

Г. А. Борисов, И. Н. Колодяжная, А. Ш. Слепова

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

G. A. Borisov, I. N. Kolodyazhnaya, A. S. Slepova

IMPROVING THE RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS THROUGH THE APPLICATION OF MODERN POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются вакуумные насосные системы как пример сложных технических систем. Предметом исследования является повышение надежности вакуумных насосных систем путем замены штатных подшипников качения на подшипники скольжения, изготовленные из современных неметаллических композиционных материалов. Целью работы является рассмотрение возможности внедрения неметаллических композиционных материалов для оптимизации физических свойств деталей и агрегатов, ведущих к повышению надежности элементов и конструктивных узлов агрегатов. *Результаты.* Рассмотрены марки современных неметаллических материалов и их характеристики. Определены основные критерии выбора антифрикционного материала, предложены способы, подтверждающие эффективность предлагаемого решения повышения ресурса подшипников в узлах трения сложных технических систем. Приведены примеры внедрения полимерных композиционных материалов в различных областях машиностроения. *Выводы.* Широкий температурный диапазон и низкие значения коэффициентов трения неметаллических композиционных материалов позволят существенно продлить жизненный цикл узлов трения сложных технических систем, тем самым повысив надежность эксплуатации системы.

A b s t r a c t. *Background.* The object of research is vacuum pumping systems as an example of complex technical systems. The subject of the study is to increase the reliability of vacuum pumping systems by replacing rolling bearings with sliding bearings made of modern non-metallic composite materials. The purpose of the work is to consider the possibility of introducing non-metallic composite materials to optimize the physical properties of parts and assemblies leading to an increase in the reliability of elements and structural units of units. *Results.* The brands of modern non-metallic materials and their characteristics are considered. The main criteria for the choice of antifriction material are determined, and methods are proposed that confirm the effectiveness of the proposed solution to increase the life of bearings in the friction nodes of complex technical systems. Examples of the introduction of polymer composite materials in various fields of engineering are given. *Conclusions.* Wide temperature range and low values of friction coefficients of nonmetallic composite materials will allow to extend substantially the life cycle of the friction nodes of complex technical systems, thereby increasing the reliability of the system operation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сложные технические системы, надежность, антифрикционные материалы, подшипник.

К e y w o r d s: complex technical systems, reliability, antifriction materials, bearing.

Применение традиционных конструкционных материалов в сложных технических системах и агрегатах на сегодняшний день является неэффективным, так как, помимо низких показателей долговечности ввиду быстрой выработки их ресурса, наблюдается также удорожание технологических этапов производства и, как следствие, высокая себестоимость продукции. Этим объясняется повышенный интерес специалистов к внедрению современных полимерных композиционных материалов в различные отрасли машиностроения, автомобилестроения, космической и авиационной отрасли, в технологическое обеспечение этапов наземных работ подготовки ракетноносителей, а также в сельскохозяйственные машины и технику.

Большой интерес вызывает увеличение ресурса и продление жизненного цикла вакуумных насосных систем за счет замены традиционных материалов изготовления на полимерные композиционные материалы.

Надежность оборудования, которое эксплуатируется при высоких нагрузках с большими коэффициентами трения, экстремальных температурах и неравномерном режиме, определяется ресурсом материала изготовления конструктивных деталей и элементов изделия [1]. Поэтому использование антифрикционных материалов в узлах трения позволяет в значительной мере сократить трудоемкость изготовления деталей и уменьшить затраты на техническое обслуживание.

Для увеличения ресурса подшипниковых узлов и пар трения специалисты все большее внимание уделяют современным антифрикционным композиционным материалам [2, 3].

В целях уменьшения стоимости деталей из композиционных полимеров в качестве армирующих материалов используют комбинацию из углепластиков и стеклянных волокон [4]. Ввиду того, что стоимость углепластиков выше, их потребление меньше относительно стеклопластиков. Однако создание углеродистых волокон диаметром нескольких нанометров позволяет получить новые нанокompозиты с углеродным армирующим наполнителем повышенной прочности. На сегодняшний день в качестве основного сырья для получения углеродных волокнистых материалов используют полиакрилонитрильные волокна. Результатом их применения являются высокопрочные углеродные волокна. Известны такие представители композиционных материалов, как американские марки «Акрилон» и «Орлон», специальное акриловое волокно «Куртель», которое выпускается английской фирмой «Куртолдз», представитель Германии – марка «Дралон». Отечественная промышленность выпускает это волокно под фирменным названием «Нитрон».

