

А. В. Машков, К. Ю. Зерщиков

**РАЗРАБОТКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ МАТЕРИАЛОВ
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПОДШИПНИКОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

ООО «Константа 2» (г. Волгоград)

e-mail: man2898@mail.ru

Проведено сравнение двух типов подшипников (МФЛ и МФП). Для оценки работоспособности подшипников использовано компьютерное моделирование в программном обеспечении SIMULIA/Abaqus. Проведены экспериментальные испытания подшипников в условиях сухого трения, в ходе которых измерялись износ, температура и коэффициент трения. Результаты показали, что подшипники из МФЛ демонстрируют меньший износ, но более высокий коэффициент трения и рабочую температуру, что делает их предпочтительными для малоподвижных соединений. В то же время подшипники из армированного стекловолокном фторопласта обеспечивают более низкий коэффициент трения и температуру, что делает их более подходящими для подвижных соединений.

Ключевые слова: металл-полимерный подшипник скольжения, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние

A. V. Mashkov, K. Yu. Zershchikov

DEVELOPMENT OF ALTERNATIVE VARIANTS
OF METAL-POLYMER BEARING MATERIALS AND STUDY
OF THEIR PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS

ООО "Konstanta 2" (Volgograd)

A comparison of two types of bearings (MFL and MFP) was conducted. To evaluate the performance of the bearings, computer modeling was performed using the SIMULIA/Abaqus software. Experimental tests of the bearings were carried out under dry friction conditions, during which wear, temperature, and the coefficient of friction were measured. The results showed that bearings made of MFL exhibit less wear but a higher coefficient of friction and operating temperature, making them preferable for low-mobility connections. At the same time, bearings made of fiberglass-reinforced fluoroplastic provide a lower coefficient of friction and temperature, making them more suitable for movable connections.

Keywords: metal-polymer sliding bearing, finite element method, stress-strain state

В отличие от традиционных подшипников скольжения, требующих для нормальной эксплуатации наличия смазки, металлополимерные подшипники (МПП) скольжения сухого трения не нуждаются в обязательном наличии смазки в системе. Данная конструкция значительно облегчает обслуживание и повышает надежность работающей системы, а также снижает массу всей конструкции. В данной работе рассмотрены несколько вариантов исполнения полимерных подшипников сухого трения скольжения, изучены их эксплуатационные характеристики и проведено сравнение в условиях длительной работы.

Существует несколько типов лент для подшипников на основе полимерных композитов, которые впоследствии сворачиваются в разрезную втулку для использования в узлах трения, где недопустимо или крайне нежелательно применение смазки. Рассмотрим несколько вариантов, присутствующих на рынке:

металлофторопластовая лента (МФЛ), представляющая «сендвич», состоящий из металлической основы, на которую тонким слоем последовательно нанесены медь, бронза, и антифрикционный материал из суспензии фторопласта 4ДВ [3]. МФЛ выпускают ряд предприятий, в том числе ООО «Композит»;

композиционный материал для металлополимерных подшипников скольжения, выпускаемый ООО «Константа 2», включающий стальную основу, на которую нанесен адгезионный слой из композиции Ф4МБ и антифрикционный слой из армированного стекловолокном фторопласта 4 [4].

Металлическая подложка служит элементом, препятствующим потере устойчивости эластичного антифрикционного слоя при нагру-

жении. Действительно, каркас из различных композиций фторопласта имеет высокие прочностные характеристики на сжатие и мог бы служить самостоятельным элементом, воспринимающим нагрузку. Однако прочность фторопласта на изгиб низка, и, следовательно, необходим поддерживающий элемент, которым и является стальная подложка, соединенная с армирующим элементом с помощью адгезионного слоя. Кроме стали этот элемент можно изготавливать из любого другого материала, образующего жесткую подложку для антифрикционного слоя и прочно соединенного с ним, но стальная полоса является наиболее дешевым и технологичным элементом.

