

УДК 621.822.9

Подшипники скольжения из полимерных антифрикционных материалов для роторных машин

Designs of plain bearings from fluoroplastic, polyimide, polyamide, polycarbonate, polyarylate and other antifrictional polymeric materials for rotor machines of refrigeration equipment have been considered. Their advantages and disadvantages under different conditions are shown.

Радиальные подшипники скольжения из полимерных антифрикционных материалов, работающие без смазочного материала или при одноразовом смазывании (например, пластическими смазочными материалами), получили широкое распространение в роторных машинах холодильной техники [2,10]. Работоспособность этих подшипников существенно влияет на безотказность, долговечность, ремонтпригодность роторных машин.

При подборе и конструировании подшипников скольжения к ним предъявляются следующие требования:

высокая надежность на всех режимах работы, включая пуски и остановки;

работоспособность в среде с низкими и высокими температурами, высоким давлением и возможными загрязнениями;

отсутствие склонности материалов, применяемых для трущихся пар подшипников, к самосвариванию и схватыванию в аварийных ситуациях;

материалы для изготовления подшипников должны быть технологичными, дешевыми и взаимно совместимыми;

хорошая ремонтпригодность;

относительно малая чувствительность к изменению нагрузки, нарушению заданной соосности опор в процессе работы, достаточная вибростойкость.

Выбор конструкции подшипника скольжения и материала для его изготовления зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются нагрузки (статическая и динамическая), требуемый ресурс работы, окружная скорость вала, условия смазки, параметры окружающей среды, размеры вала, расстояние между опорами и т. д.

В качестве антифрикционных полимерных материалов для изготовления подшипников скольжения и направляющих втулок арматуры, работающих при низкой температуре, применяются фторопласты, полиимиды, полиамиды, поликарбонаты, полиарилаты и т. п.

Фторопластовые материалы отличаются низким коэффициентом трения при работе без смазки, высокой стойкостью в хладагентах, кислотах и щелочах в широком температурном диапазоне (от -200 до 300 °С). Однако механическая прочность фторопластов неве-

лика, поэтому применение их в чистом виде ограничено. Хладотекучесть и низкую износостойкость фторопластов можно значительно улучшить химическим модифицированием исходного полимера на стадии синтеза путем внедрения в реакционную смесь мономеров гексафторпропилена, трифторхлорэтилена, различных перфторированных эфиров. Полученные системы в отличие от исходного фторопласта-4 обладают рядом преимуществ [3, 16]. Так, по хладотекучести наполненные модифицированные фторопласты превосходят не только обычный фторопласт-4, но и такие серийно выпускаемые композиты, как Ф4К20, Ф4С15М5 и др. Их износостойкость по сравнению с фторопластом-4 в 1,5 – 2 раза выше. Это связано с разветвлением молекулы политетрафторэтилена при введении модифицирующих мономеров, а следовательно, и ростом конформационной подвижности макромолекул, снижением плотности их упаковки, уменьшением времени релаксации. Выбирая тот или иной модификатор, можно регулировать степень разветвленности макромолекулы и соответственно управлять свойствами материала.

Наиболее широко применяются в подшипниках скольжения, работающих при низких температурах, антифрикционные материалы на основе фторопласта-4 марок: АМИП-15М, 4К20, 4С15М5. Однако, обладая низкой теплопроводностью и недостаточной механической прочностью, эти материалы работоспособны при небольших значениях $p \cdot v = 0,8 \dots 1,0$ (где p – удельная нагрузка, МПа; v – относительная скорость скольжения, м/с).

Удобен при монтаже двухбортный подшипник скольжения [4] фирмы Performance Plastics Co. (США), изготовленный из самосмазывающегося материала типа наполненной фторопластовой композиции. Подшипник выполняется в виде втулки с наружными буртами 1 и 4 с обеих сторон (рис. 1) и предназначен для установки в отверстие стенки, которое имеет диаметр, равный наружному диаметру втулки. Для установки в отверстие втулка имеет сквозную прорезь 5 на всю длину, причем прорезь ориентирована под углом к оси втулки. На буртах в зонах рядом с прорезью выполняются выемки 3 и 6, обеспечивающие возможность деформации в зоне буртов до диаметра, соответствующего диаметру от-

верстия. После установки в отверстие втулка принимает исходную форму, а бурты обеспечивают фиксацию втулки в осевом направлении. Втулка имеет также выступ 2, взаимодействующий с выемкой на стенке для предотвращения проворота втулки.

