

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621

DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-11

Т. С. Будимирова, В. Я. Савицкий, А. Ю. Муйземнек, Р. С. Зиновьев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ РЕЖИМАМИ НАГРУЖЕНИЯ

Аннотация.

Актуальность и цели. Высокие эксплуатационные свойства и экономическая привлекательность способствуют широкому применению полимерных композиционных материалов (ПКМ) в изделиях различного функционального назначения. Конкурентоспособная технологичность изготовления подшипников скольжения (ПС) из ПКМ придает важность триботехническим исследованиям этих материалов. Предмет исследования составили закономерности изменения коэффициента трения ПС из ПКМ в зависимости от нагрузки и скорости в зоне трения. Цель работы – оценка возможности повышения фрикционно-износных характеристик тяжело нагруженных ПС из ПКМ при соблюдении условий бездефектности изготовления.

Материалы и методы. Дан анализ причин возникновения дефектов при изготовлении ПС методом намотки ленты из ПКМ на всех этапах технологического процесса. Обоснована важность теоретико-экспериментальных исследований изменения физико-механических характеристик изделий из ПКМ как на стадии производства, так и на стадии эксплуатации в экстремальных условиях.

Результаты. Приведены результаты моделирования поведения трибосопряжения «вал – втулка» при различных режимах нагружения в условиях сухого трения. Установлены пограничные значения давления и скорости, превышение которых приводит к схватыванию фрикционных поверхностей.

Вывод. Дальнейшее повышение смазывающих свойств ПС из ПКМ возможно путем их промасливания на заключительной операции изготовления.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, подшипник скольжения, условия бездефектности технологического процесса, физическое моделирование, «вал – втулка», фрикционное взаимодействие, режимы нагружения, триботехнические характеристики.

T. S. Budimirova, V. Ya. Savitskiy, A. Yu. Muizemnek, R. S. Zinov'ev

STUDYING THE INTERRELATION BETWEEN THE TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING POLYMER SLIDING BEARINGS AND OPERATIONAL LOADING CONDITIONS

Abstract.

Background. High operating properties and economic attractiveness encourage the wide use of polymeric composite materials (PCM) for products of various applications. Competitive manufacturability of PCM sliding bearings (SB) production motivates tribological investigations of the materials. Patterns of friction coefficients changing with speed and loading intensity in a friction area of PCM SB is the subject of our research. The goal of the work is to estimate the possibility of increasing friction and wear characteristics of the heavily loaded sliding bearings made of PCM under the conditions of defect-free manufacture.

Materials and methods. The analysis of causes of manufacturing defects in sliding bearings production is given for the stages in technological process of PCM strip winding. The importance of theoretical and experimental studies of physical and mechanical properties of products made of PCM at the stages of production and operation at extreme conditions is substantiated.

Results. The results of modeling the behavior of «shaft-sleeve» tribological conjunction under different operational loading conditions in the presence of dry friction are shown. Critical values of pressure and speed are established. Exceeding critical values will lead to friction surfaces gripping.

Conclusions. A further increase of lubricating properties of sliding bearings made of PCM is possible through treating SB with oil at the final operation of manufacturing.

Key words: polymer composite materials, sliding bearing, defect-free manufacture conditions, physical modelling, «shaft-sleeve», frictional interrelation, loading modes, tribological characteristics.

Введение

Композиционные материалы, как известно, представляют собой гетерогенные среды, жесткость и прочность которых определяются армирующими элементами, а совместная работа этих элементов обеспечивается изотропной матрицей, чаще всего полимерной. Высокая прочность, легкость, стойкость к внешним воздействиям и технологичность полимерных композиционных материалов (ПКМ) обеспечивают в ряде случаев их общепризнанные преимущества по сравнению с традиционными конструкционными материалами. Особое место в ряду полимерных антифрикционных материалов занимают армированные реактопласты, образованные послойной намоткой непрерывных волокон, ленточных или тканых наполнителей. Возможность создания материала одновременно с образованием конструкции подшипника скольжения (ПС), избирательного формирования структурных, физических и механических характеристик открывает широкие перспективы внедрения в практику машиностроения нового класса антифрикционных материалов.

Применение ПКМ в тяжело нагруженных ПС, работающих без смазки, способствует решению многих технических и экономических проблем, основными из которых являются экономия дефицитных медьсодержащих сплавов, снижение стоимости, повышение износостойкости, увеличение срока эксплуатации машин и уменьшение расхода запасных частей. Для этого ПКМ должны обладать высокой прочностью, температурной стойкостью при фрикционном разогреве, хорошей технологичностью. Исходные компоненты для изготовления ПС из ПКМ должны быть отечественного производства и недефицитными.

