

ПОДШИПНИКИ СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ АНТИФРИКЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ ДЛЯ АРМАТУРЫ ТРУБОПРОВОДОВ, ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ТЭК И НАСОСОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

УДК 678.067:539.538:621.822

В.Е. БАХАРЕВА
А.В. АНИСИМОВ
В.С. БОГУН

д-р техн. наук ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»
канд. техн. наук ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»
главный конструктор по насосам, ОАО «Пролетарский завод»

Санкт-Петербург
bogun@proletarsky.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

углепластик ФУТ, ФУТ-Б, УГЭТ, насос, арматура трубопроводов встроенный подшипник скольжения, системы ППД (поддержания пластового давления) и нефтесбора, магистральные нефтепроводы.

Обобщен опыт применения углепластиков ФУТ и ФУТ-Б в подшипниках скольжения арматуры трубопроводов, насосов ТЭК – магистральных нефтяных, откачивающих насосов, насосов ППД (поддержания пластового давления), насосов ЭУ (энергетических установок). Представлены результаты лабораторных и стендовых испытаний. Общее количество насосов с подшипниками из углепластика ФУТ и ФУТ-Б и арматуры трубопроводов с подшипниками из углепластика УГЭТ составляет более 1000 единиц, эти насосы и арматура трубопроводов предназначены для систем перекачки нефти, систем ППД и нефтесбора, питательных и конденсатных насосов ЭУ.

Ресурс и надежность центробежных насосов во многом зависят от выбора материала узлов трения. В больших насосах широко применяются подшипники скольжения, так как они имеют такие преимущества перед подшипниками качения, как высокая работоспособность в широком диапазоне температур, виброустойчивость, бесшумность, возможность применения в качестве смазочного материала перекачиваемой жидкости. В последнее время наблюдается тенденция по размещению подшипников скольжения внутри конструкции насосов, при этом уменьшаются размер насоса и межподшипниковые расстояния, улучшаются статические и динамические характеристики ротора насоса.

Подшипники скольжения, работающие в насосе, рассчитаны на режим жидкостного трения (гидродинамическая смазка). В них слой смазки отделяет рабочие поверхности цапфы и вкладыша друг от друга и исключает возможность непосредственного их контакта;

потери на трение в данном случае весьма малы. Для оценки антифрикционных материалов используются такие характеристики, как коэффициент трения, интенсивность изнашивания и мощность трения ρv (ρ – контактное давление, v – скорость скольжения) [1, 2].

При пуске и остановке насоса, когда частота вращения ротора мала, неизбежен переход к полужидкостному и граничному трению. В процессе работы на таком режиме происходит основной износ материалов трибосопряжения. Поэтому при выборе антифрикционных материалов особое внимание уделяется исследованию подшипников при граничном трении.

Насосостроение является одной из важнейших составных частей энергомашиностроения. Основной объем производства приходится на две группы:

- насосы энергетических установок - питательные, конденсатные и циркуляционные насосы для ТЭЦ, ТЭС, АЭС и судовых энергетических установок (СЭУ);

- насосы топливно-энергетического комплекса (ТЭК) – перекачка нефти и нефтепродуктов, системы поддержания пластового давления (ППД), используемые при добыче нефти.

Долгое время для подшипников скольжения применяли баббиты, бронзы, керамику, бронзофторопласт, твердые сплавы. Насосные заводы РФ и Украины до сих пор выпускают насосы с выносными подшипниками, смазываемыми маслом. Опыт эксплуатации показал, что по характеристикам насосов с подшипниками из этих материалов не удовлетворяют предъявляемым требованиям. Были отмечены аварийные случаи. Поэтому на практике широко используются импортные насосы, например фирм Sulzer Pumps Ltd, Grundfos Holding AG. В связи с вышеуказанным актуальным является изменение конструкции насосов, в частности, переход от выносных подшипников к встроенным и создание подшипников скольжения из новых материалов, способных работать на перекачиваемой жидкости.

С началом интенсивного строительства магистральных нефтепроводов, например, нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО) потребовались насосы очень большой производительности (10 000 м³/ч). В настоящий момент такие насосы в РФ не производятся, поэтому при строительстве первой ветки ВСТО использовали импортные насосы фирмы Sulzer Pumps Ltd. В связи с этим проблемы создания новых насосных агрегатов со встроенными подшипниками из новых антифрикционных материалов приобрели особую актуальность.