Помимо ПАН-волокон, хорошо зарекомендовали себя арамидные волокна кевлар (США), армос (Россия) и ряд других.

Большое распространение в настоящее время получил карбон CF (углеродные волокна) – материал из тонких нитей (5–15 микрон в диаметре). Несколько тысяч углеродных волокон скручены вместе, образуя нити, из которых плетут ткань. Способы плетения влияют на некоторые физические свойства ткани. Карбон характеризуется высокой прочностью, износостойкостью. Он отличается высокой термостойкостью, сохранением формы и свойств до температуры 2273,15 К, хорошими виброгасящими свойствами и теплоемкостью, коррозионной стойкостью, высоким пределом прочности на разрыв и высоким пределом упругости.

Еще одним примером композита углеродных волокон является углеродистое графитовое волокно (*GFRP*), или по-другому *graphite fiber*, стекловолоконный армированный полимер *glass-(fiber)-reinforced polymer*. Данный композит отличается хорошей устойчивостью к температурам. Углеволотно совмещают также с кевларом, алюминием, стекловолокном для улучшения дополнительных физических свойств материала.

На сегодняшний день существует множество отечественных и зарубежных производителей полимерных композиционных материалов.

ООО «Овитэк» выпускает изделия из полимерных композиционных материалов оксафен и оксафен опм-94, которые превосходят по износостойкости бронзу и латунь в 2–3 раза, текстолит – в 4–12 раз [5].

В ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработаны антифрикционные углепластики на основе эпоксидных и фенольных термореактивных полимерных матриц и углеродных тканей – марок УГЭТ и ФУТ, а также новый антифрикционный углепластик на основе термопластичной матрицы – полифениленсульфида (ПФС), получивший название – УПФС.

Акционерное общество «Особое Конструкторско-технологическое бюро "Орион"» занимается производством антифрикционных самосмазывающихся биостойких композицион-

ных материалов под торговой маркой «Маслянит»: маслянит АСМК-112, маслянит АСМП-И, маслянит АСМК-112Л. «Масляниты» успешно эксплуатируются в узлах трения в космической и авиационной технике, в сельскохозяйственной, автомобильной технике, как подшипник скольжения – в гидротехнических сооружениях.

Компания «Кондор» предлагает антифрикционный материал Синтек-УМ, область применения которого связана с изготовлением подшипников скольжения и уплотнения узлов трения в различных средах без применения дополнительной смазки. Синтек-УМ характеризуется значением коэффициента трения 0,06–0,12, а температурный диапазон лежит в пределах от 77,15 до 573,15 К.

Приведем несколько примеров, в которых внедрение композитов может существенно продлить жизненный цикл сложных технических систем.

На сегодняшний день приобретен опыт применения в космической технике композиционных материалов. В связи с повышенной удельной прочностью и низким значением коэффициента термического расширения углеэпоксидных материалов они использованы в системе навигации спутника АТS-F, а также включены в его жесткие конструкции. Перспективным считается дальнейшее внедрение антифрикционных композиционных материалов в узлы трения различных сложных технических систем. Данные по использованию композитов в аэрокосмической технике представлены в работе [6].

Предметом исследования в этой работе является область возможности применения антифрикционных композиционных материалов в насосных системах, в том числе участвующих в процессе заправки ракет. На рис. 1 приведена схема центробежного насоса.

