

УДК 620.169.1

М. А. Шилов, П. О. Смирнов

**ПРИМЕНЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ
ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА НЦПН-40/100**

Ивановский институт Государственной противопожарной службы МЧС России
пр. Строителей, 33, 153040 Иваново, Россия. E-mail: Mshilov@yandex.ru
E-mail: smirnoff037@yandex.ru

В работе представлены результаты испытаний разработанного наноматериала для повышения надежности подшипникового узла трения пожарного центробежного насоса. Показано, что в условиях сухого и полусухого трения пара трения «полимер–металл» работает лучше по сравнению с твердыми сплавами и силицированными графитами, что проявляется в отключении двигателя при более высокой нагрузке и через больший промежуток времени. Установлено, что полимерный наноматериал по несущей способности, износостойкости и коэффициенту трения превосходит силицированный графит и др. Согласно полученным данным, пара трения «полимер–металл» является перспективной для дальнейших исследований. Необходимо проведение испытаний в натуральных или близких к эксплуатационным условиям.

Ключевые слова: наноматериал, углеродный материал, износостойкость.

M. A. Shilov, P. O. Smirnov

**APPLICATION OF STRENGTHENING TECHNOLOGIES FOR RELIABILITY
INCREASING OF FRICTION BEARING KNOTS OF CENTRIFUGAL
PUMP NTSPN-40/100**

Ivanovo Institute of State Firefighting Service
Stroiteley pr., 33, 153040 Ivanovo, Russia. E-mail: Mshilov@yandex.ru
E-mail: smirnoff037@yandex.ru

The article presents test results on a nanomaterial developed for reliability increasing of friction bearing knots of the fire centrifugal pump. It is shown that under conditions of dry and semi-dry friction the «polymer–metal» friction pair works better than hard alloys and siliconised graphites which was manifested in the engine shutdown at a higher load and after a longer period of time. It is established that the polymer nanomaterial surpasses the siliconized graphite and other materials on such characteristics as contact pressure, wear resistance and friction coefficient. According to data obtained the «polymer–metal» friction pair is perspective for further investigations. It is necessary to carry out tests under operation conditions or conditions similar to them.

Key words: nanomaterial, carbon material, wear resistance.

Введение

При использовании в пожарной технике подшипниковых узлов с водяной смазкой одной из главных проблем является обеспечение их работы в режимах полусухого граничного трения, которые имеют место при разгоне и остановке насоса. В этих условиях возрастают силы трения, происходит разогрев трущихся поверхностей, снижается вязкость смазки, что может привести к заметному перераспределению давления и снижению несущей способности узла. Благодаря высоким технологическим свойствам в подшипниковых узлах нашли применение такие твердые материалы, как стали типа ШХ и 95Х18, силицированные графиты, материалы на основе карбида вольфрама. Существенным недостатком твердых материалов являются практическое отсутствие прирабатываемости, низкая ударная вязкость, высокая чувствительность к концентраторам, плохая обрабатываемость режущим инструментом [1, 2].

В качестве альтернативы этим материалам в работе исследована пара трения молибден – углерод-углеродный композиционный наноматериал (УУКНМ). Молибден с пределом прочности при сжатии 380 МПа получен методом порошковой металлургии путем прессования и спекания; УУКНМ – наноматериал, армированный углеродными волокнами и пропитанный каменноугольным пеком. Плотность материала – 1,85 г/см³; предел прочности при сжатии в осевом направлении составляет 101 МПа, в радиальном – 109 МПа.

Выбор материалов для исследования

Выбор указанных материалов для исследования обусловлен их свойствами, прежде всего теплофизическими. Молибден имеет высокие температуру плавления и теплопроводность, что способствует отводу тепла из зоны трения и делает практически невозможным оплавление поверхности в зоне трения. Кроме того, молибден устойчив к образованию трещин в результате воздействия тепловых напряжений. Предельно допустимая рабочая температура металла 550 °С [3, 4]. Благодаря благоприятным теплофизическим свойствам и относительно высокой износостойкости по сравнению с другими металлами молибден нашел применение в условиях трения, например в каче-

стве инструментального материала при горячей обработке сталей и сплавов давлением. Молибден используют в слабо- и средненагруженных торцевых уплотнениях при удельных нагрузках p до 1 МПа и скоростях скольжения v до 10 м/с, при этом произведение pv не должно превышать 5 МПа м/с [4].

