



УДК 621.762

© С. В. Гончаров, В. А. Иванов, 2010

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АНТИФРИКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФОРМИРОВАНИЯ<sup>1</sup>**

*Гончаров С. В.* – инженер кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса», тел.: (4212) 37-51-90, e-mail: Ya-84@list.ru; *Иванов В. А.* – д-р техн. наук, проф. кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса», тел.: (4212) 37-51-90 (ТОГУ)

Ресурс и надежность машин и оборудования, работающих при высоких нагрузках на рабочие органы, при экстремальных температурах и круглосуточном трех сменном технологическом режиме в значительной степени определяется ресурсом и надежностью подшипников и узлов трения, в частности, подшипников скольжения и уплотнений работающих, как правило, в тяжелых условиях смазывания, нагружения, условий воздействия агрессивной окружающей среды, попадания абразива и т. д., поэтому очень важно применять в таких узлах надежные и недорогие материалы, разработке которых и посвящена данная работа.

The life and reliability of machines and equipment that work at heavy loads, extreme temperatures, and twenty-four-hour 3-shifts depend to a great extent on the life and reliability of bearings and friction units, among them slide bearings. Those bearings operate, as a rule, under hard lubricating conditions, heavy loadings, in abrasive surroundings, and so on. So it is very important to apply reliable and inexpensive materials in these units. This research is devoted to the development of such materials.

*Ключевые слова:* полимерные материалы, подшипники скольжения, эпоксидная смола, трение.

Трение может быть полезным и вредным – эту аксиому человек освоил еще на заре цивилизации. Ведь два самых главных изобретения – колесо и добывание огня – связаны именно со стремлением уменьшить и увеличить эффекты трения. Известно, что 30 % производимой в мире энергии теряется на преодоление сил трения [1].

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках этапа работ по Государственному контракту П1733 от 25. 09. 2009.

Антифрикционный материал, работающий в тяжело нагруженных узлах трения, должен иметь высокую износостойкость, а также высокие прочностные показатели. Для повышения этих параметров вводят армирующий наполнитель и антифрикционные добавки [2]. Но в большинстве случаев влияние армирующего материала на антифрикционные характеристики полимерного материала является негативным, кроме того, в случае с высокомолекулярными волокнистыми армирующими наполнителями (например, угле- и стеклоткани) при интенсивной работе узла трения изнашивается не только втулка подшипника скольжения, но и вал данного узла, что приводит к дорогостоящему ремонту всего узла в целом. Поэтому создание материала с высокой несущей способностью и при этом высокой износостойкостью при низком коэффициенте трения является актуальной задачей исследований [3]. К тому же анализ рынка современных аналогичных материалов показывает крайний дефицит последних отечественного производства, что также подтверждает актуальность поставленной задачи исследований.

Целью данной работы являлось создание и исследование новых самосмазывающихся армированных полимерных материалов антифрикционного назначения для производства деталей узлов трения машин и механизмов с улучшенными прочностными и антифрикционными параметрами, а также разработка технологического процесса их получения.

Основными задачами исследования являлись:

1. Разработка на основе анализа существующих аналогов оптимальной структуры антифрикционного полимерного композиционного материала (ПКМ).
2. Разработка экспериментальной установки с контролем параметров формирования структуры изделий, а также технологии получения данных материалов.
3. Исследование влияния факторов процесса формирования на физико-механические, триботехнические и эксплуатационные свойства материалов.
4. Оптимизация свойств полимерного композиционного материала с точки зрения основных эксплуатационных свойств на основе полученных в ходе исследований данных.

Методология исследований включала в себя как стандартные методики на основе ГОСТов, так и разработанные лабораторией композиционных материалов Тихоокеанского государственного университета [4].

Основные исходные материалы исследования приведены в таблице.

Общий вид образцов материалов, полученных центробежным способом, приведен на рис. 1.