Для изготовления подшипников скольжения [11] фирма Nadella GmbH (Германия) разработала новый антифрикционный материал марки Frelon на основе модифицированного фторопласта. Подшипники, изготовленные из этого материала, отличаются надежностью, небольшими габаритными размерами, легким монтажом, способны работать в режиме сухого трения, имеют высокую химическую стойкость, высокие демпфирующие и электроизоляционные свойства.

Подшипники скольжения серии В фирмы SKF – Composite GmbH (Германия) [7] изготавливают из специального наполненного фторопласта. Предназначены они для работы при высоких нагрузках и относительно медленной частоте вращения. Надежная работа подшипников обеспечивается при температурах от -200 до $+250$ °С.

Все большее применение для изготовления подшипников скольжения, работающих без смазывания, находят композиционные материалы на основе полиимида, полиамида, поликарбоната и т. п., отличающиеся технологичностью изготовления, износостойкостью и высокими физико-механическими характеристиками, а также возможностью их регулирования в широких пределах.

Подшипники скольжения марки Iglidur NM7-56 [13]

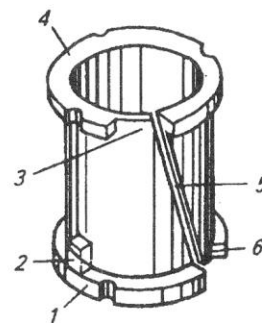


Рис. 1. Двухбортный разрезной подшипник скольжения из наполненной фторопластовой композиции

из полимерного материала типа полиимида фирмы Icus GmbH (Германия) успешно работают без смазки в условиях запыленной воздушной среды при температурах от -40 до $+80$ °С. Подшипники имеют низкий коэффициент трения и большой ресурс работы.

При больших удельных нагрузках (до 20 МПа) и низкой температуре для изготовления подшипников скольжения применяют антифрикционный материал ПАМ-50, в котором в качестве связующего использован полиимид [1]. Для улучшения антифрикционных свойств и повышения ресурса работы в его состав введены сухие смазки – графит и нитрид бора.

Повышенной износостойкостью и низким трением обладает подшипник скольжения [5], изготовленный из антифрикционного термопласта способом литья под давлением. Состав термопласта (мас. %): полиамид 50 – 95, минеральный наполнитель (мел, слюда, стекловолокно, каолин и т. п.) 40 – 4, антифрикционная добавка (дисульфид молибдена, графит, ультрадисперсионный алмаз и т. п.), технологическая добавка (полиэтилен, фторопласт и т. п.). Как показали эксперименты, при использовании в составе менее 50 мас.% полиамида прочностные и антифрикционные свойства композиции резко ухудшаются, а при применении более 95 мас.% нельзя для улучшения характеристик композиционного материала включать необходимые добавки. Добавление более 40 мас.% минерального наполнителя ухудшает механические и реологические свойства композита, а менее 4 мас.% не позволяет достигнуть необходимых твердости и теплостойкости.

Внесение более 5 мас.% антифрикционной и технологической добавок не дает эффекта и удорожает композицию, а менее 0,5 мас.% не позволяет улучшить перерабатываемость материала и его антифрикционные свойства.

Большим ресурсом работы отличается подшипник скольжения [6] с гидродинамическим эффектом, запатентованный в США. Подшипник состоит из вкладыша 3 (рис.2) из полимерного материала типа полиамида, в котором только в одном направлении вращается вал 1. Во вкладыше 3 имеются сегменты 2, образованные окружными и радиальными прорезями. При этом каждый сегмент имеет входную 7 и выходную 4 кромки, утолщение 6 и податливую часть 5. В процессе эксплуатации подшипника воспринимаемая валом 1 нагрузка через пленку смазочной жидкости передается сегментам 2, которые упруго деформируются на участках 5. В результате пленка смазочной жидкости между вкладышем 3 и валом 1 приобретает в зоне нагружения клинообразную форму в поперечном сечении: за-