1. Материалы

Требования к материалу определяются условиями работы узлов трения. В качестве примеров приведены условия работы подшипников насосов энергетических установок (ЭУ) и ТЭК.

ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработаны и выпускаются подшипники на основе высокопрочных размерностабильных ▶

Насосный агрегат, частота вращения	Перекачиваемая жидкость	Скорость скольжения, м/с	Контактное давление, МПа	Температура перекачиваемой жидкости, °С
КЭНА 320-160*, 1000 мин ⁻¹	Вода	3,9	0,3	125
ПКБТ-230 Р2Э*, 7600 мин ⁻¹	То же	22	0,2	105
ПТН 20-35*, 8000 мин ⁻¹	- « -	25	0,2	60
	- « -	36	0,3	60
НОН 250-440*, 4000 мин ⁻¹	Нефть	30	0,2	30
АЦНА 250-75*, 2975 мин ⁻¹	Вода	39+31	1,0	40
ЦНС 180-1440**	Пресная, подтоварная вода, «сеноман», нефть	15+40	0,5+2,0	4+60

* - Выпускаются ОАО «Пролетарский завод»; ** - выпускаются ОАО «Воткинский завод».

Таб. 1. Условия работы подшипников насосов ЭУ и ТЭК

антифрикционных углепластиков марок ФУТ и ФУТ-Б [3,4], удовлетворяющие предъявляемым требованиям (табл.1). Базовый углепластик ФУТ состоит из углеродной ткани УРАЛ и фенолформальдегидного связующего. Углепластик ФУТ-Б дополнительно содержит комплексный модификатор на основе продукта взаимодействия баббита и нанопуллериода марки МУФ. Физико-механические свойства углепластиков приведены ниже (табл.2).

Кроме углепластиков ФУТ и ФУТ-Б для сравнения испытывали стали 95Х18 и 37Х12Н8Г8МФБ, бронзофторопласт и оловянистую бронзу марки Бр010Ф1.

2. Методики исследований

Применению подшипников из углепластиков в насосах предшествовал комплекс триботехнических испытаний, включающий лабораторные испытания по экспресс-методике, стендовые испытания и натурные испытания.

Лабораторные испытания проводили на машине трения марки ИИ5018 по экспресс-методике [5, 6] в воде по коррозионно-стойким сталям. Так как скорость скольжения в машине трения ограничена и составляет 1 м/с, контактное давление было увеличено до 40÷50 МПа. При испытаниях гидродинамический клин не образуется [7, 8], т.е. условия испытаний антифрикционных материалов моделируют режимы пуска и остановки насосов. Исследовали пары трения, в которых контртело – ролик диаметром 50 мм, шириной 16 мм и шероховатостью рабочей поверхности $Ra = 0,15 \pm 0,3$ мкм, и антифрикционный материал – брусок размером 10x10x100 мм, соответственно: сталь 95Х18 – ФУТ; 95Х18 – ФУТ-Б; 30Х13 – ФУТ; 30Х13 – 37Х12Н8Г8МФБ (ЭИ 481); бронзофторопласт – 95Х18; 95Х18 – 95Х18; 95Х18 – Бр010Ф1.

Стендовые испытания проводили на стенде, имитирующем работу циркуляционного насоса в среде обессоленной воды при температуре 119±122°C, избыточном давлении 0,4 МПа, средней скорости скольжения 16 м/с. Методика испытаний подробно описана в работе [9].

Испытания подшипников также проводили на ОАО «Пролетарский завод» на

насосах марок ПКБТ-230 Р2Э (питательный конденсатный бустерный турбонасос) при температуре 105°C и НОН 275-860/550-440 (откачивающий насос для перекачки нефти и нефтепродуктов [10]) при температуре 30°C.

3. Результаты испытаний и их обсуждение

Лабораторные триботехнические испытания показали, что при использовании модификации углепластика ФУТ износостойкость трибопары увеличивается (рисунок 1); коэффициент трения снижается (рисунок 2). Пары трения работают без задиров. При этом максимально допустимое давление в трибоконтате по сравнению с углепластиком ФУТ повысилось на 15±20 %.

