

УДК 620.169.1

М. А. Шилов, П. В. Королев¹

**РАЗРАБОТКА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО ЭЛАСТОМЕРНОГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ МАНЖЕТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ПОЖАРНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ**

Ивановский институт Государственной противопожарной службы МЧС России
пр. Строителей, 33, 153040 Иваново, Россия. E-mail: Mshilov@yandex.ru
¹Ивановский государственный политехнический университет
ул. 8 Марта, д. 20, 153037 Иваново, Россия. E-mail: vedunkp@rambler.ru

В работе представлены результаты испытаний разработанного материала для эластомерных манжетных уплотнений. Показано, что введение уже 0,5 % углеродных нанотрубок в состав стандартного эластомера способствует повышению его износостойкости и снижению коэффициента трения.

Ключевые слова: наноматериал, углеродные нанотрубки, износостойкость

М. А. Shilov, P. V. Korolev¹

**DEVELOPMENT OF NANOSTRUCTURED ELASTOMERIC MATERIAL
FOR LIP SEALS OF FIRE CENTRIFUGAL PUMPS**

Ivanovo State University of the Fire Service Emergency Russia
Stroitelej pr., 33, 153040 Ivanovo, Russia. E-mail: Mshilov@yandex.ru
¹Ivanovo State Polytechnic University
8 March str., 20. 153037 Ivanovo, Russia. E-mail: vedunkp@rambler.ru

In the article the test results of the developed material of elastomeric lip seals are presented. It was proved that the introduction of even 0,5% carbon nanotubes in structure of a standard elastomer contributes to the increase of its wear resistance and the decrease of its friction coefficient.

Key words: nanomaterial, carbon nanotubes, wear resistance.

Введение

Развитие современного машиностроения и транспортных средств требует создания и постоянного совершенствования уплотнительных устройств на основе эластомерных материалов, обеспечивающих герметизацию подвижных и неподвижных соединений деталей машин и аппаратов.

Эффективность, надежность и экологичность использования пожарного центробежного насоса во многом определяются его техническим состоянием. Затраты на поддержание работоспособности за срок эксплуатации значительно превышают его первоначальную стоимость. По данным статистических исследований отказов узлов трения пожарных центробежных насосов, где используются манжетные уплотнения, приходится 35 % всех отказов, а затраты на их устранение составляют более 50 % всех затрат на текущий ремонт насоса. Из этого следует, что именно узлы трения с манжетными уплотнениями являются одними из наиболее важных частей насоса, определяющих его надежность в целом. В настоящее время основными задачами производства насосов являются повышение надежности, улучшение экологических показателей и увеличение межремонтной работы.

Теоретическая часть

Установлено, что после модификации [1] для всех исследованных резин наблюдается многократное снижение начального коэффициента трения. В процессе измерения наблюдается рост коэффициента трения со временем, обусловленный постепенным износом модифицирующего покрытия.

Наноматериалы представляют собой материалы, частицы которых имеют диаметр, составляющий от 1 до 100 нанометров [2]. Применение таких наноматериалов в каучуках известно из патента US 4644988, в котором описано соединение для автомобильных покрышек, содержащее каучук на основе сополимера стирола с бутадиеном, армированное сажей с размерами частиц менее 20 нанометров. В патентах US 6121346 и 6225397 описано применение наполнителей на основе оксида кремния, первичные частицы которого имеют размер, составляющий от 5 до 30 нанометров, в каучуках, также включающих оксид цинка в количестве от 2 до 5 част. / 100 част. каучука [1].

В ряде работ [7, 6, 4, 3, 2], показана высокая эффективность применения наноразмерных частиц для упрочнения и повышения предела износостойкости. Многообещающими в этом плане являются наноматериалы, в основе структуры которых представлен углерод, в частности, углеродные нанотрубки [2].

Экспериментальная часть

С целью снижения кинематического коэффициента трения и интенсивности износа на резиновые уплотнительные элементы наносили антифрикционные нанопокртия. В качестве покрытия использовали углеродные нанотрубки, обладающие хорошими антифрикционными и механическими характеристиками. Покрытие отверждали при температуре 145 °С с учетом максимальной теплостойкости резин из нитрильных каучуков. Применение покрытий из углеродных нанотрубок оптимизированного состава позволяет существенно улучшить трибологические характеристики подвижных уплотнительных элементов [5].