Предлагаемая модель структуры антифрикционного полимерного материала учитывает предыдущий опыт изготовления аналогичных материалов и имеет несколько допущений, основные из которых:

- поперечное сечение материала условно разбито на слои, между которыми благодаря послойному формированию не возникает четких границ;
- размеры порошковых наполнителей должны быть больше расстояний между переплетениями нитей армирующего материала;



– армирующий материал должен обладать достаточной жесткостью.

Исходные материалы исследования

Наименование материала	Марка	Стандарт
Связующие		
Смола эпоксидно-диановая	ЭД-20	ГОСТ 10587-84
Смола эпоксидно-диановая	УД-128	DIN 16945/4
Отвердитель полиэтиленполиамин	ПЭПА	ТУ 6-02-594-75
Армирующие наполнители		
Тик матрасный	С38-БЮ	ГОСТ5937-81 ТУ 2272-001-51605600-00
Стеклоткань	ЛЭСБ	
Полиамидная ткань	РУСАР®	
Углеродная ткань	УУ П11-0196	
Антифрикционные наполнители		
Фторопласт - 4	Ф-4	ГОСТ 10007-80
Коллоидно-графитовый препарат	ГС-1	ГОСТ 8295-73
Дисульфид молибдена	ДМИ-7	ТУ 48-19-133-90

Разделение структуры антифрикционного материала по слоям позволяет тем или иным наполнителям (в зависимости от назначения слоя) выполнять только те задачи, для которых они вводятся, тем самым оптимизируется структура материала в целом.

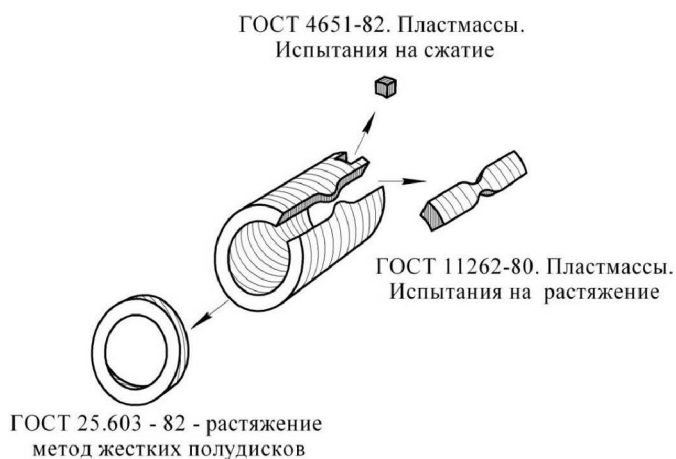


Рис. 1. Образец материала, полученного центробежным способом и получение из него образцов для основных испытаний

Несущая способность полимерного материала, полученного центробежным способом, во многом определяется качеством пропитки армирующего наполнителя, на что влияют такие факторы, как температура, частота вращения формы и время формования, совокупность которых определяют технологию получения того или иного требуемого материала, исходя из будущих условий его работы [4]. Качество пропитки армирующего наполнителя определяется предельной эффективной степенью армирования полимерного материала – соотношением связующего и армирующего компонентов полимерного материала, при котором он проявляет максимальные физические свойства. Сущность данного понятия поясняется рис. 2.

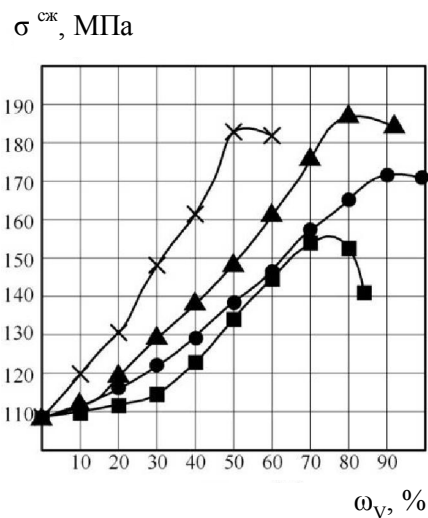


Рис. 2. Зависимость предела прочности на сжатие для полимерного материала на основе эпоксидной смолы YD-128, армированного различными тканями от степени армирования.

