродзержинск, НТО Машпром, 1971, 234 с.

45. Савинский Ю. Э. Исследование металлофторопластовых подшипников несущего винта вертолета. — В кн.: Методы испытания и оценки служебных свойств материалов для подшипников скольжения. М., «Наука», 1972, с. 122.

46. Савинский Ю. Э. Применение металлофторопластовых подшипников в тяжело нагруженных узлах трения. — «Машиноведение», 1971, № 1, с. 95.

47. Савинский Ю. Э., Семенов А. П. Исследование не требующих смазки металлофторопластовых подшипников применительно к узлам трения колебательного движения. — В кн.: Проблемы трения и изнашивания. Киев, «Техніка», 1972, с. 94.

48. Саммерс-Смит. Опыт эксплуатации поршневых колец из ПТФЭ с наполнителями. — «Проблемы трения и смазки». 1971, т. 93, серия F, № 2, с. 81.

49. Самосмазывающийся антифрикционный бронзофторопластовый материал. — «Известия вузов СССР. Цветная металлургия». 1969, № 1, с. 132—137. Авт.: Г. А. Меерсон, В. Г. Тимофеев, С. С. Кипарисов, Б. А. Журавлев, Л. А. Солонникова, С. Х. Ким, М. П. Шебенко.

50. Сапожников В. А., Плотников А. Е. Температурный режим подшипников скольжения швейных машин. — В кн.: Технология машиностроения. ЦНИИТЭлегпишемаш, М., 1970, вып. 6, с. 19.

51. Свойства и применение антифрикционных самосмазывающихся материалов. М., ЦНИИ Информации и ТЭИ Цветной металлургии, 1970, 146 с.

52. Северин П. А. Получение металлополимерных антифрикционных материалов на основе полнотетрафторэтилена и их свойства. — В кн.: «Полимеры в машинах». М., НИИМАШ, серия С-IX, 1968, с. 325.

53. Северин П. А., Гороховский Г. А. Эффективность заполнения пористых металлических каркасов фторопластом-4. — В кн.: Применение материалов на основе пластмасс для опор скольжения и уплотнений в машинах. М., «Наука», 1968, с. 41.

54. Семак И. Т. Повышение износостойкости и надежности шарнирных подшипников. — В кн.: Повышение износостойкости и срока службы машин. Киев, УкрНИИТИ, 1970, Вып. V, с. 68—73.

55. Семенов А. П. Антифрикционные материалы, содержащие фторопласт-4. — «Машиностроитель», 1963, № 7, с. 16.

56. Семенов А. П. Подшипники скольжения (к организации новой отрасли машиностроительного производства). М., НИИМАШ, сер. С-XI, 1969, 72 с.

57. Семенов А. П. Штамповка вкладышей подшипников из биметаллической катаной полосы сталь-пластичный алюминиевый сплав. — «Вестник машиностроения», 1956, № 6, с. 40—45.

58. Семенов А. П., Матвеевский Р. М. Физико-механические и антифрикционные свойства подшипниковых самосмазывающихся материалов, содержащих фторопласт-4. — В кн.: Конструкционные свойства пластмасс. М., «Машиностроение», 1968, с. 199.

59. Семенов А. П., Матвеевский Р. М., Поздняков В. В. Технология изготовления и свойства содержащих фторопласт антифрикционных материалов. М., Изд-во АН СССР, 1963, 64 с.

60. Семенов А. П., Поздняков В. В. Исследование антифрикционных свойств пластмасс при трении со смазкой и без смазки. — В кн.: Пластмассы как антифрикционные материалы. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 60.

61. Семенов А. П., Поздняков В. В., Крапошнина Л. Б. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами и сплавами. М., «Наука», 1974, 109 с.

62. Сентюрихина Л. Н., Опарина Е. М. Твердые дисульфид-молибденовые смазки. М., «Химия», 1966, 152 с.

63. Фачслер, Тейбер. Влияние газовой среды на характеристики износа наполненного ПТФЭ. — «Проблемы трения и смазки», 1971, т. 93, серия F, № 3, с. 110.

64. Федорченко И. М., Андриевский Р. А. Основы порошковой металлургии. Киев, Изд-во АН СССР, 1963, 420 с.