Испытания показали, что допустимая удельная мощность сил трения $PV_{ср}$, МПа·м/с, составляет:

для пар сталь 95Х18 – ролик из стали 95Х18 и сталь 37Х12Н8Г8МФБ (ЭИ 481) – ролик из стали 30Х13	4-6
для пары бронза Бр.010Ф1 – ролик из стали 95Х18	15-17
для пар ФУТ – ролик из стали 95Х18 и ФУТ – ролик из стали 30Х13	41-43
для пары ФУТ-Б – ролик из стали 95Х18 и бронзофторопласт (ролик) по стали 95Х18	50-52

Лучшие результаты по удельной мощности сил трения показали пары с углепластиками ФУТ и ФУТ-Б. В паре бронзофторопласт – сталь 95Х18(ролик) при мощности трения 50÷52 наблюдался значительный износ ролика (свыше 0,5 мм).

Из рис. 1 видно, что максимальную износостойкость (минимальную линейную интенсивность изнашивания) имеют пары трения углепластик ФУТ-Б – сталь 95Х18 и образец из стали 95Х18 при трении по ролику из бронзофторопласта, при этом наблюдался существенный износ ролика. Углепластик марки ФУТ при трении по стали 95Х18 по износостойкости незначительно уступает углепластику марки ФУТ-Б.

	ФУТ	ФУТ-Б
Плотность, кг/м ³	1400±30	1430±30
Модуль нормальной упругости при растяжении, ГПа, в плоскости листа, по основе E_1	17	17
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, в плоскости листа, по основе σ_1	200	200
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа: в плоскости листа, по основе σ_1	200	200
в трансверсальном направлении σ_3	300	300
Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, МПа, $\tau_{1,3}$	20	20
Коэффициент теплопроводности вдоль волокон, Вт/(м·°С), не менее	0,9	1,1
Температурный коэффициент линейного расширения вдоль волокон $\times 10^6$	20	20
Допустимая температура СОЖ, не более	125	125

Таб. 2. Физико-механические свойства углепластиков

Таким образом, для дальнейших стендовых испытаний был выбран материал марки ФУТ-Б.

Результаты стендовых испытаний

Результаты испытаний (табл. 3) свидетельствуют о том, что углепластик марки ФУТ-Б работоспособен при температуре рабочей среды (перегретой воды) 119-122°C, контактном давлении 0,4 МПа, средней скорости скольжения 16 м/с и может быть рекомендован для работы в насосах энергетических установок.

Выводы о работоспособности углепластика марки ФУТ-Б при эксплуатации в перегретой воде были подтверждены при испытаниях подшипников на ОАО «Пролетарский завод» на насосах марок ПКБТ-230 Р2Э и НОН 275-860/550-440 (откачивающий насос для перекачки нефти и нефтепродуктов).

4. Применение углепластиков в насосах

В настоящее время наибольший опыт применения подшипников из углепластиков имеется в ТЭК в насосах систем ППД. Общее число насосов марки ЦНС различной производительности и напора с подшипниками из углепластика ФУТ составляет более 120. Эти насосы работают в таких нефтяных компаниях, как ОАО «ТАТНЕФТЬ», ОАО «Башнефть», ОАО «ЛУКОЙЛ-Пермь», ОАО «Сургутнефтегаз» ЗАО «ЛУКОЙЛ-Пермь» филиал Ватойл, ОАО «Тюменьнефтегаз», ОАО «Удмуртнефть», НК «Салым Петролиум Девелопмент» и др. Максимальная наработка подшипников составила 20 000 ч (гарантированный ресурс работы таких насосов 8 000 ч). Повысилась надежность подшипников и увеличился межремонтный срок эксплуатации.

Кроме того, замена традиционных выносных баббитовых подшипников скольжения на встроенные подшипники из углепластика ФУТ позволила:

- полностью устранить утечки перекачиваемой среды с нагнетательной стороны насоса;
- значительно (до 3 раз) снизить вибрационную нагрузку на узлы насоса за счет сближения опор на роторе и повышенных демпфирующих свойств материала ФУТ (по сравнению с металлами);
- снизить затраты на энергопотребление по сравнению с принудительной системой охлаждения маслом баббитовых подшипников скольжения;
- исключить экологические аварии, связанные с утечкой масла из систем смазки выносных баббитовых подшипников.