При поверхностной модификации углеродными толщина образца резины не меняется (рис. 1), а модифицированный поверхностный слой и объемная фаза резины представляют собой органичное целое в отличие от модификации нанесением поверхностного слоя (рис. 1).

Трибологические исследования масляных суспензий на машине трения были проведены неоднократно, и во всех случаях чистое масло ТАД-17И работало до нагрузок 80 Н. При дальнейшем увеличении нагрузки происходил задиры в зоне контакта. При испытании суспензий (масло И-20 А + присадка) с различным содержанием мелкодисперсной фазы практически во всех случаях удалось зафиксировать увеличение нагрузки задира в 1,5–2,0 раза, что видно из представленных графиков по результатам испытаний. Во многих случаях удалось выдержать весь диапазон возможных нагрузок на машине трения и не зафиксировать задира. Следует отметить, что в данном случае ограничивающим фактором дальнейших трибологических испытаний манжетных уплотнений с увеличением нормальной нагрузки было увеличение контактной температуры трения, что приводило к началу плавления материала манжетного уплотнения. Это делало нецелесообразным проведение дальнейших испытаний.



Рис. 1. Схема разрушения модифицированного слоя при растяжении

В ходе эксперимента стояла задача выяснить, как влияют наномодификаторы структуры материала эластомера на триботехнические характеристики, в частности, оказывают ли они влияние на снижение коэффициента трения. В качестве базовых эластомеров использовался стандартный бутадиеновый каучук (БК). В качестве модификаторов структуры материала эластомера применялись фуллерены (Ф) и углеродные нанотрубки (УНТ).

Из графиков, представленных на рис. 2, следует, что добавка фуллерена практически не оказывает влияние на трибологические свойства полученного эластомера в сторону уменьшения коэффициента трения. Кроме того, не выявлено различий по концентрациям наномодификатора к базовому эластомеру. Анализируя графики, можно заметить, что на процесс трения оказывает влияние природа присадки, т. е. введенные в качестве наномодификатора УНТ в состав базового эластомера эффективны по параметру снижения коэффициента трения.

Кроме того, при наиболее благоприятной концентрации присадок 2 мас. %, также наибольшую эффективность показывает наномодификатор – УНТ (рис. 2). Фуллерены же показали примерно одинаковую эффективность. Следует заметить, что УНТ является структурной модификацией углерода с хиральной структурой, а фуллерен имеет сфероподобную форму, которая, по нашему мнению, вступая во взаимодействие с молекулами эластомера, препятствуют образованию структур, благоприятных для процесса трения.

Трибологические исследования разработанного эластомера на машине трения ИИ-5018 производились при постоянной скорости ($n = 1000$ об/мин, $v = 1,5$ м/с) и изменяющейся нагрузке.

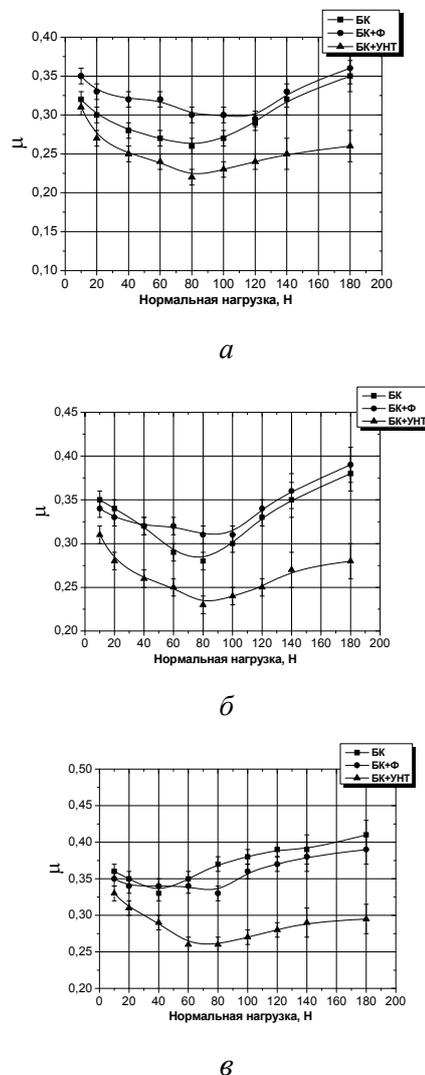


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки при различных линейных скоростях вращения:

а – 0,5 м/с; б – 1 м/с, в – 1,5 м/с, $T = 22^\circ\text{C}$, $t = 300$ с

В качестве фрикционной пары была выбрана пара диск – диск. Диски были изготовлены из стали 45, закаленной до HRC 56 и разработанного эластомера. Эта пара обеспечивает более реалистичные условия контактирования трущихся тел.

