

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 66.026.4:621.822.1:621.891

П.С. Гребенчук¹, Ю.Я. Жепицкий²¹УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь²ОАО «Гродно Азот», г. Гродно, БеларусьПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОДШИПНИКОВ
СКОЛЬЖЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ НАСОСОВ

Аннотация. В статье проанализированы современные композиционные материалы, используемые в парах трения, в том числе на основе графита. Дано описание центробежного электронасоса, используемого для перемещения химически активной эмульсии. Приведена методика расчета износа вкладышей подшипников скольжения, используемых в этом насосе, а также планирования эксперимента. Проведено экспериментальное исследование антифрикционных материалов, применяемых для вкладышей химических насосов с целью определения их износостойкости. Проанализирована скорость износа вкладышей из различных материалов. Сделаны выводы и даны рекомендации по применению исследуемых материалов для вкладышей подшипников скольжения, работающих в агрессивной среде.

Ключевые слова: центробежный насос, подшипник скольжения, вкладыш, трение, износ, смазка, модель, эксперимент, антифрикционный материал.

P.S. Grebenchuk¹, Yu.J. Zhepitski²¹Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus²JSC "Grodno Azot", Grodno, BelarusINCREASING THE WEAR RESISTANCE
OF CHEMICAL PUMPS SLIDING BEARINGS

Abstract. The article analyzes modern composite materials used in friction pairs, including those based on graphite. A description of a centrifugal electric pump used to move a chemically active emulsion is given. A method for calculating the wear of sliding bearing liners used in this pump is given, as well as an experiment planning. An experimental study of antifriction materials used for chemical pump liners was conducted to determine their wear resistance. The wear rate of liners made of different materials was analyzed. Conclusions are made and recommendations are given on the use of the studied materials for sliding bearing liners operating in an aggressive environment.

Keywords: centrifugal pump, sliding bearing, liner, friction, wear, lubrication, model, experiment, antifriction material.

Введение

Проблема повышения качества деталей и узлов машин в настоящее время стоит весьма остро. Наиболее распространенным узлом, применяемым практически во всех машинах, являются подшипники. Несмотря на массовость применения подшипников качения, все большее распространение получают подшипники скольжения, которые отличаются большей надежностью и менее требовательны к рабочим характеристикам.

Для обеспечения высокой несущей способности подшипников скольжения и увеличения продолжительности гидродинамического режима, а следовательно и эко-

номического эффекта, применяются различного вида антифрикционные покрытия на поверхности опорного профиля подшипниковой втулки [1]. Повышение работоспособности подшипников скольжения в химической промышленности в гидродинамических машинах можно обеспечить за счет увеличения износостойкости сопрягаемых деталей, теплопроводности антифрикционного полимерного материала и повышения сопротивления воздействию динамических и циклических нагрузок.

Объектом исследований является подшипник скольжения центробежного электронасосного агрегата, который перемещает эмульсию циклогексана и циклогексанола в колонну ректификации в производстве капролактама в ОАО «Гродно Азот». Насос сконструирован с применением подшипников скольжения, состоящих из высоколегированных металлических втулок, в которые запрессованы вкладыши из вольфрама карбида кремния. Эти вкладыши и подвергаются абразивному износу при работе насоса.

Повысить рабочий ресурс узлов трения в гидродинамическом оборудовании можно с помощью замены используемого антифрикционного материала на более эффективный и экономичный. Также значимыми направлениями решения этой проблемы могут быть рациональный выбор конструкции насосного агрегата и применение современных методик его обслуживания и ремонта. Анализ возможностей применения этих способов в вышеозначенном производстве является целью данных исследований.

Современные износостойкие материалы и их свойства

К современным износостойким материалам можно отнести композиционные материалы. Композиты эффективно конкурируют с такими конструкционными материалами, как алюминий, титан, сталь. Как правило, стоимость композиционных материалов высока, что связано со сложностью технологических процессов их производства, высокой ценой используемых компонентов. Однако следует подчеркнуть возможность экономии при производстве сложных конструкций за счет уменьшения количества деталей, сокращения числа сборочных операций. Трудоемкость производства изделий из композиционных материалов можно снизить в 1,5 – 2 раза по сравнению с металлическими аналогами.