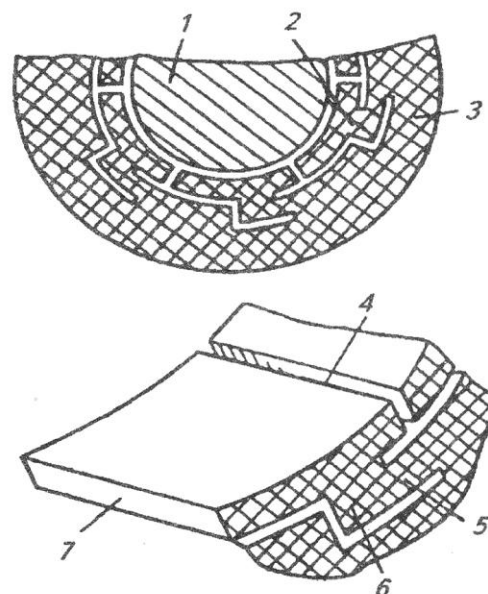


Рис.2. Полиамидный подшипник скольжения с гидродинамическим эффектом

зор в области кромки 7 сегмента 2 в 2 – 5 раз больше, чем зазор в области кромки 4, при этом обеспечивается жидкостное трение между вращающимся валом 1 и вкладышем 3.

Один из наиболее рациональных путей повышения эффективности работы металлических подшипников скольжения – нанесение на их рабочие поверхности тонкослойных антифрикционных полимерных покрытий. В этом случае достигают сочетания высокой механической прочности, присущей металлам, с хорошими антифрикционными свойствами полимеров. Использование тонких слоев полимеров позволяет в значительной мере устранить ряд существенных недостатков: невысокую теплопроводность и вследствие этого плохой отвод теплоты от поверхностей трения, значительную деформацию под нагрузкой и большой температурный коэффициент линейного расширения. Сравнение износостойкости стальных втулок с тонкослойными (500 – 600 мкм) поликапроамидными покрытиями с износостойкостью

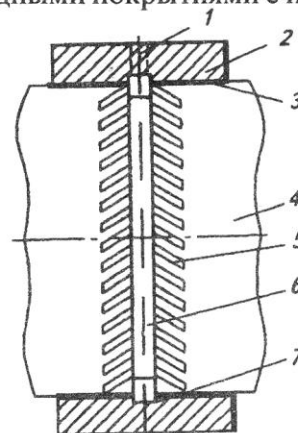


Рис.3. Гидродинамический подшипник скольжения с полиимидным слоем на рабочей поверхности

поликапроамидных литых и бронзовых втулок показывает, что износ первых в 3 – 7 раз меньше, причем износ контртела (стального вала) в первом случае также меньше.

Для высокоскоростных и сильно нагруженных валов предназначен гидродинамический подшипник скольжения [7], содержащий вкладыш 2 (рис.3), на рабочую поверхность которого нанесен слой 3 из антифрикционного полимера, например полиимида, и выполнена кольцевая канавка 7. Во вкладыше 2 вращается вал 4 с имеющейся на нем кольцевой канавкой 6, от которой под острым углом к направлению вращения вала 4 отходят уменьшающиеся плавно по поперечному сечению канавки 5, при этом канавка 7 во вкладыше 2 совпадает с канавкой 6 вала 4. Смазочная жидкость из радиального канала 1 во вкладыше 2 поступает в канавки 7 и 6 и подхватывается канавками 5, которые при вращении вала 4 за счет гидродинамического эффекта создают повышенное давление жидкости в зазоре между вкладышем 2 и валом 4. Таким образом, гидродинамический подшипник скольжения работает в режиме жидкостного трения при вращающемся вале 4 и отличается большим ресурсом работы.

Фирма Igus GmbH (Германия) выпускает подшипники скольжения типа PER [17], состоящие из двух кольцевых деталей, устанавливаемых на вал и в корпус. Детали имеют на рабочих поверхностях специальные полимерные антифрикционные покрытия на основе полиимида, обеспечивающие повышенную износостойкость при контактных давлениях в паре трения до 5 Н/мм². Подшипники обладают низким уровнем шума и высокими триботехническими показателями.