Углепластик ФУТ также использован в подшипниковом узле высокоскоростного насоса ВЦНС 25-1100 (разработчик НПО ЦКТИ, г. Санкт-Петербург) за второй ступенью насоса. Доказано успешное применение этого материала при окружных скоростях до 40 м/с. Проведена замена твердосплавных встроенных подшипников с муфтовой и полевой сторон на подшипники ФУТ в насосе ЦНС 180-1900 ЗТ-М производства ОАО «Сумское МНПО им. М.В. Фрунзе». Насос вышел из строя по причине загиба вала из-за сваривания роторной и статорной твердосплавных втулок с муфтовой стороны. Такие разрушения основных узлов насоса не позволяют восстановить его на месте эксплуатации. ►

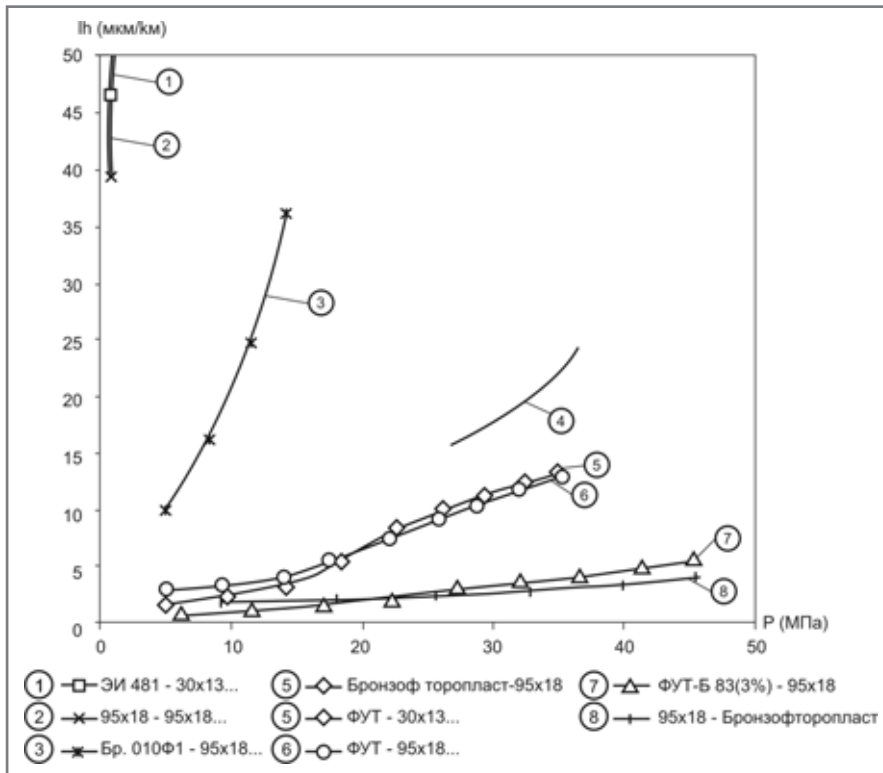


Рис. 1. Зависимость линейной интенсивности изнашивания от контактного давления (P)

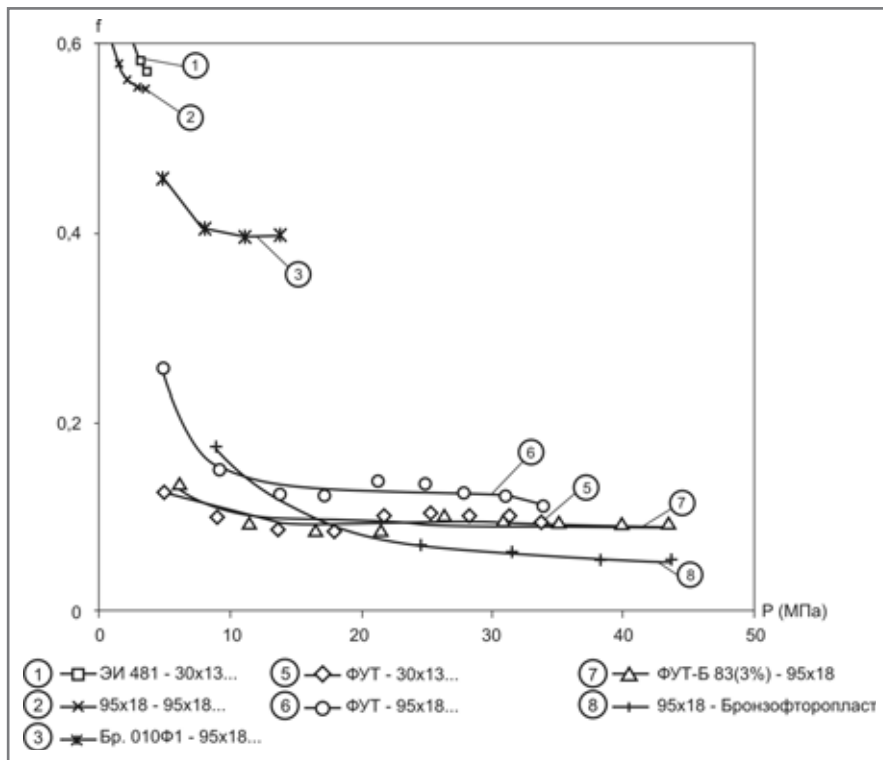


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от контактного давления (P).