Композиты представляют собой гетерофазные системы, состоящие из двух и более разнородных компонентов, имеющих границы раздела между ними. Компонент, непрерывный по всему объему материала, обеспечивающий его монолитность, называется матрицей или связующим. Компоненты, распределенные в матрице, называются наполнителями.

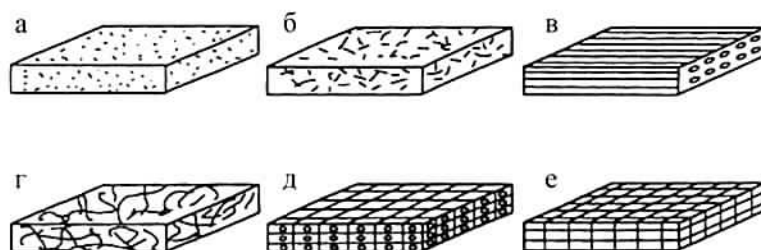
По типу матрицы различают композиционные материалы на полимерной, металлической и керамической основе. Матричный материал более вязкий и обеспечивает перераспределение действующей нагрузки по объему, защиту наполнителя от воздействия внешней окружающей среды, определяет электрические и теплофизические свойства, стойкость к старению и технологические свойства композита [2].

Наполнители в композиционные материалы вводят с целью улучшения механических, теплофизических, электрических, магнитных и других свойств. В качестве наполнителей используют твердые, жидкие и газообразные вещества органического и неорганического происхождения.

В зависимости от характера взаимодействия с материалом матрицы наполнители подразделяют на инертные и активные упрочняющие. Механизм взаимодействия матрицы с наполнителем определяется химической природой этих материалов и состоянием поверхности наполнителя. Наибольший эффект усиления достигается при возникновении между наполнителем и материалом матрицы химических связей или значительного адгезионного взаимодействия. Наполнители, способные к такому взаимодействию с матрицей, называются активными. Инертными называются наполнители, неспособ-

ные к этому взаимодействию. Последние применяют для облегчения переработки или снижения стоимости изделий.

Способы армирования композитов представлены на рисунке 1.



а – упрочнение дисперсными наполнителями; б – дискретными волокнами;
в – однонаправленными волокнами; г – хаотически распределенными волокнами;
д – слоистыми наполнителями; е – объемноармированными волокнами
Рисунок 1 – Схема упрочнения композитов

В качестве дисперсных наполнителей широкое применение получили: сульфатная целлюлоза, графит, диоксид кремния, силикаты алюминия, кальция, магния, порошки металлов и сплавов. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы с равномерно распределенным в объеме материала наполнителем обладают изотропностью свойств.

В композиционных материалах волокнистыми наполнителями служат углеродные, борные, синтетические, стеклянные и др. волокна, нитевидные кристаллы тугоплавких соединений (карбида кремния, оксида алюминия и др.) или металлическая проволока (стальная, вольфрамовая и др.). Упрочненные волокнами материалы анизотропны, кроме случая хаотического расположения волокон.

Свойства материала зависят от состава компонентов, количественного соотношения и прочности связи между ними. Для металлических композиционных материалов связь между волокном и матрицей достигается благодаря их взаимодействию. Связь между компонентами в композиционных материалах на неметаллической основе осуществляется с помощью адгезии. Из слоистых наполнителей применяются: бумага (для получения гетинакса); стеклоткань, углеграфитная ткань (в различного рода текстолитах).

Правильный выбор антифрикционного материала с учетом условий работы оборудования позволяет повысить срок его службы в несколько раз, сократить расходы на ремонт, уменьшить время простоя.

Описание объекта исследования

Объектом исследования является центробежный электронасосный агрегат, который перемещает эмульсию циклогексана и циклогексанола в колонну ректификации (рисунок 2).

Насосы с погружными двигателями и защищенным статором отличаются компактной конструкцией. Двигатель и насос образуют единый узел, причем ротор и рабочее колесо расположены на общем валу. Рабочее колесо вращается в двух подшипниках скольжения, которые смазываются перекачиваемой жидкостью [3].