Технологичен в изготовлении и имеет большой ресурс работы подшипник скольжения [8], содержащий антифрикционный и конструкционный слои с соотношением их толщин от 1:1 до 1:14. Антифрикционный слой выполнен из композиционного материала следующего состава (мас.%): полиоксадиазольная ткань 33 – 75, терморепаративное связующее 50 – 55, графит 2 – 15, причем нити полиоксадиазольной ткани имеют от 40 до 400 кручений на 1 пог. м, что обеспечивает равномерный износ по всей площади скольжения. Конструкционный слой изготовлен монолитным или перфорированным со стороны корпуса подшипника из слоистого или хаотично армированного стеклопластика или текстолита, что повышает устойчивость подшипника к ударным нагрузкам. Перфорация конструкционного слоя выполняется в форме круга, овала, квадрата или прямоугольника, причем ее глубина составляет 0,1...0,8 толщины конструкционного слоя, а отношение площади

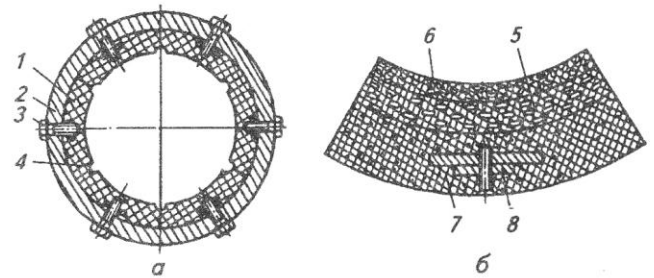


Рис.4. Подшипник скольжения с многослойными сегментами:
а – подшипник в сборе; б – сегмент подшипника

перфорации к площади материала может быть от 1:5 до 6:1. Это позволяет значительно снизить расход материала конструкционного слоя без ухудшения характеристик подшипника по трению, износу, ударной нагрузке и сроку службы в целом.

Фирма Du Pont Engineering Fibres (Швейцария) выпускает ткань на основе фторопластовых волокон, применение которой в самосмазывающихся подшипниках скольжения [14] по сравнению с фторопластом и его пленками более эффективно. Так, ткань обладает уникальными физико-механическими свойствами, во много раз превосходящими свойства исходного полимера: модуль упругости у нее выше в 10 раз, прочность при растяжении – в 25 раз. При изготовлении подшипников скольжения с металлическим корпусом ткань приклеивается, а при изготовлении с корпусом из стеклопластика стеклопластиковая лента наматывается на закрепленный на дорне слой ткани из фторопластовых волокон. Подшипники скольжения имеют низкий коэффициент трения и отличаются большим сроком службы.

Большой ресурс работы имеет подшипник скольжения [9], работающий в различных жидкостях. Подшипник-втулка состоит из шести сегментов 1 (рис.4, а), закрепленных в корпусе 2 болтами 3. Между сегментами со стороны вала расположены каналы 4 для протока жидкости, охлаждающей и смазывающей подшипник. Каждый сегмент (рис.4, б) снабжен антифрикционным тканевым слоем 6, упругим демпфирующим слоем 5 и жестким слоем 7. Антифрикционный слой 6 содержит углеродные волокна, связанные полимерной матрицей, и порошковые антифрикционные наполнители: фторопласт, графит, углеродные сорбенты косточковых растений. Упругий демпфирующий слой 5 содержит стекловолокно, связанное полимерной матрицей, и упругие частицы, например резиновую крошку. Жесткий слой 7 содержит металлическую подложку 8 и твердые частицы с высоким модулем упругости, например песок. Подшипник скольжения устанавливают на его рабочее место в машине так, что антифрикционный

тканевый слой 6 взаимодействует с шейкой вала. При работе машины нагрузку от вала воспринимает антифрикционный слой 6, передает ее на упругий слой 5 и далее через жесткий слой 7 на корпус 2 подшипника. В упругом слое 5 происходит гашение колебаний, что снижает вибрацию машины. Прочность сцепления корпуса 2 с сегментами 1 обеспечена благодаря наличию жесткого слоя 7 с металлической подложкой 8. На сопрягаемых поверхностях антифрикционного тканевого слоя 6 и шейки вала вследствие трения вала о слой происходят процессы трибострукции полимерной матрицы и порошков из фторопласта, графита, углеродных сорбентов косточковых растений, образующих пленку переноса, снижающую коэффициент трения и интенсивность износа подшипника и шеек вала. Сочетание трехслойной структуры сегментов 1 подшипника скольжения обеспечивает высокие износостойкость и ресурс подшипника скольжения, а также стабильность его работы.