Длительность, ч	Средняя скорость изнашивания, мкм/ч		Коэффициент трения
	углепластик ФУТ-Б	сталь 20X13	
84	1,15	1,74	0,017–0,023

Таб. 3. Результаты триботехнических испытаний

Имеется положительный опыт применения подшипников из углепластика ФУТ в насосах марки ЦНС для перекачивания нефти и нефтепродуктов, например на ОАО «Башнефть». Насос изготовлен по проекту института проблем транспорта энергоресурс-

сов (ИПТЭР, г. Уфа). Он отработал 3 года и продолжает эксплуатироваться.

В ближайшее время намечен запуск в эксплуатацию насоса марки НОН 250-440, спроектированного и изготовленного на ОАО «Пролетарский завод». Параметры насоса

на номинальном режиме при последовательном соединении модулей составляют: подача 275 м³/ч; напор 860 м; частота вращения 4000 мин⁻¹; КПД – 72 %; потребляемая мощность насоса 762 кВт.

Ввиду большой длины ротора, а также конструктивных особенностей ротор вращается в трех опорах. Центральная опора является подшипником скольжения из углепластика ФУТ-Б, работающим на перекачиваемой жидкости, которая может содержать инородные твердые частицы. Очистка жидкости, подаваемой на подшипник скольжения, обеспечена благодаря оригинальному техническому решению (рис. 3) [11].

Жидкость (q_1+q_2) со скоростью подается из центрифуги, где она очищается, через отверстия в рабочем колесе и каналы в валу в радиальную щель подшипника скольжения. Часть q_1 жидкости подается собственно на подшипник, а часть q_2 идет на «запирание» неочищенной жидкости (q_3), препятствуя ее попаданию в подшипник. При этом часть q_3 неочищенной жидкости проходит через зазор между рабочим колесом и ответным уплотнительным кольцом на статоре, дросселируется и поступает в камеру, где смешивается с частью q_2 и совместно с ней (q_2+q_3) отводится на входе в рабочее колесо. Работа подшипника на очищенной жидкости должна обеспечить его длительный ресурс и надежность насоса.

Подшипники из углепластика ФУТ-Б в составе этого насоса прошли успешные испытания на стенде ОАО «Пролетарский завод».

В настоящее время с ОАО «АК «Транснефть» ведутся переговоры о применении отечественных нефтяных магистральных насосов марки НМН 10000-210-2 [12], разработанных ОАО «Пролетарский завод», при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов, взамен импортных насосов фирмы Sulzer Pumps Ltd. В насосах марки НМН 10000-210-2 предусмотрено использование встроенных подшипников из углепластика ФУТ-Б.

Подшипники из углепластика ФУТ-Б в составе насоса марки ПКБТ-230 Р2Э прошли успешные испытания на стенде ОАО «Пролетарский завод». Условия работы подшипников скольжения насоса ПКБТ аналогичны условиям работы подшипников конденсатных насосов, например, КН 320-160, ЭКН 320-90-1, ЭКН 320-130 и др. Успешные результаты испытаний позволяют рекомендовать эти подшипники для многочисленных конденсатных и питательных насосов, эксплуатирующихся на энергетических установках ТЭЦ, ТЭС, АЭС и СЭУ. Опытный образец подшипника работает в насосе ЭКН 320-130 на Северо-западной ТЭЦ «Ленэнерго».

На наружной поверхности рубашки подшипника выполнены винтовые канавки (рис. 4). В подшипнике жидкость проходит по этим канавкам, предотвращая его перегрев.