После каждой ступени нагружения контактной зоны регистрировали момент трения, исходя из значений которого рассчитывался коэффициент трения. Нашей задачей было определить, как влияет введение наномодификаторов в структуру эластомера на коэффициент трения контактирующей пары и на износостойкость трибосопряжения. Для этого проводились испытания полученных эластомеров в жестких условиях трения. Сопоставлялись данные испытаний эластомеров без добавления наномодификатора (бутадиеновый каучук, тиурамовые резины) и с исследуемыми модельными составами наномодификаторов.

По данным эксперимента были построены зависимости величины коэффициента эффективности присадки $k_{эф-2}$ от концентрации присадки в составе смазочной композиции

$$k_{эф-2} = \frac{P_0 - P_m}{P_0}, \quad (1)$$

где P_0 – максимальная нагрузка при трении с базовым эластомером, P_m – максимальная нагрузка при добавлении в эластомер наномодификаторов структуры.

Из анализа графиков, представленных на рис. 3, можно сделать следующие выводы:

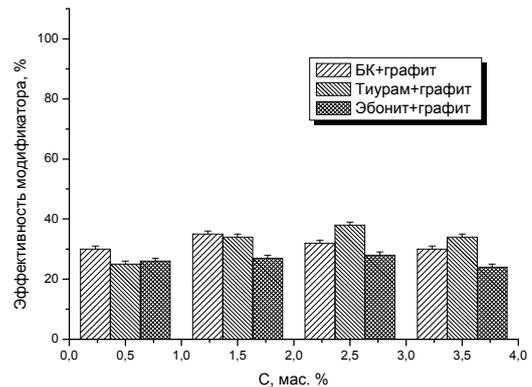
1. Наиболее эффективным наномодификатором для использования в жестких условиях трения является *бутадиеновый каучук*. В то время как эффективность присадки к *БК* достигает 100 %, в остальных каучуках она не превышает 50–70 % для самых лучших из изученных гетероциклических соединений;

2. Наибольшее увеличение износостойкости (в 2 раза) показал эластомер на основе *бутадиенового каучука* с добавкой углеродных нанотрубок *УНТ*;

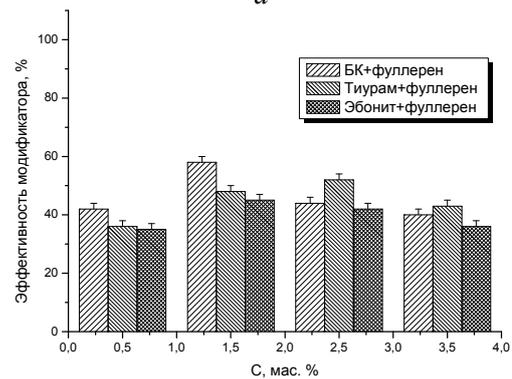
3. Существует зависимость между природой наномодификатора и его эффективностью на определенные процессы. Так, наибольшую эффективность в исследованиях по задиростойкости оказывают соединения с хорошо развитой структурой боковых фрагментов *УНТ*, в то время

как фуллерены практически не оказывают положительного действия;

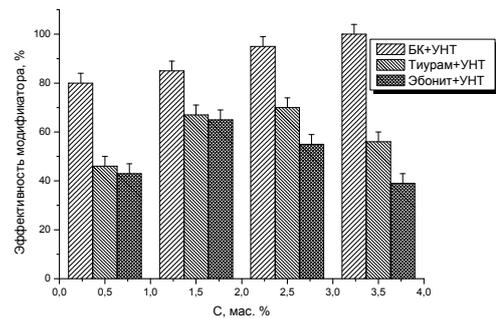
4. Оптимальной концентрацией наномодификатора является 2–4 мас. %, поскольку при дальнейшем увеличении концентрации эффективность остается постоянной.