Часто подшипники работают в статическом или близком к нему режиме. Авторы [11] провели ресурсные испытания подшипников из двух разных материалов:

первый подшипник из нержавеющей стали с нанесенным на нее армированным стекловолокном фторопластом (далее МФП);

второй подшипник, представляющий свернутую в разрезную втулку металлофторопластовую ленту (далее МФЛ).

Известны основные критерии, определяющие работоспособность подшипников скольжения. Это, в первую очередь, допустимое давление в сопряжении p , температура T эксплуатации подшипника, скорость взаимного перемещения v и pv -фактор (произведение давления, действующего в подшипниковом узле, на скорость взаимного перемещения сопрягаемых поверхностей).

В таблице 1 представлены сравнительные характеристики двух основных типов металлофторопластовых подшипников, предлагаемых на российском рынке.

Таблица 1

Сравнительные характеристики подшипников МФП и МФЛ [1]

Параметр	Условия испытания на трение	Вид подшипника	
		МФП	МФЛ
Максимально допустимая нагрузка, МПа	статическая	400	250
	динамическая	180	150
	переменная	50	70
Максимальная скорость скольжения, м/с	сухое трение	0,5	2
	трение со смазкой	2	3
Максимальное значение pv-фактора, МПа · м/с	режим сухого трения	0,8	2
Коэффициент трения	минимальный	< 0,03	0,1
Рабочая температура, °С	максимальная	+ 260	
	минимальная	- 250	
Рабочие среды эксплуатации	Природный газ, нефть, нефтепродукты, органические растворители, растворы кислот и щелочей и др. агрессивные среды		

Для оценки работоспособности подшипника при квазистатическом нагружении нами были просчитаны эквивалентные напряжения и деформация антифрикционного слоя в момент нагружения подшипника с помощью программного обеспечения SIMULIA/Abaqus. Необходимость использования компьютерного моделирования объясняется наличием в конструкции подшипников элементов со значительно различающимися механическими свойствами.

МФП и МФЛ состоят из металлических и полимерных материалов. Свойства, требуемые

для расчета, указаны в табл. 2. Принято допущение, что все материалы идеально пластичны, т.е. нет упрочнения, и напряжения соответствуют пределу текучести. Деформации ограничены максимальным значением при разрыве.

Для оценки прочности были использованы два условия: условие предела текучести (отношение предельных напряжений к действующим) и условие по предельным деформациям.

$$\frac{\sigma_{\text{текучести}}}{\sigma_{\text{действующее}}} > 1.$$

Таблица 2

Свойства материалов МПП

Свойства	Сталь	Антифрикционный слой
Предел текучести при растяжении, МПа (МФП/МФЛ)	200/200	50/40
Относительное удлинение при разрыве, % (МФП/МФЛ)	20/20	5/5
Модуль упругости, ГПа (МФП/МФЛ)	200/200	2/2,5
Коэффициент Пуассона (МФП/МФЛ)	0,3/0.3	0,35/0.4
Коэффициент сухого трения скольжения фторопласта по стали	0,05	

Согласно формуле, предельная деформация подшипника под нагрузкой не должна превышать 0,1 мм. Общий вид модели представлен на рис. 1. Через элементы распределения усилий передана вертикальная нагрузка на верхнюю поверхность корпуса. К валу приложен момент.

Торцы вала закреплены от перемещений линейных, но допускается его вращение. Расчет выбран нелинейный.

На рисунках 2 и 3 показаны напряжения по Мизесу в антифрикционном слое моделируемых подшипников в МПа.