Фирма Glacier DX GmbH (Германия) выпускает подшипники скольжения из стали повышенной механической прочности [15]. На рабочую поверхность подшипников наносится слой из бронзы с антифрикционными полимерными включениями с образованием небольших углублений для удержания смазочного материала. Подшипники надежно работают при температуре от -40 до $+120$ °С.

Антифрикционные материалы для подшипников скольжения роторных машин холодильной техники выбираются в зависимости от свойств смазки или рабочей среды, ее температуры и давления, скорости скольжения по валу, величины контактных напряжений в паре трения, теплоотвода из зоны трения, требуемого срока службы в эксплуатации.

От выбранного материала зависит конструктивное оформление подшипников скольжения. Конструкции подшипников разрабатываются с учетом свойств материалов так, чтобы свести к минимуму или полностью устранить влияние отрицательных характеристик полимерного материала (низкую теплопроводность, хрупкость, гигроскопичность, нестабильность размеров во времени и др.) и наиболее полно использовать низкий коэффициент трения и высокую износостойкость материала.

Эффективность работы подшипников скольжения повышается за счет нанесения на их рабочие поверхности антифрикционных полимерных покрытий или использования тонких полимерных пленок. Опыт эксплуатации подшипников скольжения с такими тонкими покрытиями при низких температурах показывает, что их ан-

тифрикционные свойства определяются не только свойствами материала покрытия, но и его толщиной.

Трение пары подшипник – вал – сложное явление, зависящее от многих процессов (механических, теплофизических, физико-химических, электромеханических), протекающих на границе раздела двух твердых тел в зонах фактического касания, и процессов, происходящих в тонких поверхностных слоях твердых тел. Поэтому выбор оптимальных полимерных антифрикционных материалов для пар трения подшипников скольжения по износостойкости следует проверять экспериментально и в условиях эксплуатации роторных машин холодильной техники.

Список литературы

1. Беляков В.П. Криогенная техника и технология. – М.: Энергоиздат, 1982.
2. Буренин В.В. Подшипники скольжения из резины и других материалов для вращающихся валов машин и механизмов: Тематический обзор. – М.: ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ, 1995.
3. Кураченко В.Н., Анисимов В.Н., Трофимович А.Н., Страхов В.В. Новые полимерные материалы для узлов трения оборудования химических производств // Химическое и нефтяное машиностроение. 1988. № 4.
4. Патент 5145265 США, МКНФ16С 33/08. Оpubл. 08.09.92.
5. Патент 2086817 Россия, МКИ F 16 С 33/16. Узел трения скольжения / В.Г.Зыков, В.А.Полетаев. Оpubл. 10.08.97. Бюл. №22.
6. Патент 5228115 США, МКИ F 16 С 17/03 Оpubл. 29.06.93
7. Патент 2108496 Россия, МКИ F 16 С 17/02. Гидродинамический подшипник скольжения / В.Х.Туктамашев. Оpubл. 10.04.98. Бюл. № 8.
8. Патент 2130136 Россия, МКИ F 16 С, 33/12 33/24 Подшипник скольжения прокатного стана / П.А.Чукаловский, В.В.Муратов, А.О.Бондаренко, В.Г.Митин, Д.В.Пилецкий, Р.Н.Маркова. Оpubл. 10.05.99. Бюл. № 13.
9. Патент 2084717 Россия, МКИ F 16 С 33/18. Подшипник скольжения / Ю.А.Селезнев, Н.П.Селезнева, В.В.Большов, В.Н.Зинкин. Оpubл. 20.07.97. Бюл. № 20.
10. Gleitlager sind oftmals eine interessante Alternative // Produktion, 1995, №№ 25 – 26.
11. Gleitlager // Werkstatt und Betr., 1997, № 4.
12. Gleitflächen sind grau // Masch. und Werkzeug., 2000, № 9.
13. Gleitlager für Massenprodukte // Produktion, 1999, № 14.
14. Kärber Michael, Rola Martin. Teflon-Faser-Gewebe erhöht Leistungsfähigkeit von Lagern und Buchsen // Maschinenmarkt, 2000, № 34.
15. Materialverbund sorgt für feste und stabile Gleitlager // Zuliefermarkt. 1999, № 2.
16. Nieratscher J. Fluorkunststoffe // Kunststoffe, 1995, №10.
17. Und die Lauffläche ist auch schon drin // Produktion. 1999, № 20.