а



б



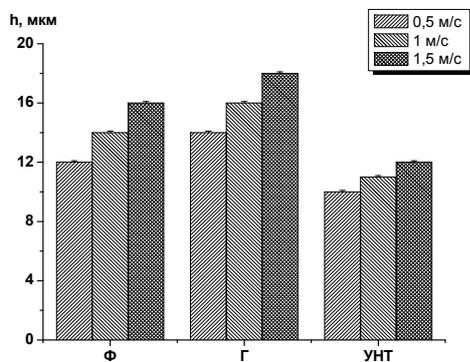
в

Рис. 3. Изменение относительной эффективности эластомера по параметру предельной нагрузки задира при использовании различных модификаторов по сравнению с базовыми эластомерами: а – графит; б – фуллерен (Ф); в – УНТ

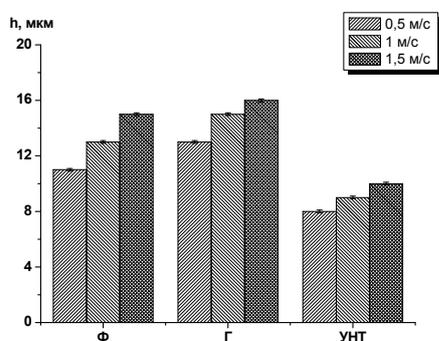
Как следует из гистограмм, представленных на рис. 3, определяющее значение оказывает не только тип модификатора, но и сам базовый эластомер, имеющий более высокую активность к взаимодействию и позволяющий получить наилучшую эффективность из всех исследуемых эластомеров.

При исследовании на износостойкость использовали схему трения диск – частичный вкладыш. Одним из главных критериев оценки износостойкости эластомерных материалов является влияние нагрузки на пару трения. Износостойкость эластомеров довольно сложным образом зависит от нагрузки, которая определяет площадь фактического контакта, величину деформативной зоны, средний размер пятна контакта и силу трения. Увеличение давления при постоянной скорости скольжения косвенно (через повышение температуры) влияет на износостойкость и усталостные свойства эластомерных материалов.

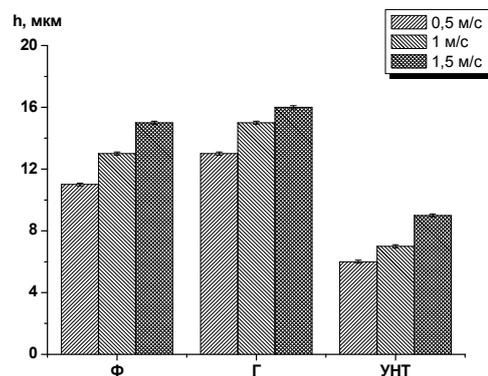
Зависимости, представленные на рис. 4, показывают работу эластомеров в технологических средах при постоянной температуре и различных нагрузках.



a



б



в

Рис. 4. Зависимость величины линейного износа полученного эластомера в:
 а – 0,5 мас. %, б – 1,5 мас. %, в – 2,5 мас. %
 от вращательной скорости контртела ($v_1=300$ об/мин,
 $v_2=500$ об/мин, $v_3=1000$ об/мин)
 и постоянной нормальной нагрузки 200 Н

Анализируя полученные зависимости, можно отметить: введение даже небольшого количества УНТ в эластомер существенно влияет на износостойкость эластомерных материалов. Нормальная нагрузка на образцы в процессе испытаний достигала 200 Н. С увеличением нагрузки износ увеличивался незначительно для разработанного образца.

По результатам проведенных исследований были проведены стендовые испытания эластомерных материалов. Стендовые испытания на износостойкость проводились на натуральных деталях и режимах с максимальным приближением к промышленным условиям. Внешний вид опытного образца представлен на рис. 5.



Рис. 5. Образец манжетного уплотнения для стендовых испытаний

В результате стендовых испытаний можно получить данные о конструкционной износостойкости – износостойкости с учетом конструктивных факторов. При этом между износостойкостью эластомерных материалов и конструкционной износостойкостью практически возможно расхождение, если конструктивные факторы сильно влияют на ход процесса изнашивания. Стендовые испытания, проведенные на стенде по схеме втулка – вал, имели целью провести проверку и подтверждение результатов исследования износостойкости на лабораторной машине трения ИИ-5018 и разработку рекомендаций для натуральных (промышленных) испытаний.

В качестве среды было выбрано трансмиссионное масло ТАД17И и СК ТАД17И + олеиновая кислота как наиболее часто встречающиеся в химической, текстильной промышленности и пожарной технике. Удельная нагрузка на пару трения составляла 2 МПа, скорость вращения вала 200–2550 об/мин (скорость скольжения – 0,2–2,6 м/с).