Статор приводного двигателя отделен от ротора тонкостенной трубкой. Второй защитной оболочкой является корпус двигателя. Благодаря этому такие насосы отличаются от насосов других типов компактной конструкцией и очень низким уровнем шума.

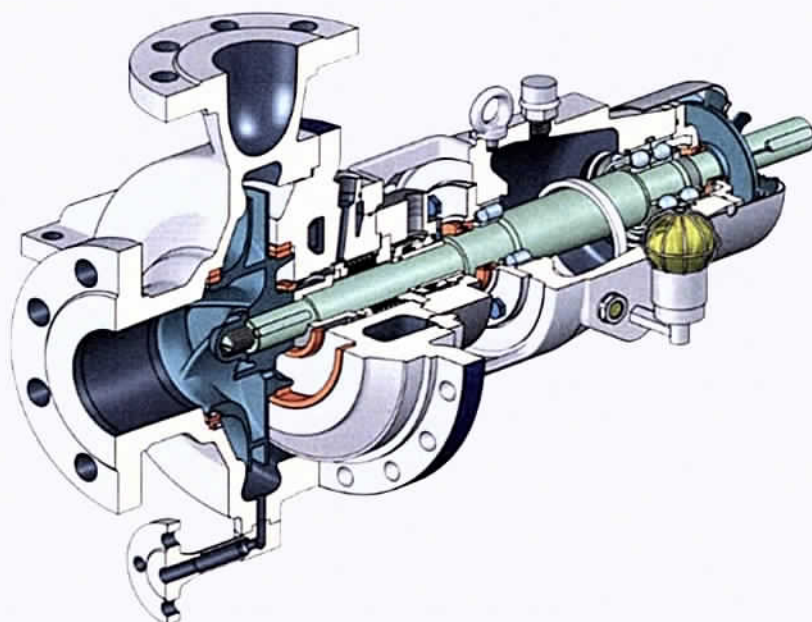


Рисунок 2 – Исследуемый центробежный электронасосный агрегат

В исследуемом (оригинальном) подшипнике скольжения применяется комбинация карбида кремния с металлическими деталями с покрытием. Чтобы устранить известный недостаток чистого карбида (SiC), в неподвижной втулке (вкладыше) подшипника использован современный композитный материал из карбида кремния и графита (SiC_3O). Этот материал получают путем пропитки высокопористого электрографита жидким расплавленным кремнием [4].

В данной работе было исследовано применение антифрикционных материалов суперфлувис 10+, флубон-ЛО, суперфлувис+ в качестве материала вкладыша и скользящего кольца подшипника [5]. Эти материалы изготавливаются на ремонтно-механическом производстве ОАО «Гродно Азот», там же и протачиваются элементы подшипника в размер. Это удешевляет стоимость запасных частей исследуемого насосного агрегата, а также позволяет отказаться от использования импортных материалов.

Расчет износа вкладышей подшипников скольжения

Расчет подшипников основан на гидродинамической теории смазки [6]. Для подшипников, работающих в условиях граничного или полужидкостного трения, расчет производят по двум критериям: среднему давлению p и произведению $p\vartheta$.

Минимальное значение коэффициента трения $f_{\min}$ соответствует границе перехода к жидкостному трению, при котором трущиеся поверхности полностью разделены слоем смазки. Режим жидкостного трения наступает при определенном сочетании следующих величин: динамической вязкости масла μ , угловой скорости ω , относительного диаметального зазора в подшипнике $\psi = \Delta/d$ (Δ – диаметальный зазор) и среднего давления p .

Условная граница, отделяющая режим жидкостного от режима полужидкостного трения, определяется с помощью критических значений безразмерных чисел Зоммерфельда:

$$[S_0] = \frac{p\psi^2}{\mu\omega}. \quad (1)$$

При $(p\psi^2)/(\mu\omega) \geq [S_0]$ – трение полужидкостное, при $(p\psi^2)/(\mu\omega) < [S_0]$ – трение жидкостное. Для случаев, когда чистота трущихся поверхностей соответствует $\nabla 8$,