Основное применение углерод-углеродные наноматериалы находят в сфере авиационного, космонавтики и ракетостроения, где из них изготавливают тормозные диски, сопла реактивных двигателей, контейнеры для высокотемпературной защиты объектов. Отличительной особенностью таких материалов является высокая прочность, ударная вязкость, стойкость к термическим ударам, размерная стабильность. В литературе приводятся отдельные данные об их износостойкости, в частности результаты испытаний и применения в качестве вкладыша подшипника на валу из коррозионно-стойкой стали насоса типа АХП-500/376-ИСД для перекачки серной кислоты [6].

Методика триботехнических испытаний

При выборе параметров триботехнических испытаний принимались во внимание условия работы подшипников: граничное трение до выхода на стационарный режим при скоростях скольжения до 10 м/с и удельных нагрузках до 6,0 МПа; температура воды при этом 80 °С. Кроме того, важно оценить способность материалов работать в условиях сухого или полусухого трения, которое обычно является кратковременным, но зачастую имеет место в начальный момент пуска механизмов.

Для триботехнических испытаний использовалась машина трения ИИ 5018, которая позволяет воспроизводить схему трения и удельные нагрузки, действующие на трущиеся поверхности в эксплуатационных условиях. Скорость скольжения была ограничена номинальной частотой вращения двигателя и составляла 10,3 м/с при всех видах испытаний.

Верхний неподвижный образец пары трения изготавливался из УУКНМ, а нижний вращающийся – из стали, покрытой нанослоем молибдена (~100 нм). Начальная стадия испытаний представляла собой приработку трущихся поверхностей при ступенчато повышающейся нагрузке, после чего пара трения подвергалась трем видам испытаний:

- определение критических нагрузок,
- определение износостойкости в условиях граничного трения;
- испытания в условиях сухого и полусухого трения.

Испытания для определения критических нагрузок

Критическая нагрузка определяется с целью установления возможностей пары трения выдерживать нагрузки при заданных условиях без схватывания. Испытания приводились при ступенчато повышавшейся нагрузке до резкого увеличения момента трения, которое свидетельствует о нарушении нормального режима трения. Основными фиксируемыми показателями являлись величина потребляемого тока и момент трения. По результатам испытаний строилась зависимость коэффициента трения от удельной нагрузки $\mu = f(P)$.

Удельная нагрузка изменялась от 0,5 до 5,0 МПа (максимальная нагрузка на данном стенде); шаг изменения нагрузки 0,5 МПа; время работы пары на каждой ступени нагружения 15 мин; среда – проточная водопроводная вода.

Испытания на износостойкость в условиях граничного трения сопровождалось измерением величины износа образцов. В качестве рабочей среды использовалась проточная водопроводная вода. Удельная нагрузка в процессе испытаний ступенчато изменялась от 0,5 до 3,0 МПа. Шаг изменения нагрузки – 0,5 МПа. Продолжительность испытаний на каждой нагрузке соответствовала пути трения 1500 км. Линейный износ образцов определялся через каждые 500 км.

Данные об износе использовались для расчета скорости изнашивания V , линейной интенсивности изнашивания I_h и относительного критерия износа I_0 [7]. В процессе испытаний фиксировался момент трения, по которому рассчитывался коэффициент трения, и визуально оценивалось состояние трущихся поверхностей.

Испытания в условиях сухого и полусухого трения проводились при ступенчато изменяющейся нагрузке от 0,5 до 6,0 МПа с продолжительностью испытаний на каждой ступени 2 мин. В процессе испытаний фиксировались температура вблизи зоны контакта деталей и момент трения, по которому рассчитывался коэффициент трения. Начиная с определенной нагрузки из-за увеличения силы трения происходила остановка двигателя.