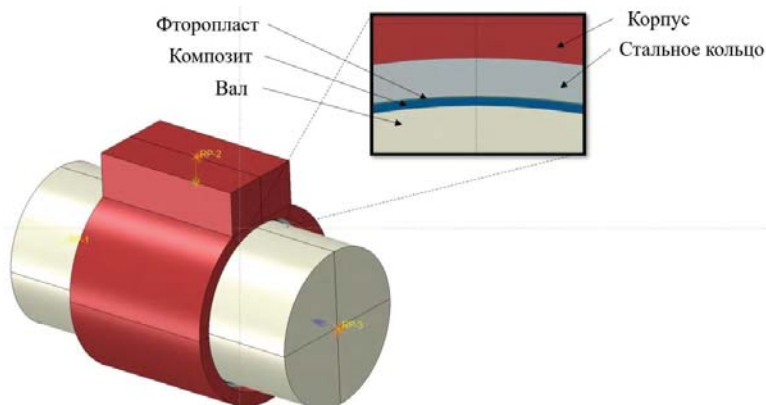


Рис. 1. Общий вид расчетной модели

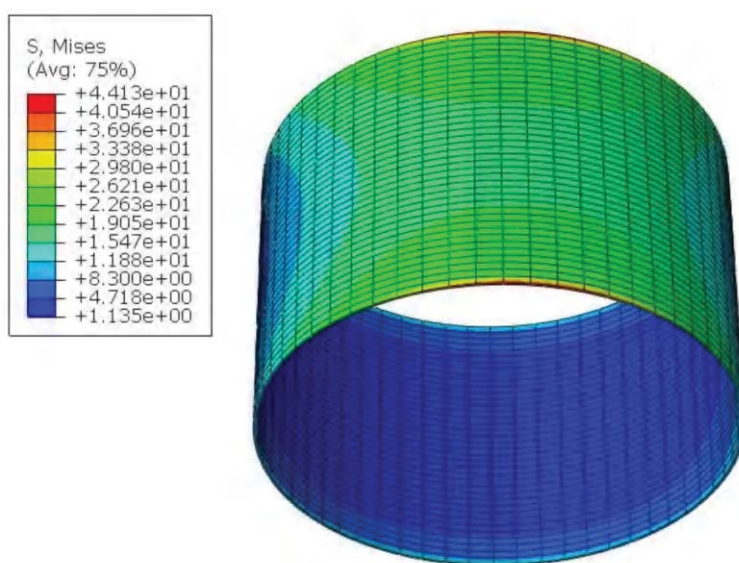


Рис. 2. Напряжения по Мизесу в антифрикционном слое МФП

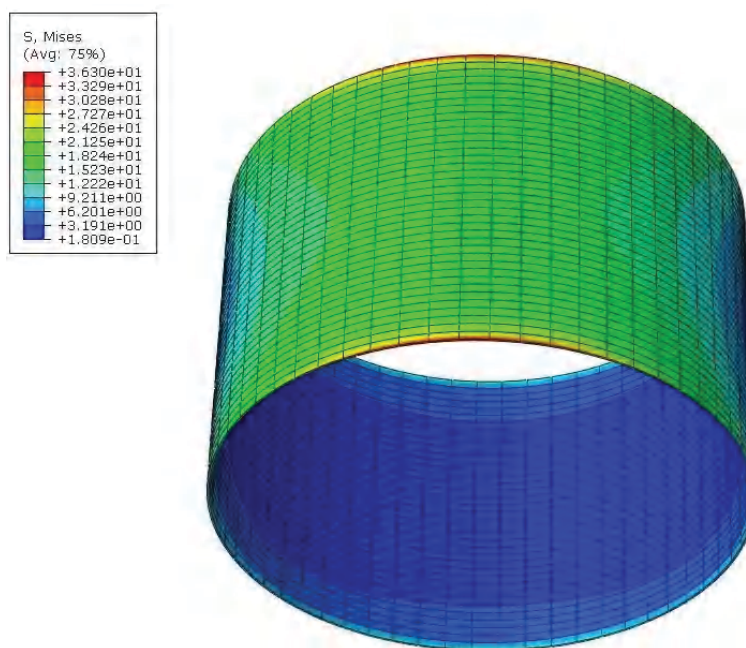


Рис. 3. Напряжения по Мизесу в антифрикционном слое МФЛ

Как видно из рис. 2 и 3, максимальные напряжения на уровне 44 МПа (МФП) и 36 МПа (МФЛ) возникают по краям антифрикционного слоя, что объясняется изгибом вала под нагрузкой, в остальной области они не превышают 30 МПа, что существенно ниже прочностных характеристик антифрикционного слоя.