Насосы марки ВА-4500-50 и ВА-5500-50 с подшипниками из углепластика ФУТ прошли успешные испытания на стенде ОАО «Сумское машиностроительное НПО им. М.В. Фрунзе» (Украина) и установлены на 30 насосах АЭС «КуданКулам» (Индия). Принято решение об установке подшипников из углепластика марки ФУТ-Б в насосы ЭУ авианесущих крейсеров «Адмирал Кузнецов» и «Викрамадитья» (ранее ►

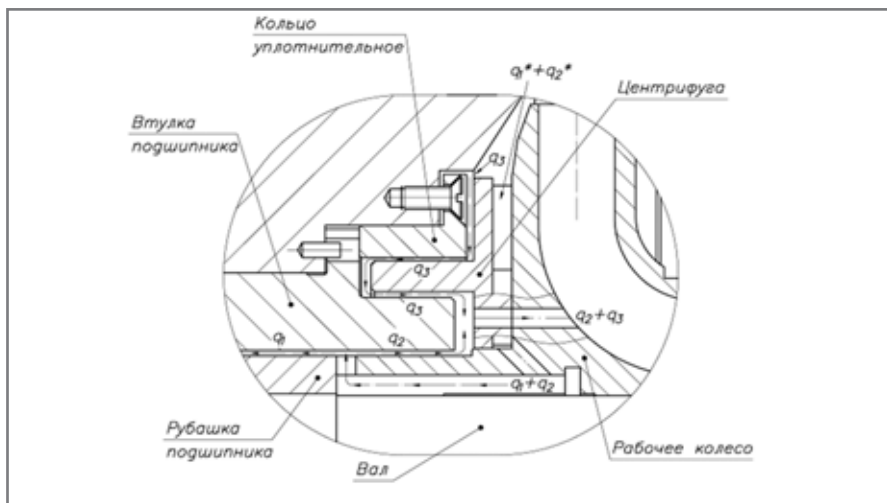


Рисунок 3. Схема подачи воды на подшипник скольжения где q_1 – расход очищенной воды на подшипник; q_2 – расход очищенной воды на запирающее неочищенной воды; q_3 – расход неочищенной воды на заднее уплотнение; $q_1+q_2+q_3$ – расходы неочищенной воды перед центрифугой; q_1+q_2 – расходы очищенной воды после центрифуги; q_2+q_3 – расход воды на вход рабочего колеса.

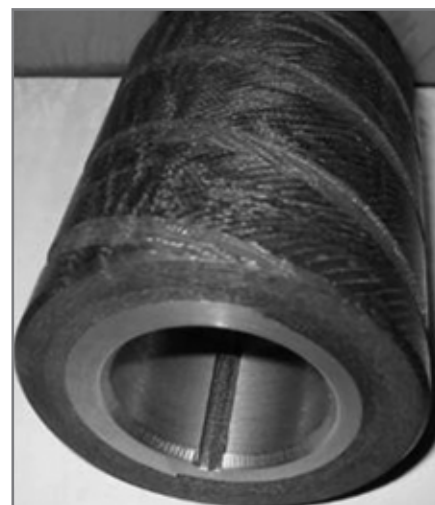


Рисунок 4. Рубашка с металлической втулкой 20X13 с нанесенным углеродистым фут-б и винтовыми канавками

«Адмирал Горшков») и ряда других кораблей.

Кроме подшипников скольжения модифицированные углепластики ФУТ успешно применяются в торцевых уплотнениях конденсатных насосов ЭУ атомных ледоколов «Вайгач», «Таймыр», «Россия». «Арктика», «Ямал» взамен торцевых уплотнений из силицированного графита в импортных насосах. Максимальное время их эксплуатации 12 тыс. ч при работе в перегретой воде ($t = 90+130^\circ\text{C}$) по кольцам из керамики или закаленной стали.

На базе полученных экспериментальных и эксплуатационных данных разработана технологическая инструкция по изготовлению и ремонту антифрикционных колец из модифицированного углепластика ФУТ применительно к судовым и береговым условиям, одобренная Российским Морским Регистром судоходства по атомным судам.

5. Применение углепластиков в арматуре трубопроводов

Первый положительный опыт применения углепластика УГЭТ был в дисковых затворах трубопроводов диаметром от 100 до 1000 мм Водоканала Санкт-Петербурга. В настоящее время изготовлена партия подшипников скольжения из углепластика УГЭТ-ТН для дисковых затворов трубопроводов диаметром от 100 до 1200 мм. Подшипники предназначены для АЭС «Кудан-Кулам» (Индия), Тяньваньской АЭС (КНР).