В этом случае определялась также продолжительность работы пары до остановки двигателя. Условия полусухого трения создавались путем заполнения испытательной головки с образцами водой перед началом испытаний, после чего ее подача прекращалась.

Результаты испытаний и их обсуждение

Испытания для определения критических нагрузок. Графическая зависимость коэффициента трения от удельной нагрузки представлена на рис. 1.

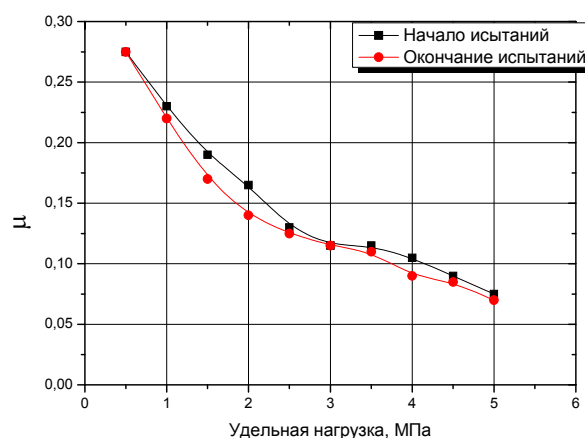


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от удельной нагрузки

Она носит плавный характер; увеличение нагрузки приводит к снижению коэффициента трения от 0,27 при нагрузке 0,5 МПа до 0,07 при 5 МПа. Какие-либо эффекты, свидетельствующие о нарушении нормальной работы пары (остановка двигателя, возникновение очагов схватывания на контактирующих поверхностях), не наблюдались.

Таким образом, можно считать, что критическая нагрузка для пары трения УУКНМ–молибден лежит за пределами исследованного диапазона.

Испытания на износостойкость. Наблюдение за ходом триботехнических испытаний показало, что работа пары трения УУКНМ–молибден сопровождается износом углерод-углеродного наноматериала; износ молибденового нанопокрывается вала находится в пределах погрешности замеров. Полоса разброса величин износа построена на рис. 2.

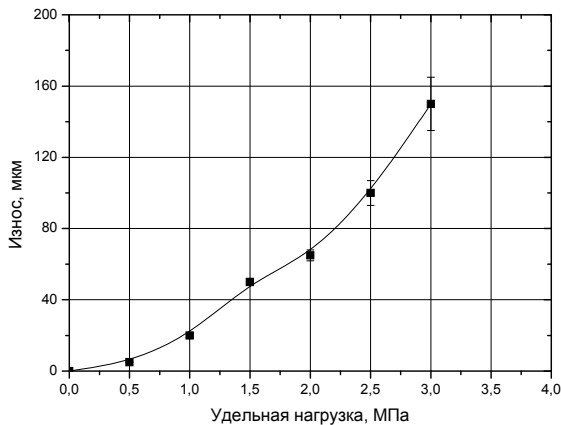


Рис. 2. Зависимость износа от удельной нагрузки

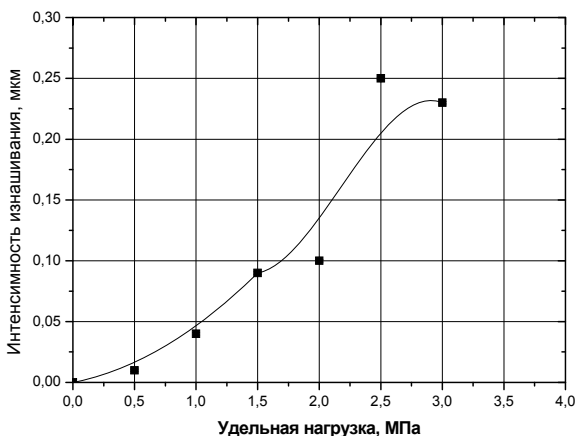


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания от удельной нагрузки

Средние величины износа, скорости, интенсивности изнашивания и относительного критерия

износа УУКНМ в зависимости от удельной нагрузки представлены в табл. 1.