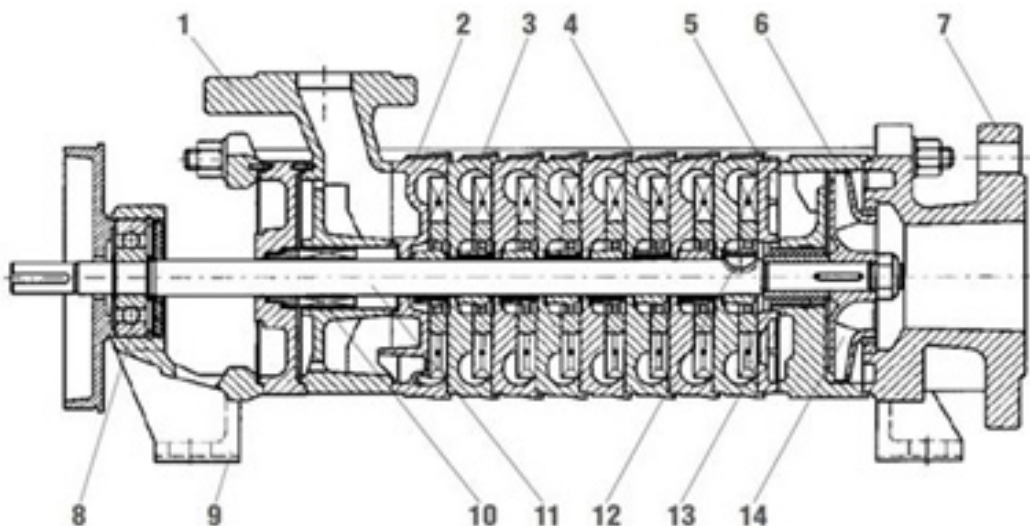


Рис. 1. Схема центробежного насоса: 1 – нагнетательный корпус; 2 – нагнетательный блок; 3 – нагнетательно-всасывающий блок; 4 – ротор; 5 – всасывающий блок; 6 – рулевой механизм; 7 – корпус всасывающий; 8 – шарикоподшипник; 9 – корпус подшипника; 10 – уплотнение вала; 11 – вал; 12 – сегментная шпонка; 13 – подшипник; 14 – центробежное рабочее колесо

Центробежные насосы (рис. 1), сообщающие топливу определённое давление при соответствующем расходе, определяемом временем заправки [7], используются подшипники качения, которые являются опорой быстровращающихся валов и должны быть надежными в работе.

При работе насоса с максимальной эффективностью подшипник должен выдерживать большую нагрузку [8]. Однако условия эксплуатации, специфичность жидкости, перекачиваемой в вакуумных насосах, ведут к преждевременному износу подшипников. Высокие нагрузки ведут к нагреву подшипника, а нагрев обуславливает уменьшение вязкости смазочных материалов, что ведет к потере способности нести нагрузку подшипникам. В свою очередь охлаждение внешней поверхности подшипника служит причиной высыхания смазки, увеличивает трение и создает дополнительную нагрузку.

Те же проблемы возникают и в ротационных вакуумных насосах установки УВУ-60/45, используемых в сельскохозяйственной технике, в том числе в доильных установках типа

УДА. По этой причине перспективным направлением можно считать повышение надежности таких конструктивных элементов, как подшипник в сельскохозяйственной технике путем замены штатного подшипника качения из традиционных материалов на подшипник скольжения из антифрикционных композиционных материалов, в частности углепластики. Существует множество конструкторских решений и разработаны различные узлы трения с применением материалов, имеющих повышенные антифрикционные свойства. Внедрение композитов как материалов, имеющих высокую стойкость к трению и истиранию, в структуру различных узлов трения существенно увеличит их ресурс. Компания SKF изготавливает скользящий слой подшипника из нитей высокопрочного полиэстера, который усилен политетрафторэтиленом (ПТФЕ), в матрице из эпоксидной смолы.

Наиболее широкое применение получили материалы из углепластиков. Свойства углепластиков обусловлены свойствами углеродного волокна. В частности, допустимый диапазон рабочих температур определяется их связующей. Стеклопластики на полиамидной основе повышают значения рабочих температур. Несмотря на невысокие напряжения сдвига и предела прочности при сжатии, углепластики обладают высокими показателями антифрикционных свойств, что делает возможным использование их как наполнитель для связующих, используемых для изготовления подшипников, втулок, прокладок.

Основными критериями выбора антифрикционных неметаллических полимерных материалов для модификации подшипников в насосных системах помимо стоимости являются коэффициент трения и рабочий температурный диапазон.

В табл. 1 приведена сравнительная характеристика наиболее популярных марок антифрикционных неметаллических материалов [9].