- – тик матрасный (С38-БЮ), ■ – бязь суровая (ГОСТ 10183-93),
- × – стеклоткань ЛЭСБ (ГОСТ 5937-81), ▲ – РУСАР® (ТУ 2272-001-51605600-00)

Здесь степень армирования полимерного материала представлена объемным содержанием армирующего наполнителя  $\omega_v$ , который показывает, какой объем занимает армирующий наполнитель в объеме полученного изделия. Соответственно остальной объем приходится на полимерное связующее. Анализируя представленную зависимость, можно выделить общую тенденцию для всех армирующих материалов, согласно которой прочность материала возрастает по мере насыщения полимерной матрицы армирующим наполнителем. Эта тенденция продолжается до тех пор, пока полимерного связующего достаточно для того, чтобы связывать волокна армирующего наполнителя, а также заполнять промежутки между слоями армирующего материала. После того, как возникает дефицит связующего, прочность материала падает и возникает перегиб на кривой. Именно этот перегиб кривой, а точнее значение  $\omega_v$  наивысшей точки кривой и есть предельная степень армирования материала. Физический смысл данного понятия –



показать, какое количество армирующего материала необходимо ввести в полимерный компаунд, чтобы получить структуру материала с максимальными прочностными характеристиками.

На рис. 3 приведена модель структуры антифрикционного полимерного композиционного материала. Из рисунка видно, что основными слоями материала являются: армирующий – для противостояния нагрузкам и антифрикционный – рабочий слой подшипника скольжения.

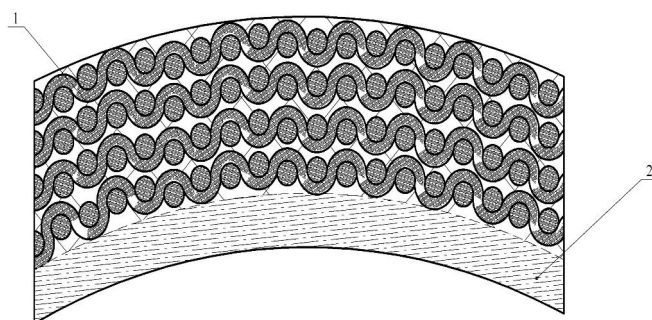


Рис. 3. Варианты структуры армированного полимерного материала антифрикционного назначения:

1 – армирующий слой, 2 – антифрикционный слой

Таким образом, предпочтительной структурой антифрикционного материала является структура с предельной степенью армирования армирующего слоя и оптимальным содержанием наполнителей антифрикционного слоя. Частицы матрицы антифрикционного слоя, воспринимая действующую на него нагрузку, передают ее частицам матрицы армирующего слоя, которые в свою очередь равномерно распределяя нагрузку, передают ее на волокна армирующего материала, заставляя работать весь армирующий материал. Частицы твердых смазок (ДМИ-7 и ГС-1) по мере износа антифрикционного слоя материала в процессе приработки переносятся на вал узла трения, обеспечивая эффект самосмазывания. Благодаря вышеперечисленным особенностям разработанная структура антифрикционного материала обеспечит оптимальное соотношение между высокими прочностными характеристиками и низким коэффициентом трения материала в целом (рис. 3).

Технология получения образцов заключалась в следующем. В зависимости от слоя в металлическую втулку, предварительно обработанную антиадгезионным составом, поочередно загружали полимерную композицию на основе эпоксидного связующего и наполнителей, требуемых для данного слоя, затем, выбрав режим формования, позволяющий качественно пропитать армирующий наполнитель или равномерно распределить антифрикционный наполнитель по слою, формовали каждый слой подшипника. Кроме того, композицию каждого последующего слоя загружали в момент частичного отверждения предыдущего.

Таким образом формовали все последующие слои подшипника, после чего изделие термообработывалось. Конечное изделие является цельнополимерным. Кроме того, благодаря тому, что композицию последующего слоя загружали в

момент частичного отверждения предыдущего, не происходило расслоения подшипника на границе раздела слоев. Благодаря наличию антиадгезионного состава и сильно различающихся коэффициентов температурного расширения материалов при остывании металлической формы происходит самопроизвольное отделение готового подшипника от формы, что облегчало извлечение подшипника.