65. Хрущов М. М. Принципы лабораторных испытаний материалов для подшипников скольжения. — В кн.: Методы испытания и оценки служебных свойств материалов для подшипников скольжения. М., «Наука», 1972, с. 5.

66. Хрущов М. М., Семенов А. П. Организация специализированного производства подшипников скольжения — путь к повышенной надежности и долговечности машин. — «Вестник машиностроения», 1963, № 1 с. 7—9.

67. Чегодаев Д. Д., Наумова З. К., Дунаевская Ц. С. Фторопласты. Л., Госхимиздат, 1960, 192 с.

68. Чегодаев Д. Д., Явзин Н. Е. Применение суспензии фторопласта-4. Л., изд. ЛДНТИ, 1960, 24 с.

69. Шишляков П. Г. Точная штамповка втулок сухого трения. — «Кузнечно-штамповочное производство», 1966, № 8, с. 23.

70. Шуберт. Влияние газовой атмосферы и ее влажности на износ деталей из полнотетрафторэтилена при скольжении. — «Проблемы трения и смазки». 1971, т. 93, серия F, № 2, с. 4.

71. Blainey A. Fluon-impregnated self-lubricating bearing materials. Symposium on Powder Metallurgy, 1954. The Iron and Steel Institute. Special Report N 58, 1956, p. 222.

72. Bowden F. P. Frictional properties of porous metal impregnated with plastic. Research. 1950, vol. 3, p. 147.

73. Bowden F. P. and Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids. Oxford. Part I, 1950, Part II, 1964.

74. Chironis N. P. Woven-Teflon Bearings run Dry for Lifetime. Product Engineering. 1970, vol. 41, N 6, p. 136—138.

75. Flom D. G., Porill N. T. Friction sliding on teflon. J. Applied Physic. 1955, vol. 26, N 9, p. 1088.

76. Forrester P. G. and Beddow J. K. The Continuous Sintering of Copper-Lead to Steel. — «Powder Metallurgy», 1960, N 5, p. 149.

77. Fusaro R. L., Sliney H. E. Graphite Fluoride (CF<sub>x</sub>)<sub>n</sub>-A New Solid Lubricant. ASLE Trans., 1970, vol. 13, N 1, p. 56—65.

78. International Conference on Solid Lubrication 1971. ASLE Proceedings. ASLE SP-3, 1971, p. 402.

79. Jamison W. E., Cosgrove S. L. Friction Characteristics of transition-metal disulfides and diselenides. ASLE Transactions. 1971, vol. 14, N 1, p. 62—72.

80. Kay E. The corrosion of steel in contact with molybdenum disulphide. Wear, 1968, vol. 12, N 3, p. 165—171.

81. Lager mit Teflon — Gleitschicht. Werkstatt und Betrieb. 1969, Bd. 102, N 4, S. 224.

82. Lancaster J. K. Lubrication of carbon fibre-reinforced polymers. Wear, 1972, vol. 20, p. 315—352.

83. Lancaster J. K. Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance. Tribology, 1973, vol. 6, N 6, p. 219—252.

84. McLaren K. G. and Tabor D. Friction of Polymers at Engineering Speeds: Influence of Speed Temperature and Lubricants. Lubrication and Wear Convention. 1963, p. 52.

85. Makinson K. R. and Tabor D. Friction and transfer of polytetrafluoroethylene. Nature, 1961, vol. 201, N 4918, p. 464—466.