прогиб шипа в подшипнике не превышает сумму высот неровностей, и погрешности формы не превосходят половины допуска диаметра. В [6] приведена таблица критических значений $[S_0]$, при которых минимальная толщина слоя смазки $h_{\min} = 10 \div 15$ мкм. С помощью чисел $[S_0]$ можно определить критическое значение скорости ϑ_2 , при превышении которой наступает жидкостное трение:

$$\vartheta_2 = \frac{p \cdot \psi^2 \cdot d}{2 \cdot \mu \cdot [S_0]}, \text{ м/с.} \quad (2)$$

Зная радиальную нагрузку на подшипник P , диаметр d и длину l цапфы, можно определить среднее давление в подшипнике, а зная частоту вращения вала, легко определяется его угловая скорость. Далее можно определить линейную скорость вала по диаметру цапфы.

Коэффициент напряженности Φ_p является безразмерной функцией положения цапфы в подшипнике и границы зоны несущего слоя смазки. Он зависит от отношения l/d :

$$\Phi_p = \frac{P \cdot \psi^2}{\mu \omega l d}. \quad (3)$$

Далее по [6], зная отношение l/d и зная границу несущей зоны в подшипниках с углами охвата 180° , определяется относительный эксцентриситет χ .

После этого можно определить минимальную толщину слоя смазки в данной трущейся паре:

$$h_{\min} = \frac{1}{2} \cdot d \cdot \psi \cdot (1 - \chi). \quad (4)$$

Ресурс R_h подшипника скольжения можно рассчитать по формуле:

$$R_h = \frac{\Delta h_{\lim}}{\vartheta_w}, \text{ ч,} \quad (5)$$

где $\Delta h_{\lim}$ – предельный износ, мкм;

ϑ_w – средняя скорость изнашивания поверхностей трения, мкм/ч.

Предельный износ подшипника скольжения определяется как:

$$\Delta h_{\lim} = C_{II} - C, \text{ мкм,} \quad (6)$$

где C_{II} – предельный радиальный зазор в подшипниках скольжения, мкм;

C – установочный радиальный зазор в подшипниках скольжения.

Прежде чем приступить к планированию эксперимента, необходимо убедиться в том, что опыты воспроизводимы. Для этой цели необходимо провести несколько серий параллельных опытов [7]. Для каждой серии параллельных опытов вычисляем среднее арифметическое значение функции отклика:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{ji} \quad (j = 1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

где k – число параллельных опытов, проведенных при одинаковых условиях;

N – общее количество оценок дисперсии.

Затем вычисляем оценку дисперсии для каждой серии параллельных опытов:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - \bar{y}_j)^2. \quad (8)$$

Для проверки воспроизводимости опытов находим отношение наибольшей из оценок дисперсий к сумме всех оценок дисперсий:

$$G_p = \sigma_{j\max}^2 / \sum_{j=1}^N \sigma_j^2. \quad (9)$$

Величина G_p называется расчетным значением критерия Кохрена.

Значения критерия Кохрена G приведены в справочной литературе [7]. Они соответствуют доверительной вероятности $P = 0,95$, с которой принимается гипотеза о воспроизводимости опытов.

Для нахождения G_p необходимо знать общее количество оценок дисперсии N и число степеней свободы f , связанных с каждой из них, причем $f = k - 1$. Если выполняется условие $G_p \leq G$, то опыты считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий – однородными.

Далее необходимо вычислить погрешности эксперимента. Оценки однородных дисперсий нескольких серий параллельных опытов можно усреднить и найти величину под названием оценка дисперсии воспроизводимости:

$$S_v^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N \sigma_j^2. \quad (10)$$

С этой величиной связано число степеней свободы:

$$f = N \cdot (k - 1). \quad (11)$$

Оценку дисперсии среднего значения рассчитывают по формуле:

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{S_v^2}{k}. \quad (12)$$

Таким образом, данная методика расчета подшипника скольжения позволяет определить размер зазора между валом и вкладышем, спрогнозировать износ вкладыша с течением времени и ресурс работы подшипника со вкладышами из разных по составу материалов. Эта методика была апробирована на исследуемых насосных агрегатах и дала хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Расчеты по приведенной методике показали, что эксперимент воспроизводим, так как расчетный критерий Кохрена равен на первом насосном агрегате 0,474, на втором – 0,667 и на третьем – 0,333, тогда как граничное значение равно 0,967 [7].