Послойное формование подшипника в предварительно обработанной антиадгезионным составом металлической втулке путем поочередной загрузки полимерной композиции на основе эпоксидного связующего и наполнителей, требуемых для данного слоя, с последующим выбором режима формования, позволяющего равномерно распределить наполнители по слою, позволяет создать структуру с гарантированным распределением наполнителей по объему подшипника, что повышает долговечность и надежность подшипника в целом.

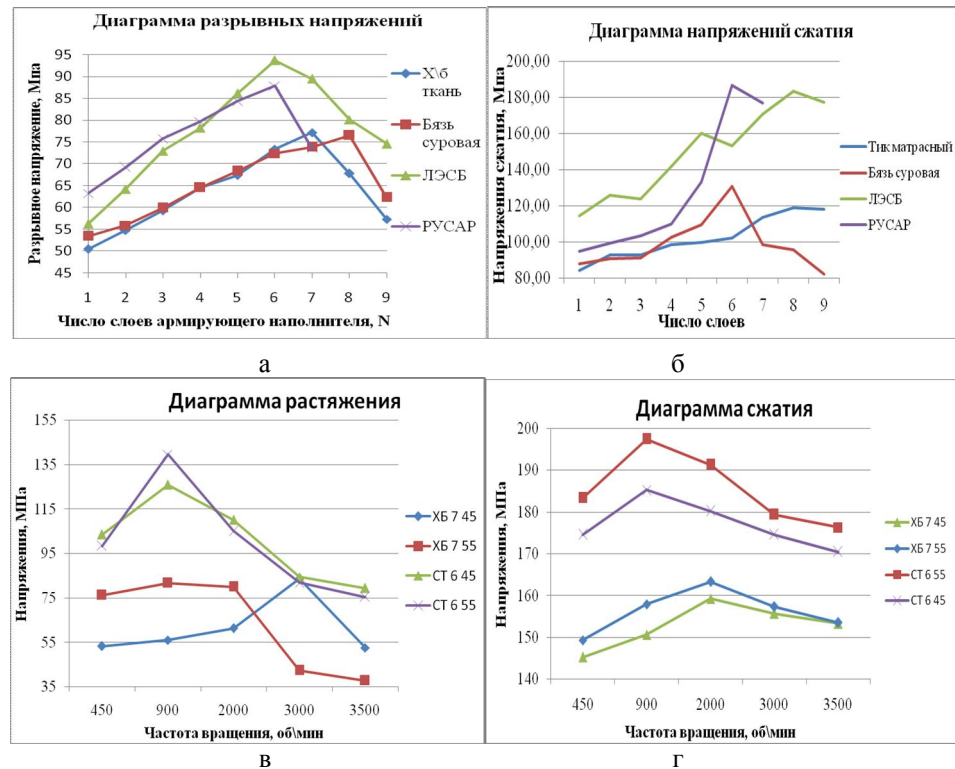


Рис. 4. Результаты исследования армирующего слоя

Загрузка каждого последующего слоя композиции в момент частичного отверждения предыдущего (когда вязкость композиции станет достаточной, чтобы удерживать форму слоя) обеспечивает дополнительное когезионное взаимодействие между слоями подшипника без использования дополнительных клеящих материалов.

Результаты, полученные в ходе исследований, приведены на рис. 4 – для армирующего слоя, на рис. 5 – для антифрикционного.