Полученные результаты моделирования показывают, что критерии прочности выполнены,

значит подшипник должен быть работоспособен при заданных нагрузках. Поскольку напряжения не превышают предела текучести, подшипники работают в упругой области, следовательно длительный ресурс эксплуатации должен быть обеспечен.

Оба подшипника испытывались в условиях сухого трения в установке, представленной на рис. 4.

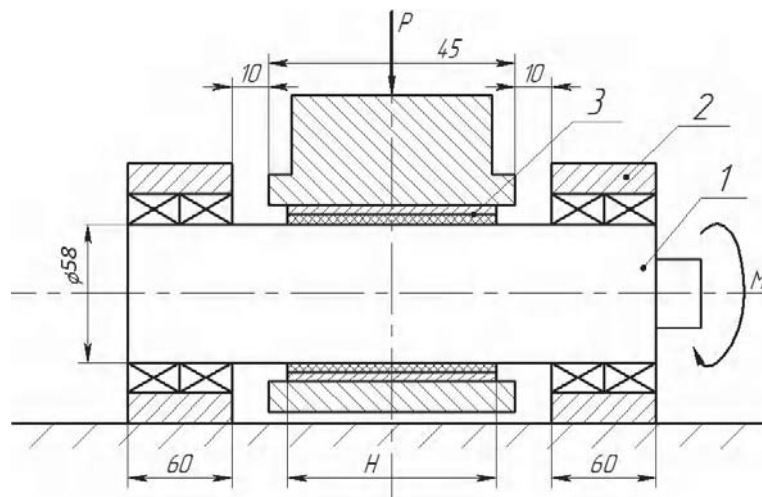


Рис. 4. Эскиз экспериментальной установки:

1 – вал с шероховатостью $Ra \leq 0,3$ мкм; 2 – шариковые подшипники; 3 – испытываемый подшипник

Испытания проводились при реверсивном вращении вала 1 (рис. 4) на 360 град со скоростью 5 об/мин. Подшипник 3 при этом был закреплен неподвижно в обойме, к которой

была приложена нагрузка P , рассчитанная исходя из давления 40 МПа и номинальной площади подшипника. На рис. 5 представлены подшипники, участвовавшие в испытаниях.

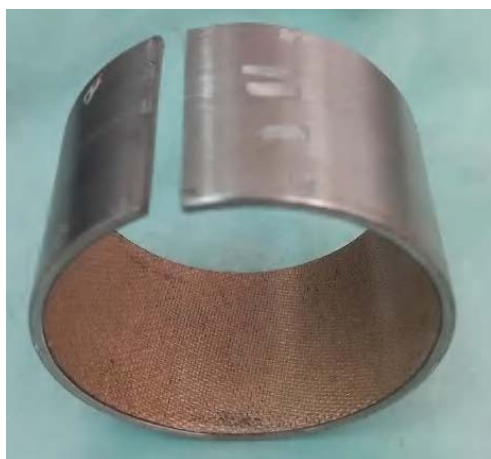


Рис. 5. Фото подшипников до испытаний

В течение всего эксперимента производились замеры толщины с двух сторон в точках по всей окружности подшипника, температуры и коэффициента трения.

На рисунке 6 представлен сравнительный

график изменения толщины подшипника (МФП) с корпусом из нержавеющей стали и антифрикционным фторопластовым слоем, армированным стекловолокном, и подшипника из МФЛ.