Экспериментальное исследование интенсивности износа вкладышей подшипников скольжения

Изучение условий работы подшипников скольжения производилось на трех одинаковых по техническим параметрам центробежных электронасосных агрегатах, которые находятся в цехе «Циклогексанон-2» в ОАО «ГродноАзот». В качестве смазки, которой является сама перекачиваемая жидкость, использовалась эмульсия циклогексана и циклогексанола.

Данный эксперимент проходил при постоянных условиях работы трех насосов, в каждом из которых были установлены по два подшипника скольжения, и применялся различный материал вкладыша подшипника и скользящего кольца. На первом агрегате в два подшипника скольжения были запрессованы вкладыши и установлены скользящие кольца из антифрикционного материала суперфлувис 10+, на втором агрегате – из антифрикционного материала флубон-ЛО, на третьем агрегате – из антифрикционного материала суперфлувис+, состав которых приведен в таблице 1.

Три исследуемых материала до эксперимента были погружены в емкость с эмульсией из циклогексана и циклогексанола в лабораторных условиях на семь дней для подтверждения отсутствия воздействия агрессивной среды на исследуемые материалы, что было установлено визуально и весовым методом. То есть, материал был

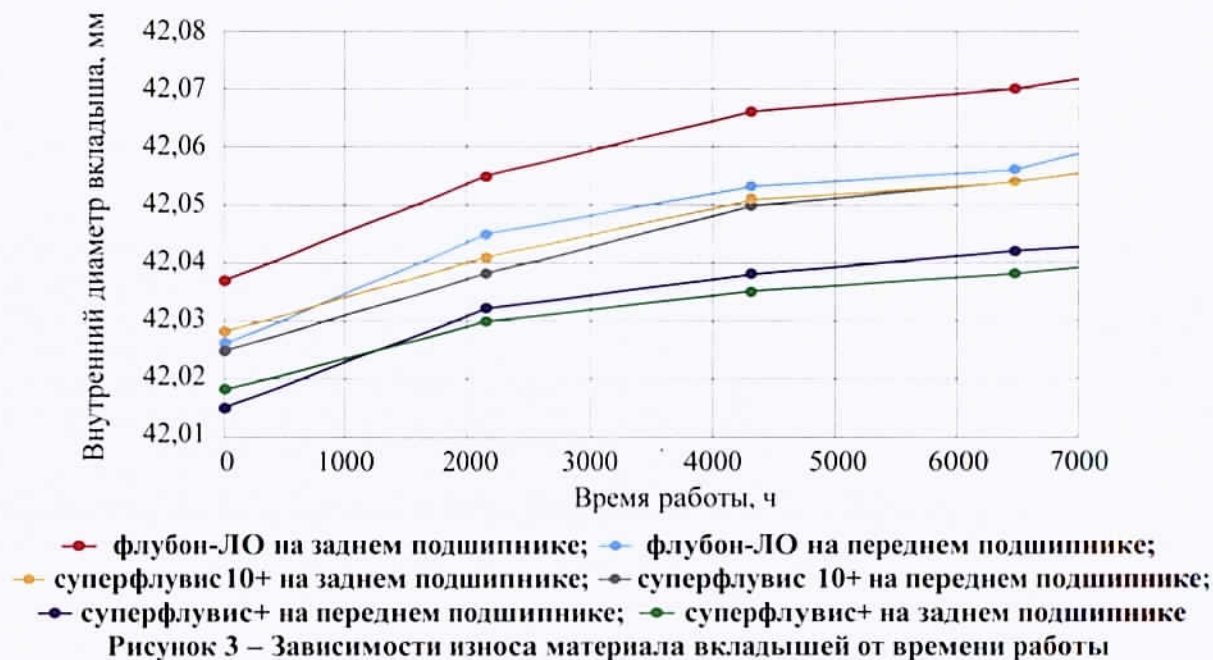
взвешен до погружения в эмульсию и после на лабораторных весах марки M-ER 122 ACFJR-300.005 LCD с дискретностью 0,005 г.