На рис. 4 приведены зависимости разрушающих напряжений растяжения (а) и сжатия (б) материала в зависимости от содержания в нем армирующего наполнителя для различных тканей. Анализом полученных данных определяется предельная эффективная степень армирования полимерного материала для каждого вида ткани и далее пересчитывается в процентное содержание (рис. 2). Далее исследовались влияния основных технологических факторов на материал с установленной эффективной степенью армирования (рис. 4, в, г) на примере армирующих тканей тика матрасного (ХБ) и стеклоткани (СТ). Цифры после данных сокращений означают: 6 и 7 – число слоев армирующего материала, соответствующих эффективной степени армирования материала (рис. 4, а, б), 45 и 55 – температуры формования образцов. Проведенные исследования выявили требуемую температуру формования (55 °С) и диапазон частоты вращения 900–1500 об/мин.

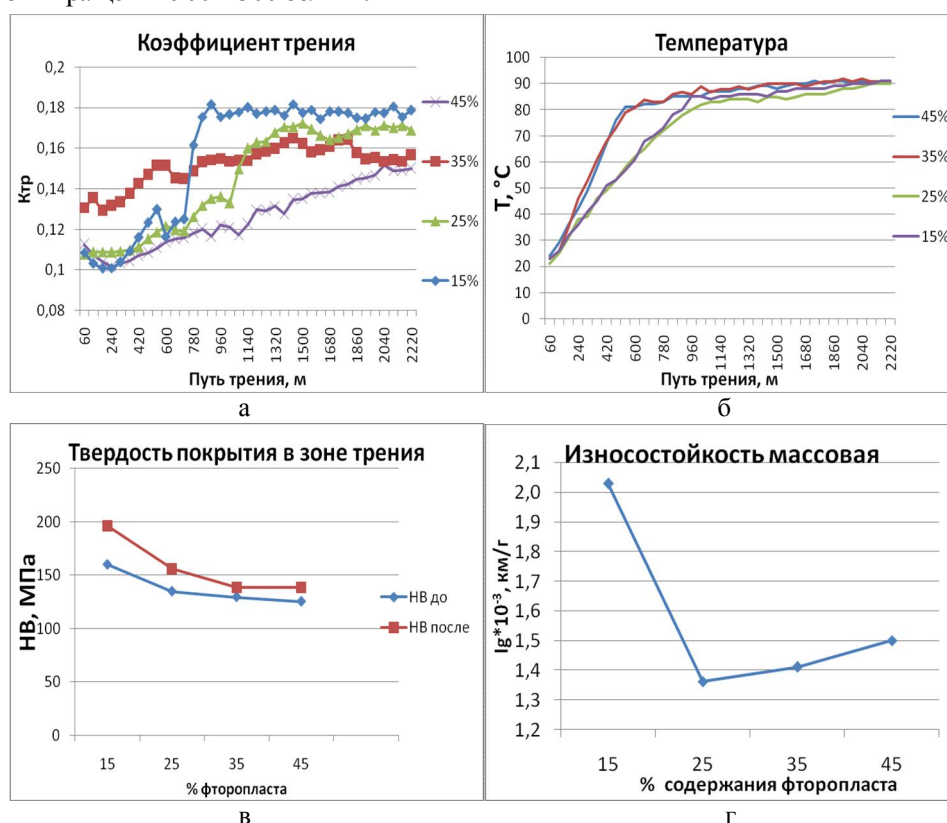


Рис. 5. Результаты исследования антифрикционного слоя

Во время исследования антифрикционного слоя подбирался состав наполнителей, результаты которого приведены на примере фторопласта - 4 (рис. 5, а), определялась рабочая температура в зоне сухого трения (рис. 5, б), было выявлено упрочнение покрытия в ходе процесса приработки (рис. 5, в), а также определена массовая износостойкость покрытия (рис. 5, г). Исследования по подбору состава проводились при скорости трения 0,2 м/с, и давлении 5 МПа. Проведенные иссле-

дования определили состав композиции антифрикционного слоя: фторопласт-4 – 25 % масс., ГС-1 – 7 % масс.,  $\text{MoS}_2$  – 5 % масс., связующее (УД-128 и ПЭПА в пропорции 1:10) – 63 % масс.