Метод определения износа – весовой без учета влагопоглощения (так как разработанный эластомер не поглощает влагу). На основании стендовых испытаний втулок из эластомера получена зависимость износа втулок от времени испытания при ступенчатом нагружении от 1 до 4 МПа (рис. 6, 7).

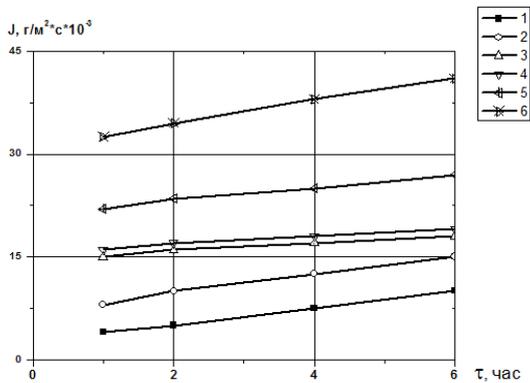


Рис. 6. Стендовые испытания манжетных уплотнений из разработанного эластомера. Среда – ТАД 17 И, температура среды 1, 5, 6 – 80 °С; 2, 3, 4 – 20 °С, удельная нагрузка: 4, 5 – 1 МПа; 2, 6 – 1,5 МПа; 1, 3 – 2 МПа

Измерения проводились на аналитических весах (весовой износ) и с помощью катетометра (линейный износ) в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Анализируя данные весового износа манжет из эластомера, можно отметить несколько увеличивающуюся интенсивность изнашивания с течением времени. Образцы из полученного эластомера были оставлены на более длительный срок испытаний как положительно показавшие себя при испытаниях на износостойкость, а также при испытаниях на стенде.

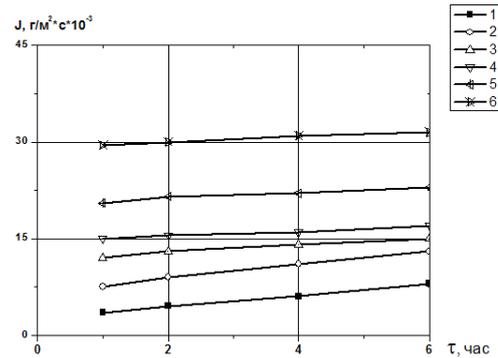


Рис. 7. Стендовые испытания манжетных уплотнений из разработанного эластомера. Среда – ТАД 17 И + олеиновая кислота, температура среды 1, 5, 6 – 80 °С; 2, 3, 4 – 20 °С, удельная нагрузка: 4, 5 – 1 МПа; 2, 6 – 1,5 МПа; 1, 3 – 2 МПа

Заключение

В работе дано решение актуальной задачи по повышению работоспособности и износостойкости манжетных уплотнений, применяемых в узлах пожарной техники, что имеет важное значение для научного обоснования и практической реализации повышения эффективности функционирования пожарных центробежных насосов.

- Исследованы основные физико-механические свойства эластомеров. Резину можно рассматривать как сшитую коллоидную систему, в которой каучук составляет дисперсионную среду, а наполнители – дисперсную фазу.
- Разработан новый материал для манжетного уплотнения на основе бутадиенового каучука и углеродных нанотрубок. Материал находится на стадии патентования.
- Испытание разработанного эластомерного материала на износостойкость провели при трех различных условиях. Установлено, что введение углеродных нанотрубок в структуру мате-

риала манжетного уплотнения снижает износ материала манжеты в 1,5–2 раза.

Список литературы / References

1. Барышев А. С., Зувев А. А., Соловьев М. Е., Ваганов В. Е., Гудков С. В. // Каучук и резина. 2013. № 1. С. 31–33.
2. Уайтсайделс Дж., Эйглер Д., Андерс Р. и др. Нанотехнологии в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / под ред. Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса ; пер с англ. М. : Мир, 2002. 292 с.
3. Онищенко З. В., Курпьянина В. С. // Каучук и резина. 1996. № 1. С. 11–13.
4. Раков Э. Г. // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 3, № 910. С. 8994.
5. Семенов И. В., Матюшин Е. Г., Регуш Л. А. // Каучук и резина. 1983. № 5. С. 37.
6. Пересторонина З. А., Аблеев Р. И., Баранец И. В., Курлянд С. К. // Каучук и резина. 2011. № 6. С. 11–14.
7. Чеховой А. Н. // Конструкции из композиционных материалов. М., 2005. Вып. 4. С. 817.

Поступила в редакцию 21.03.2014 г.