Таблица 1 – Состав антифрикционных фторопластовых материалов

Материал вкладыша подшипника и скользящего кольца	Состав материала, %		
	фторопласт-4	углеродные волокна	графит
Суперфлувис10+	89,5	10	0,5
Флубон-ЛО	80	19,5	0,5
Суперфлувис+	83	16,5	0,5

Все насосное оборудование было запущено в одно и то же время при одинаковых условиях и факторах, влияющих на исследование. Эксперимент проходил в четыре этапа, каждый этап составил 2160 ч работы насосов, так как межремонтный период по графику планово-предупредительных ремонтов на данные центробежные насосы составляет: текущий – 2160 ч, капитальный – 17280 ч.

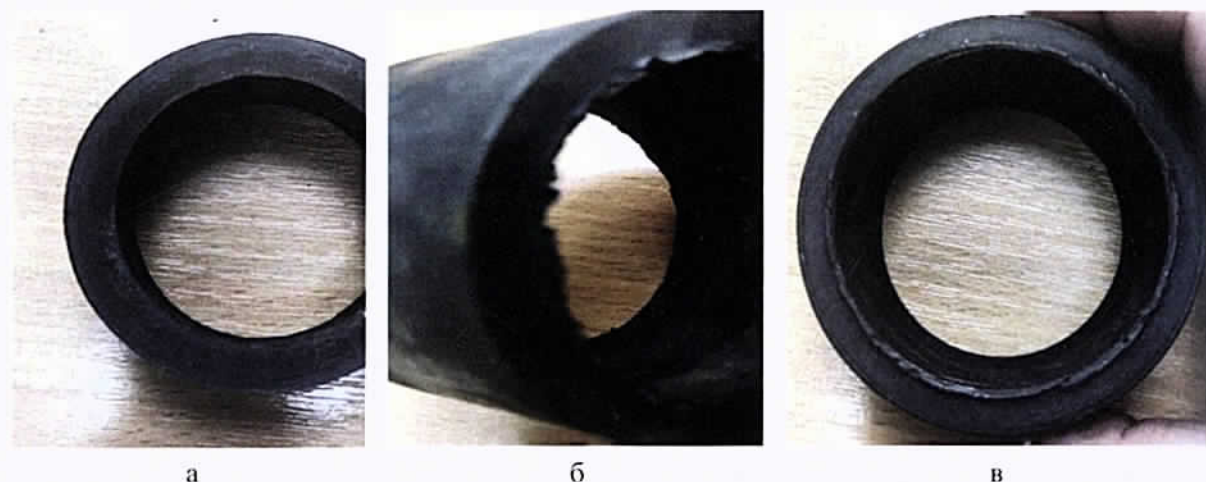
В совокупности насосы на экспериментальных материалах подшипников наработали 8640 ч. При этом каждый насос разбирался четыре раза в текущий ремонт, тогда и производились замеры вкладышей подшипников скольжения в шести различных точках внутреннего диаметра, так как износ вкладыша происходит неравномерно [8]. Из шести замеров принималось среднее значение. Результаты замеров вкладышей нутромером представлены в виде графических зависимостей внутреннего диаметра вкладышей от времени работы (рисунок 3).



Также производились замеры посадочного места на валу – размеры все время оставались прежними, таким образом, износом на валу можно пренебречь. Замеры производились поверенным, высокоточным, индикаторным электронным нутромером НИЦ-ПТ 35-50 с точностью отсчета 1 мкм (Челябинский Инструментальный Завод).

Произведя визуальный осмотр вкладышей из фторопластовых антифрикционных материалов после 6480 ч работы насосных агрегатов, можно увидеть, что вклады-

ши из материала суперфлувис+ (рисунок 4а) износились меньше всех остальных материалов. Несмотря на это, можно сказать, что материалы из суперфлувис 10+ (рисунок 4б) и флубон-ЛО (рисунок 4в) также неплохо себя показали в работе трущейся пары насоса.