Из приведенных данных, а также графической зависимости интенсивности изнашивания УУКНМ от нагрузки (рис. 3) следует, что при нагрузке 0,5 МПа интенсивность изнашивания незначительна и составляет 0,01 мкм/ч.

При увеличении нагрузки до 1 МПа (в 2 раза) интенсивность изнашивания возрастает в 4 раза. При дальнейшем увеличении нагрузки интенсивность изнашивания возрастает, но не так резко, как при переходе от нагрузки 0,5 к 1,0 МПа.

Также следует отметить, что при увеличении нагрузки наблюдается увеличение разброса данных об износе (рис. 2), т. е. при одной и той же нагрузке износ, определенный за путь трения 500 км, может отличаться в 2–3 раза, что свидетельствует о неравномерном изнашивании УУК-наноматериала.

Таким образом, в результате испытаний установлено:

- динамический коэффициент трения пары УУКНМ - молибден находится в диапазоне 0,123–0,273;

- интенсивность изнашивания (рис. 3) УУК-наноматериала при нагрузке 0,5–6,0 МПа и скорости скольжения 10,3 м/с составляет от 0,01 до 0,25 мкм/ч ($I_h = (0,1-2,5) \cdot 10^{-8}$); скорость изнашивания изменяется от 0,5 до 9,2 мкм/ч;

- при всех нагрузках пара работает в нормальном режиме, без разрушений и каких-либо заметных повреждений;

- состояние поверхностей трения хорошее, риски отсутствуют, на молибденовом нанопокрывании вала – зеркальная поверхность приработки.

Таблица 1. Триботехнические характеристики пары трения УУКНМ – молибден

q , МПа	Износ УУКНМ, мкм	V , мкм/ч	$I_h \cdot 10^{-8}$	$l_0 \cdot 10^{-11}$, 1/МПа	Коэффициент трения
0,5	6,2	0,5	0,1	2,6	0,234–0,273
1,0	21,2	1,6	0,4	4,2	0,156–0,254
1,5	47,5	3,5	1,0	6,3	0,146–0,176
2,0	52,2	3,9	1,0	5,2	0,146–0,169
2,5	124,2	9,2	2,5	9,9	0,122–0,149
3,0	113,2	8,4	2,3	7,5	0,117–0,147

Примечание: скорость скольжения 10,3 с/м, путь трения 500 км, среда – вода

Испытания в режиме сухого и полусухого трения. Трение без смазки (всухую) отличается тем, что сначала наблюдается увеличение коэффициента трения, а затем – снижение.

Остановка двигателя из-за большой силы трения происходила, начиная с нагрузки 2 МПа в режиме полусухого трения и 1 МПа при трении

всухую; с этих нагрузок начинается интенсивное тепловыделение в зоне трения.

Катастрофический износ наноматериалов, трещинообразование и другие дефекты на поверхности пары подтвердились. Такое сохранение свойств после работы в экстремальных условиях считается критерием совместимости материалов в паре трения.

Таблица 2. Результаты триботехнических испытаний подшипниковых материалов в воде

Материалы пары		Износ, мкм		$I_0 \cdot 10^{-11}$, 1/МПа			Коэффициент трения
кольца	шайбы	кольца	шайбы	кольца	шайбы	пары	
ВН20Г2	ВН20Г4	0,3	36,3	0,004	0,49	0,494	0,05–0,06
ВН20Г2	СГП	4,1	4,8	0,056	0,064	0,120	0,02–0,05
ВН15КГ2	ВН15КГ4	3,6	17,2	0,048	0,23	0,292	0,03–0,04
УУКНМ*	Мо	–	175,0	–	5,83	5,83	0,12–0,27

Примечание: удельная нагрузка 3 МПа, скорость скольжения 12,5 м/с, путь трения 2500 км

*Путь трения 1000 км, скорость скольжения 10,3 м/с.