Таблица 1

Сравнительная характеристика антифрикционных неметаллических полимерных материалов для подшипников скольжения

Показатель	Маслянит К	Углепластики ФУТ	Углепластики УГЭТ
Плотность, кг/м ³	1150	1450	1450
Прочность при сжатии, МПа	49	150	200
Коэффициент термического расширения, 1/°С·10 ⁻⁵	9,5	1,6	1,6
Коэффициент трения	0,15	0,01	0,12
Рабочая температура, К	273,15...313,15	73,15...140	73,15...393,15

В работе [10] приведены результаты испытаний подшипников скольжения из полиформальдегида, которые представили превышение ресурсных показателей в два раза относительно штатной конструкции.

Таким образом, продемонстрировано, насколько широко применение неметаллических композиционных материалов, приведен ряд марок композитов, которые могут быть использованы для улучшения физических свойств конструктивных узлов агрегатов. На примере узлов трения насосных систем как способ повышения надежности предложено заменить штатные подшипники из традиционных материалов на подшипники скольжения из антифрикционных неметаллических материалов.

Библиографический список

1. Слепова, А. Ш. Анализ факторов, влияющих на износ подшипников / А. Ш. Слепова // Наука, техника и образование. – 2017. – № 10 (40). – С. 28–33.
2. Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам : в двух томах / Дж. Любин. – М. : Машиностроение, 1988. – Т. I. – 252 с.
3. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин, И. А. Алфутов, А. И. Бейль. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
4. Борисов, Г. А. Перспективные конструкционные материалы на основе полимеров для применения в сельскохозяйственной технике / Г. А. Борисов, И. Н. Колодяжная // Вестник РГАТУ. – 2010. – № 4. – 67 с.
5. Краснов А. П. «ОВИТЕК» – разработка и производство износостойких полимерных композиционных материалов / А. П. Краснов. – URL: <http://oxafen.ru/>
6. Sandvik coromant. – URL: <https://www.sandvik.coromant.com/>

7. Архаров, А. М. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов / А. М. Архаров, И. Д. Кунис. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 78 с.
8. Карелин, В. Я. Насосы и насосные станции : учебник / В. Я. Карелин, А. В. Минаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 320 с.
9. Маслянит антифрикционный материал // НПП Терминал. – URL: <http://maslyanit.ru/>
10. Колодяжная, И. Н. Технологическое обеспечение долговечности роликовых узлов картофелеуборочных машин применением подшипников скольжения их полимерных материалов : дис. ... канд. техн. наук / Колодяжная И. Н. – Рязань : РГАТУ, 2011. – 181 с.

Борисов Геннадий Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра технологии металлов и ремонта машин,
Рязанский государственный агротехнологический
университет им. П. А. Костычева
(Россия, г. Рязань, ул. Костычева, 1)
E-mail: tmirm@yandex.ru

Borisov Gennadiy Aleksandrovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of technology of metals
and repair of machines,
Ryazan State Agrotechnological University
named after P. A. Kostychev
(1 Kostycheva street, Ryazan, Russia)

Колодяжная Ирина Николаевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструкции и испытаний
летательных аппаратов,
Филиал Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
«Восход»
(Казахстан, г. Байконур, ул. Гагарина, 5)
E-mail: kin1958@rambler.ru

Kolodyazhnaya Irina Nikolaevna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design and testing aircraft,
Branch of Moscow Aviation Institute
(National Research University) "Voskhod"
(5 Gagarin street, Baikonur, Kazakhstan)

Слепова Альфия Шамилевна

старший преподаватель,
кафедра вычислительных систем и технологий,
Филиал Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
«Восход»
(Казахстан, г. Байконур, ул. Гагарина, 5)
E-mail: alf.slepova@yandex.ru

Slepova Al'fiya Shamilevna

senior lecturer,
sub-department of computer systems and technologies,
Branch of Moscow Aviation Institute
(National Research University) "Voskhod"
(5 Gagarin street, Baikonur, Kazakhstan)

УДК 621.822:621.763

Борисов, Г. А.

Повышение надежности сложных технических систем путем применения современных полимерных композиционных материалов / Г. А. Борисов, И. Н. Колодяжная, А. Ш. Слепова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 14–18. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-2.