а – суперфлувис+; б – суперфлувис 10+; в – флубон-ЛО
Рисунок 4 – Степень износа вкладышей после 6480 часов работы

Была определена средняя скорость износа, как результат интегрирования функций усредненных значений до точки перегиба [6]. По расчетным данным видно, что наибольший ресурс $R_h = 6591$ ч у подшипника скольжения со вкладышем из антифрикционного материала суперфлувис+. У этого материала скорость изнашивания поверхностей трения минимальная и составляет $\dot{g}_w = 2,988 \cdot 10^{-13}$ м/с. Для сравнения, у подшипника скольжения со вкладышем из антифрикционного материала флубон-ЛО ресурс равен 3769 ч, скорость изнашивания поверхностей трения равна $5,225 \cdot 10^{-13}$ м/с. У подшипника скольжения со вкладышем из антифрикционного материала суперфлувис 10+ ресурс равен 4083 ч, скорость изнашивания поверхностей трения равна $4,823 \cdot 10^{-13}$ м/с.

Выводы

В ходе исследования были изучены общие закономерности процессов износа материала, основные виды изнашивания динамического оборудования, методы оценки износа. Также были рассмотрены современные износостойкие материалы подшипников скольжения, и применена математическая модель расчета подшипников скольжения на толщину минимального зазора, скорости изнашивания поверхностей трения и ресурса подшипника.

Имея минимальную скорость изнашивания и наибольший ресурс по сравнению с другими исследуемыми образцами, вкладыши из антифрикционного материала суперфлувис+ подходят для применения в подшипниках скольжения на центробежном электронасосном агрегате, используемом для перемещения агрессивных эмульсий. Оригинальные вкладыши из вольфрам карбида кремния служат, исходя из практики, в среднем 1,5 – 2 года и являются очень дорогостоящими и труднодоступными для закупки.

Вкладыши из антифрикционного материала суперфлувис+, исходя из экспериментальных данных, работают без отказов и потери требуемого зазора от 9 месяцев и более. Полное производство вкладыша, а именно, изготовление материала и протачивание в размер, осуществляется в ремонтно-механическом цехе ОАО «ГродноАзот».

Таким образом, можно сделать вывод, что применять антифрикционный материал суперфлувис+ для изготовления вкладышей подшипников скольжения химического оборудования целесообразно, так как работают они ненамного меньше оригинальных вкладышей, но имеют гораздо меньшую стоимость и доступны на отечественном рынке.

Список использованных источников

1. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах: учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1987. – 223 с.
2. Голенков В.А., Радченко С.Ю. Новый способ повышения ресурса работы подшипников скольжения. – М.: Машиностроение, 2009. – 489 с.
3. Жепицкий Ю.Я., Гребенчук П.С. Выбор и применение подшипниковых узлов на динамическом оборудовании // Нефтегазохимия – 2023: материалы VI Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазоперераб. / г. Минск (ноябрь 2023 г.). – Минск: БГТУ, 2023. – С. 216-220.
4. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. – М.: Химия, 2000. – 672 с.
5. Францкевич В.С., Гребенчук П.С., Поспелов А.В. и др. Применение современных антифрикционных материалов в подшипниках скольжения химических насосов // Горная механика и машиностроение. – 2024. – № 1. – С. 71-76.
6. Чернин И.М., Кузьмин А.В., Ицкович Г.М. Расчеты деталей машин. – Минск: Высшая школа, 1974. – С. 390-420.
7. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – Л.: Химия, 1975. – 48 с.
8. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т.; под ред. И.Н. Жестковой. – 9-е изд. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 2. – 912 с.

Информация об авторах

Павел Сергеевич Гребенчук – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических и силикатных производств», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: p_grebenchuk@mail.ru.

Юрий Янович Жепицкий – мастер по ремонту технологического оборудования, ОАО «Гродно Азот» (пр. Космонавтов, 100, 230013, г. Гродно, Беларусь), e-mail: oao@azot.com.by.

Information about the authors

Pavel Sergeevich Grebenchuk – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department “Machines and Apparatuses of Chemical and Silicate Production”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: p_grebenchuk@mail.ru.

Yury Janovich Zhepitski – Technological equipment repair technician, JSC “Grodno Azot” (100, Kosmonavtov Ave., 230013, Grodno, Belarus), e-mail: oao@azot.com.by.

Поступила в редакцию 30.09.2024 г.