Таблица 3. Результаты триботехнических испытаний подшипниковых материалов всухую

Материалы пары		q , МПа	τ , мин	t , °С	μ	Примечание
кольца	кольца					
ВН20Г2	ВН20Г4	3	1,5	40–50	0,13–0,68	Неоднократные остановки двигателя из-за мгновенного возрастания силы трения
ВН20Г2	СГП	3	2,0	50–70	0,05–0,3	Коэффициент трения со временем падает
		5	3,0	70	0,08–0,13	
УУКНМ*	Мо	3	2	30–40	0,25–0,70	Коэффициент трения со временем падает
		3	7,0	60	0,20–0,70	
		5	2,0	–		

Примечание: скорость скольжения 12,5 м/с;

*Скорость скольжения – 10,3 м/с.

Таблица 4. Физико-механические свойства подшипниковых материалов

Марка материала	$d \cdot 10^3$, кг/м ³	$\sigma_{в сж}$, МПа	$\sigma_{в}$, МПа	λ , Вт/м К	$\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/К	E , ГПа
ВН20Г2	11,1–12,5	–	110	41	5,9	364
ВН20Г4	9,8–11,0	–	30	36	5,8	253
СГ-П 0,5		350	130	100	2,9–4,0	85
УУКНМ	1,94	≥ 100	–	≥ 30	1,5	29–60
Мо	10,2	≥ 600	–	130	5,3	2,94

Сравнение триботехнических свойств пары трения УУКНМ–молибден со свойствами других материалов, использующихся в подшипниковых узлах (табл. 2), показывает, что исследуемая пара обладает износостойкостью на порядок более низкой, а коэффициентом трения на порядок более высоким. В то же время следует отметить, что трение пары УУКНМ–молибден протекает в нормальном режиме в требуемом диапазоне нагрузок, и этот уровень износостойкости может оказаться достаточным, чтобы обеспечить работоспособность узла на протяжении назначенного ресурса.

В условиях сухого и полусухого трения пара трения УУКНМ–молибден работает лучше по сравнению с твердыми сплавами и силицированными графитами (табл. 3), что проявляется в отключении двигателя при более высокой нагрузке и через больший промежуток времени. Этот положительный факт можно объяснить, по-видимому, более высокой теплопроводностью наноматериала на основе молибдена по сравнению с твердыми сплавами и достаточно высоким уровнем теплопроводности УУК-наноматериала (табл. 4).

Заключение

В результате проведенных триботехнических испытаний установлено, что пара трения УУКНМ – молибден обладает высокими триботехническими свойствами, что делает ее перспективной для применения в подшипниковых узлах пожарных центробежных насосов.

Для окончательного вывода о возможности использования предложенной пары необходимо

проведение натуральных стендовых испытаний для подтверждения назначенного ресурса подшипникового узла.

Список литературы / References

1. *Чеховой А. Н.* Классификация наноматериалов и нанотехнологий для машиностроения и метрология наносостояния // Конструкции из композиционных материалов. М. : ООО ИЦ РИА «Передовые технологии», 2005. Вып. 4. С. 817.
2. *Березина Е. В.* Самоорганизация присадок в граничном смазочном слое трибосопряжений машин : дис. ...д-ра техн. наук. Иваново, 2007. 461 с.
3. *Буренин В. В.* Центробежные насосы с деталями из пластмасс для нефтеперерабатывающих нефтехимических производств // Нефтепереработка и нефтехимия. 1999. № 6. С. 36–41.
4. *Wessel M.* Насосы из термопластов для различных областей применения повышенного уровня безопасности // Chem. Plants+ Process. [Chem/_anlag.+Verfahren]. 1997. Vol. 30, № 1. P. 66–68.
5. Пластиковые центробежные насосы для перекачки агрессивных, загрязненных и особо чистых жидкостей // Chem. Eng. (USA). 1999. Vol. 106, № 1. P. 881/16.
6. Технические пластмассы в насосах / Osterr. Kuntst. Z. 1997. Vol. 28, № 7–8. P. 160.
7. *Boylan J. P.* Углеродосодержащие композитные материалы для насосостроения // World Pumps. 1998. № 387. P. 28–31.
8. *Hinkel Tommy, Grifrow Matt.* Модернизация центробежных насосов с применением термопластов // World Pumps. 1999. № 390. P. 21–23.

Поступила в редакцию 29.05.2014 г.