86. Mann R. Einschätzung der Eigenschaften wartungsfreier Sprellaflon. Maschinenbautechnik. 1968, N 2, S. 107.
87. Mitchell D. C. The Wear of PTFE-impregnated Metal Bearing Materials. Proc. Conf. on Lubrication and Wear. London 1—3 October, 1957, p. 396.
88. Mitchell D. C. and Starkey D. A. Properties and Applications «DU» unlubricated PTFE-type Bearings. Engineer's Digest, 1958, vol. XIX, N 4.
89. Morgan V. T. and Cameron A. Mechanism of Lubrication in Porous Metal Bearings. Proc. of the Conf. on Lubrication and Wear. London, 1—3 October 1957, p. 151, 405, 775, 877.
90. Neale M. J. Selection of Bearings. In: «Lubrication and Wear: Fundamentals and Application to Design». The Inst. of Mech. Engineers Proceeding 1967—68, vol. 182, part 3A, p. 547.
91. Peace J. B. Solid lubricants. In: «Lubrication and Lubricants». Ed. by E. R. Braithwaite. Elsevier Publishing Company. 1967, p. 67.
92. Polyslip Bearings. Scientific Lubrication. 1958, vol. 10, N 11, p. 34, 1960, vol. 12, N 10, p. 24.
93. Pooley C. M., Tabor D. Transfer of PTFE and Related Polymers in a Sliding Experiments. Nature Physical Science. 1972, vol. 237, N 75, p. 88.
94. Pratt G. C. Plastic-Based Bearings. In: «Lubrication and Lubricants» (Ed. by E. R. Braithwaite). Elsevier Publishing Company. 1967, p. 377.
95. Pratt G. C. and Wilson W. H. The performance of steel-backed acetal copolymer bearings. Wear. 1968, vol. 12, N 2, p. 73.
96. Rudner M. A. Fluorocarbons. Reinhold Publ. Corporation, N. Y., 1958, p. 238.
97. Spreadborough J. The frictional behaviour of graphite. Wear, 1962, vol. 5, N 1, p. 18.
98. Symposium on Powder Metallurgy. The Iron and Steel Institute. Special Report N 38, 1947, p. 23, p. 105. Special Report N 58, 1956, p. 213, p. 219.
99. Trockenlager für Verschiedene verwendungszwecke «Werkstatt und Betrieb» 1970, 103, N 7, p. 530.
100. Uetz H., Breckel H. Reibungs- und Verschleissversuche mit PTFE. Wear, 1967, vol. 10, N 3, p. 185; N 4, p. 261.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Современные подшипники в машинах и механизмах	5
1. Области применения подшипников качения и скольжения	5
2. Общие сведения о самосмазывающихся подшипниках	8
3. Критерии работоспособности несмазываемых подшипников скольжения	10
Глава II. Свойства компонентов антифрикционных фторопластовых материалов	15
1. Фторополимеры (или фторопласты)	15
2. Наполнители фторопласта	26
Глава III. Подшипниковые материалы, содержащие фторопласт	39
1. Чистый фторопласт	41
2. Фторопластовые ткани	53
3. Наполненные фторопласты	55
4. Пропитанные фторопластом пористые материалы	67
5. Ленточные материалы со стальной конструкционной основой	68
Глава IV. Технологи́я изготовления подшипниковых материалов и подшипников из них	75
1. Фторопласт с наполнителями	75
2. Методы пропитки фторопластом (чистым и с наполнителями) пористых материалов	78
3. Пропитанные фторопластом пористые материалы	88
4. Металлофторопластовые неразрезные подшипники	91
5. Металлофторопластовые подшипники из ленточного материала	93
Глава V. Служебные свойства металлофторопластовых подшипников при колебательном движении	114
1. Общие сведения об условиях работы	114
2. Конструкции узлов трения, строение и прочностные свойства металлофторопластового материала	117
3. Лабораторные установки и стенды для испытаний на трение и изнашивание	122
4. Методика испытания на трение и изнашивание	131
5. Изнашивание и трение радиальных и шарнирных подшипников	135
6. Изнашивание и трение упорных шайб	146
7. Оценка долговечности подшипников в условиях колебательного движения и пути повышения долговечности	151
	191

<b>Глава VI. Служебные свойства металлофторопластовых подшипников при вращательном движении</b>	159
1. Лабораторные установки и стенды	159
2. Испытание на изнашивание материала марки «DP»	161
3. Служебные свойства подшипников марки «DU»	167
4. Служебные свойства подшипников производства Клинковского машиностроительного завода	170
5. Сравнительное испытание на износ и трение металлофторопластового материала отечественного и зарубежного производства	175
<b>Глава VII. Применение металлофторопластовых подшипников</b>	177
1. Условия эксплуатации, благоприятствующие применению металлофторопластовых подшипников	177
2. Опыт применения металлофторопластовых подшипников в различных отраслях машиностроения	180
Список литературы	186