Ресурсные испытания материалов проводились в диапазоне давлений от 10 до 110 МПа и средней скорости трения 0,027 м/с на возвратно-вращательном стенде, имитирующем работу подшипника скольжения балансирной подвески автомобиля в условиях отсутствия смазки. Определялась максимальная несущая способность материала при трении без смазки и охлаждения, а также его ресурс работы. Время испытаний выбиралось достаточным, чтобы при минимальной нагрузке выйти на рабочий режим трения материала через режим приработки и составило 3 часа. Путь трения за это время при данной скорости составил 353,5 м. Известными аналогами для сравнения получаемых данных были полиамид 6.10 (капралон) и Ф4К20. По данным испытаний составлены диаграммы, позволяющие оценить работоспособность исследуемых материалов (рис. 6), а также диапазоны их применимости (рис. 7).

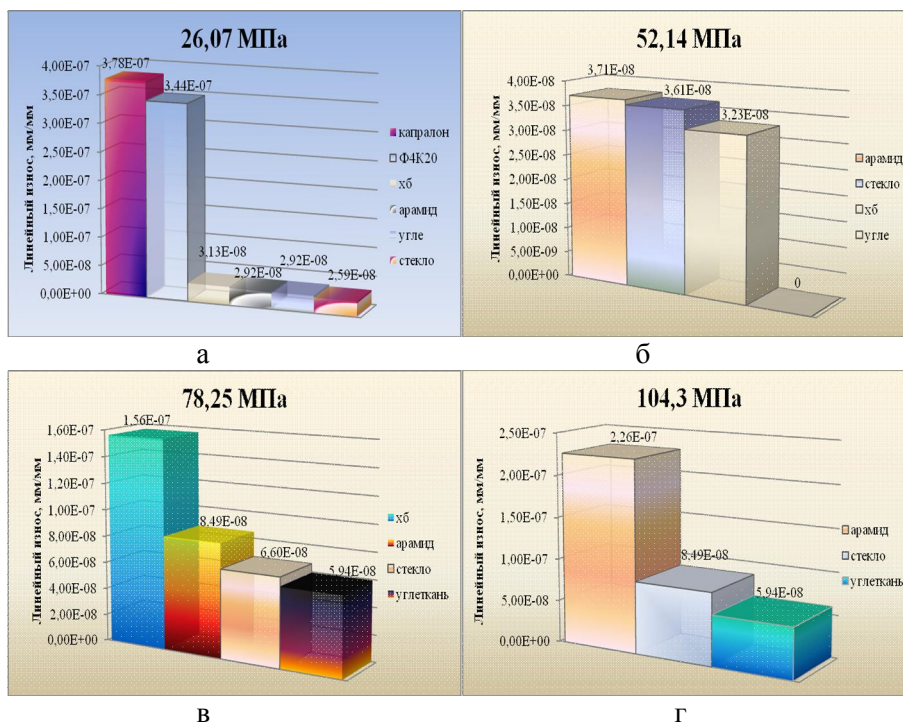


Рис. 6. Результаты исследования материалов на износостойкость

На рис. 6 приведены значения линейного износа при различных значениях действующей на образец нагрузки - 26,07, 52,14, 78,25 и 104,3 (рис. 6, а–г соответственно). Данные исследования показали, что максимальной несущей способностью обладает материал с армирующим слоем на основе высокомодульных воло-





кон (104,3 МПа). Линейный износ в этом случае составляет  $6-8,5 \cdot 10^{-8}$  мм/мм и определяется в большей степени предварительной деформацией антифрикционного элемента. Такие значения износа объясняются малым путем трения, поэтому его следует считать скорее приработочным, чем рабочим.