Благодаря высокой химической стойкости углепластика к агрессивным средам, в том числе нефти и нефтепродуктам подшипники из углепластиков стали применяться в арматуре нефтегазопроводов и арматуре нефтеперерабатывающих заводов НПЗ и химических производств.

Основными заказчиками являются: ОАО «Ижорские заводы», ОАО «Силовые машины» филиал ОАО «Опытный котлоурбинный завод», ОАО «Волгоградский НПЗ», ОАО «Казань-нефтеоргсинтез», ЗАО «Атомстройэкспорт».

Перспективы использования подшипников из углепластиков

Такое преимущество углепластиков, как способность работать при низких температурах (до -196°C), в том числе со смазкой сжиженными газами, позволяет применять их в узлах трения арматуры трубопроводов и насосов, перекачивающих сжиженные газы.

Высокая коррозионная стойкость и биологическая инертность (гигиенические характеристики) дают возможность применить антифрикционные углепластики в узлах трения оборудования химической, фармацевтической и пищевой промышленности.

Заключение

1. Во ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработаны и выпускаются подшипники скольжения на основе высокопрочных размерностабильных антифрикционных углепластиков марок ФУТ и ФУТ-Б для насосов и марки УГЭТ для арматуры трубопроводов.
2. Проведенные исследования показали значительное ($2+10$ раз) преимущество углепластиков ФУТ и ФУТ-Б по сравнению с другими материалами, применяемыми в настоящее время в подшипниковых парах.
3. Пары трения «сталь – сталь» и «сталь – бронза» не рекомендуются к использованию ввиду повышенного их износа.
4. Проведенный комплекс исследований показал, что разработанные материалы обеспечивают надежную эксплуатацию подшипников с температурой смазывающей жидкости $60+125^\circ\text{C}$ для серийных (ПКБТ-230 Р, КПТН-2Р и др.) и перспективных насосных агрегатов СЭУ, ТЭС и АЭС.
5. Замена традиционных выносных баббитовых подшипников скольжения на встроженные подшипники из углепластика ФУТ позволила полностью устранить утечки перекачиваемой среды с нагнетательной стороны насоса, снизить вибрационную нагрузку. ■

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Технические свойства полимерных материалов. Учеб. -справ. пособие / В. К. Крыжановский, В. В. Бурлов, А. Д. Паниматченко, Ю. В. Крыжановская. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 стр.

2. Гаркунов Д.Н. Триботехника /- М.: Машиностроение, 1999. 315с.
3. Пат. 2153107 Рос. Федерации: МПК F 16 C 33/04, D 69/02. Антифрикционная композиция.
4. Пат. RU 2295546 Рос. Федерации: МПК C 08 J 05/16, L 61/10, K 07/06, K 03/08, K 05/09, F 16 C 33/04. Антифрикционная композиция.
5. Точильников Д.Г., Гинзбург Б.М. Методика экспрессных триботехнических испытаний антифрикционных полимеров // Вопросы материаловедения. 2002. № 3 (31). С. 39-48.
6. Дроздов Ю.Н. Определение интенсивности изнашивания // Вестник машиностроения. 1980. № 6. С. 12-15.
7. Дроздов Ю.Н. Ключевые инварианты в расчетах интенсивности изнашивания при трении // Машиностроение. 1980. № 2. С. 93-98.
8. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991. 320 с.
9. Мотков Л.Л., Анисимов А.В., СОКОЛОВ Л.А., ШТАЦКИЙ В.А. Исследование триботехнических характеристик пар трения на основе углепластиков ФУТ в условиях, моделирующих трение осевого подшипника // Вопросы материаловедения. 2009. № 2 (58). С. 66-74.
10. Разработка нефтяного откачивающего насоса с дизельным приводом / В.С. Богун, С.Н. Войков, П.В. Пугачев, С.А. Шумилин // Гидравлические машины, гидроприводы, гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. Тр. междунар. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург: СПб ПУ, 2008. С. 42-47.
11. Пат. 2307263 Рос. Федерации: Насос центробежный (варианты). МПК F04D 1/06, F04D 29/047, F04D 29/06
12. Богун В.С., Шаров Г.А., Шумилин С.А. Разработка магистрального нефтяного электронасосного агрегата // Гидравлические машины, гидроприводы, гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. Тр. IV международного науч.-техн. конф. Санкт-Петербург: СПб ПУ, 2006. С. 6, 7.