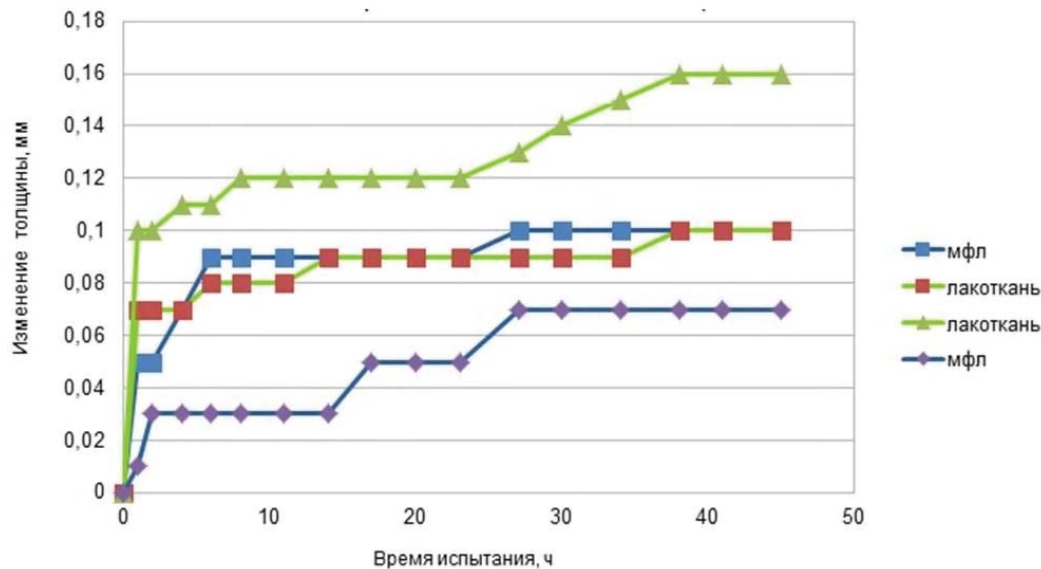


Рис. 6. Сравнение изменения толщин двух подшипников

Как видно из графика на рис. 6, в обоих случаях толщина с разных сторон подшипников изменяется неодинаково, что может быть связано с рядом причин, одна из которых неравномерное приложение нагрузки на опоры. Второй фактор, влияющий на различия в износе, может быть связан с тем, что максимальный износ соответствует стороне с установки привода, вращающего вал. После 45 ч испытаний можно отметить, что подшипник из МФЛ имеет

меньший износ, что связано меньшей толщиной антифрикционного слоя в нем, по сравнению с подшипником из армированного стекловолокном фторопласта. Но меньшая толщина антифрикционного слоя влечет за собой другие проблемы, одной из которых является повышенная температура работы подшипника при комнатной температуре. На рис. 7 представлено сравнение рабочих температур обоих подшипников.

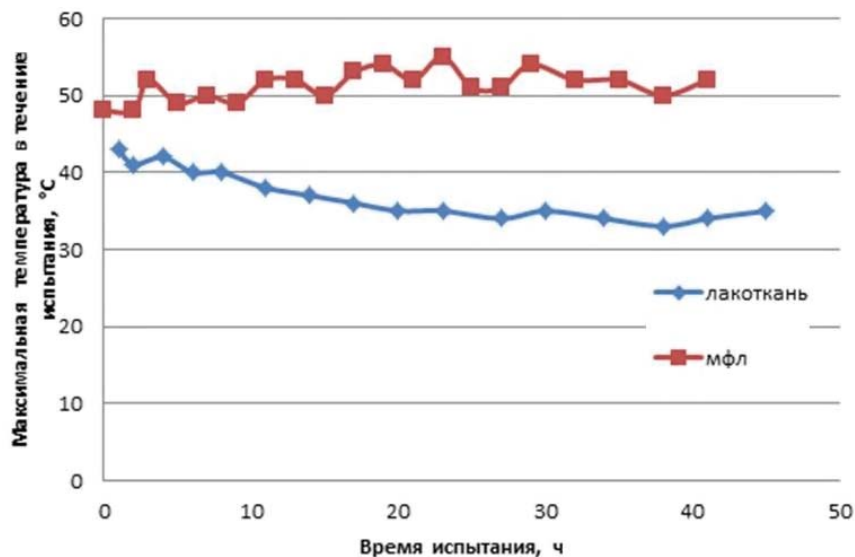


Рис. 7. Сравнение температуры работы двух подшипников в процессе эксперимента

На графике (рис. 7) видно, что средняя температура работы подшипника из МФЛ около 51°C, в то время как вариант с армированным стекловолокном фторопластом имеет рабочую температуру около 36 °C. Хотя температура ра-

боты подшипников и не высока, но при определенных обстоятельствах это может повлечь за собой некоторые проблемы, такие как увеличение износа и снижение срока службы. Увеличение температуры дополнительно приводит

к увеличению трения, что в свою очередь вызывает повышение потребления энергии и снижение общей эффективности системы [3]. Это

отчетливо видно при сравнении коэффициентов трения двух подшипников, представленном на рис. 8.