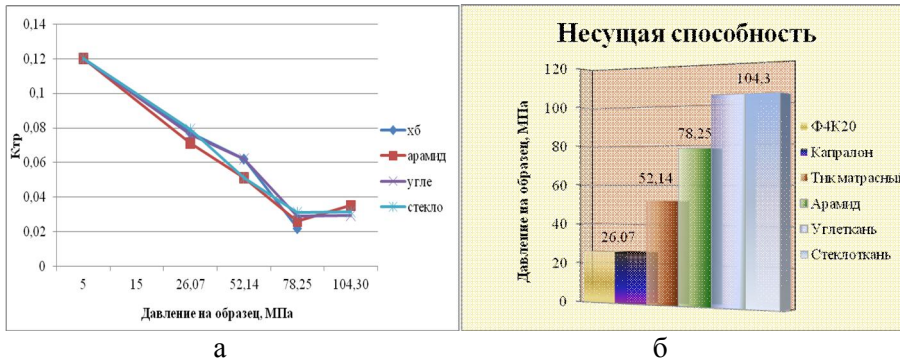


Рис. 7. Результаты исследования материалов на несущую способность

Таким образом можно построить диаграмму несущей способности материалов в зависимости от вида исследуемого материала (рис. 7, б). Также анализируя полученные в ходе исследований данные, можно заметить тенденцию коэффициента трения к уменьшению при возрастании нагрузки на материал, причем больших различий в зависимости от вида армирующего материала нет (рис. 7, а). Поэтому можно сделать вывод, что влияние армирующего компонента на изменение коэффициента трения незначительно, а к значительным изменениям приводят изменения состава антифрикционного слоя, а также факторов, влияющих на его формирование.



Рис. 8. Результаты ресурсных испытаний материала

На рис. 8 приведен характер изменения коэффициента трения в зависимости от пройденного пути трения, а также полиномиальная аппроксимация полученной кривой.

Для ресурсных испытаний был выбран материал с максимальной несущей способностью и режим сухого трения с  $p_a V = 1,41$  МПа·(м/с) на том же испытательном стенде. Путь трения составил 10044,6 м, при этом совершено 193 000 цикла возвратно-вращательного движения, интенсивность износа составила  $6,97 \cdot 10^{-9}$  мм/мм. По окончании испытаний линейный износ подшипника скольжения (в диаметральном направлении) составил  $0,04 \pm 0,01$  мм.

Таким образом, подытоживая полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. На основе анализа существующих аналогов полимерных материалов антифрикционного назначения разработана оптимальная структура антифрикционного ПКМ, а также технология его получения на основе центробежного литья.
2. Разработана экспериментальная установка для получения антифрикционных ПКМ с заданием и контролем параметров формования структуры ПКМ [5, 6].
3. Экспериментально установлены влияния технологических и конструктивных факторов процесса формования на физико-механические, триботехнические и эксплуатационные свойства материалов как отдельных, так и в комплексе.
4. Получены материалы с высокой несущей способностью и износостойкостью, характеристики которых способны конкурировать с аналогами, а по некоторым параметрам (например, несущая способность) и превосходят их.

### Библиографические ссылки

1. *Подшипниковые узлы современных машин и приборов: энциклопедический справочник* / В. Б. Носов, И. М. Карпухин, Н. Н. Федотов и др.; под ред. В. Б. Носова. М., 1997.
2. *Колесников В. И., Мигаль Ю. Ф., Мясникова Н. А.* Антифрикционные композиционные полимерные материалы для узлов трения // Вестн. Юж. науч. центра. 2004. Пилот. номер.
3. *Принципы создания композиционных материалов* / А. А. Берлин, С. А. Вольфсон, В. Г. Ошмян, Н. С. Ениконян. М., 1990.
4. *Гончаров С. В.* Методика исследования антифрикционных полимерных композитов, изготавливаемых методом центробежного формирования // Наука – Хабаровскому краю: материалы двенадцатого краевого конкурса молодых ученых и аспирантов (секция технических наук), Хабаровск, 19 янв. 2010 г. Хабаровск, 2010.
5. Создание станка для разработки технологии центробежного литья изделий из полимерных композиционных материалов / С. П. Захарычев, В. А. Иванов, В. А. Авдеев, С. В. Гончаров // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2007. № 1(4).
6. *Гончаров С. В., Иванов В. А., Захарычев С. П.* Оборудование для исследования процессов центробежного формирования изделий из полимерных композиционных материалов // Вестник машиностроения. 2009. № 3.