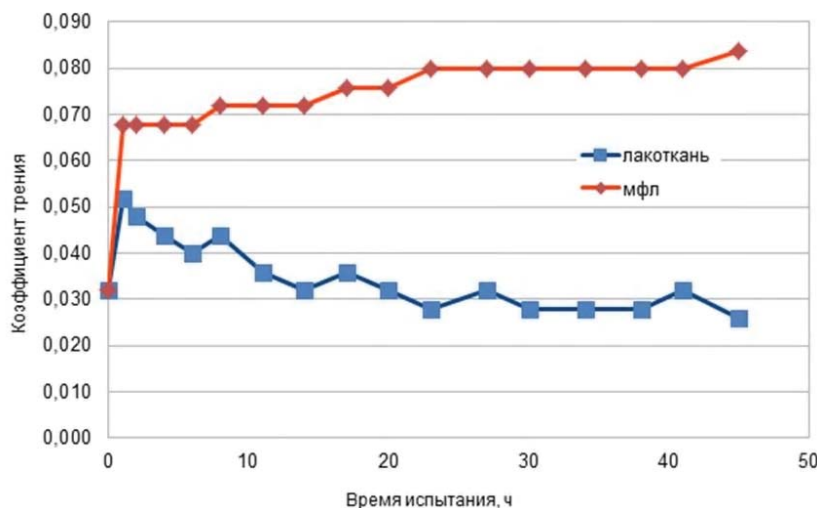


Рис. 8. Сравнение коэффициентов трения подшипника из МФЛ и подшипника из нержавеющей стали с армированным стекловолокном фторопластом

После определенного времени приработки оба подшипника выходят на свой рабочий коэффициент трения. Металлофторопластовая лента в данном критерии показала себя хуже в 2,5 раза, что связано с довольно тонким антифрикционным слоем, который после приработки размазывается по рабочей поверхности подшипника. Через некоторый промежуток времени испытания это приводит к формированию взаимодействия металл+металл. В случае с подшипником из армированного стекловолокном фторопласта на протяжении всего времени работы присутствует контакт металла с антифрикционным слоем, что и обеспечивает низкие коэффициенты трения и рабочую температуру.

Выводы

Оба подшипника с различными вариантами антифрикционного слоя смогли отработать в штатном режиме весь цикл испытания. Однако при выборе испытанных вариантов изделий в качестве уплотнений различных узлов необходимо учитывать некоторые усло-

вия работы этих подшипников. Для малоподвижных соединений, в которых необходимо обеспечивать минимальный зазор на протяжении всего времени работы следует использовать вариант МФЛ за счет низкого износа и высокого коэффициента трения. При работе в подвижных соединениях, в которых необходимо иметь низкий коэффициент трения, рекомендуется использовать подшипник с корпусом из нержавеющей стали и антифрикционным слоем из армированного фторопласта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зерщиков, К. Ю. Критерии работоспособности металлополимерных подшипников скольжения / К. Ю. Зерщиков // Вестник арматуростроителя. – № 1 (63). – 2021. – С. 16–19.
2. Зерщиков, К. Ю. Исследование напряженно-деформированного состояния металло-полимерного подшипника скольжения / К. Ю. Зерщиков, А. С. Елкин, Ю. В. Семенов, А. В. Машков // Конструкции из композиционных материалов. – 2023. – № 3 (171). – С. 5–12.
3. Семенов, А. П. Металлофторопластовые подшипники / А. П. Семенов, Ю. Э. Савинский. – М. : Машиностроение, 1976.
4. https://www.constant-2.ru/podshipniki_skolgenia