Выполнение этих требований можно достичь созданием многофункционального материала, состоящего из ряда последовательно изготовленных слоев, где каждый слой несет определенную функциональную нагрузку, а соединенные все вместе образуют монолитную конструкцию, обеспечивая выполнение требований рационального проектирования. В основе технологической реализации такой конструкции ПС лежит минимизация производственных дефектов.

1. Основы реализации бездефектной технологии изготовления полимерных подшипников скольжения

Технологический процесс (ТП) преобразования ПКМ в конструкцию ПС методом намотки можно представить эволюционной последовательностью этапов, приводящих к качественным структурным изменениям на границах переходов: входного контроля исходных компонентов; подготовки наполнителей и изготовления связующего; изготовления препрега; намотки трубчатой заготовки; отверждения трубчатой заготовки; механической обработки – изготовления подшипника; контроля качества готовой продукции.

В рамках такого подхода сформированы все теории [1–6], охватывающие процесс переработки ПКМ в целом. Они рассматривают процесс переработки как несколько характерных участков равновесного состояния структуры, которого невозможно достичь без изменения удельного объема материала. Изменению этого объема препятствуют различные внешние и внутренние факторы, вследствие чего в структуре возникают начальные напряжения, нередко приводящие к нарушению сплошности полимерной матрицы и кольцевой ориентации армирующего наполнителя. Такие участки равновесного состояния можно выделить на характерных этапах технологического процесса переработки ПКМ [7].

В рамках входного контроля важно не допустить несоответствие свойств исходных производственных материалов требованиям сертификатов, что обуславливает повышение дефектности ПКМ в готовом изделии.

Подготовка наполнителей во многом определяется качеством удаления текстильных замасливателей, аппретирования и сушки. Гидрофобно-адгезионная модификация поверхности стеклянных лент и тканей, включающая в себя термическую обработку с целью удаления парафиновой эмульсии (расшлихтовку), нанесение аппретов, способствующих химическому взаимодействию как с силанольными группами на поверхности волокон, так и со связующим, повышает прочностные свойства стеклопластиков на 25–30 % без снижения стабильности физико-механических характеристик [6]. Расшлихтовку проводят при температурах 400–500 °С в течение 2–4 ч до содержания замасливателя не более 0,25 %. Негативные последствия воздействия влаги в процессе переработки ПКМ проявляются в нарушении монолитности полимерной матрицы (повышенная пористость, неприклеи на границе раздела компонентов, трещины и межслоевые расслоения), эффективной пластификации связующего и снижении его температуры стеклования [4, 6, 8, 9].

На этапе изготовления связующего закладываются основы стабильности свойств материала в изделиях. Воспроизводимость физико-механических характеристик ПКМ во многом обеспечивается точностью дозировки, равномерностью смешения составляющих компонентов, отличающихся между со-

бой плотностью и вязкостью, отсутствием в приготовленном связующем воздушных пузырьков кавитационного происхождения и инородных включений.

Основные задачи операции пропитки наполнителя (изготовления препрега) – обеспечить полное заполнение связующим всех межволоконных пространств и получить требуемое соотношение армирующего и матричного материалов. При изготовлении препрега сушильная операция направлена на придание пропитанному наполнителю вязкопластичного состояния. Технологическая реализация операции изготовления препрега осуществляется протягиванием армирующего наполнителя через ванночку со связующим. Трубчатая заготовка заданной длины образуется путем послойного нанесения на вращающуюся технологическую оправку пропитанного наполнителя. С увеличением диаметра наматываемой заготовки обеспечивать необходимое давление формования становится проблематично из-за ограниченной прочности наносимого препрега. В таких случаях уплотнение создают прикаточным роликом в зоне контакта наматываемого препрега с поверхностью заготовки.

Предварительное уплотнение структуры, реализуемое на этом этапе, является обязательным для любого способа формования изделий. На этом этапе закладываются основы высокого качества изделия – требуемой формы и размеров, необходимых физико-химических и механических свойств. Преднамеренное создание в заготовке в процессе ее намотки полей деформаций и напряжений, обеспечиваемое предварительным уплотнением структуры и компенсирующее на всех последующих этапах возможные отрицательные последствия усадочных явлений, является эффективным средством для борьбы с образованием дефектов типа текстурной волнистости, расслоений, раковин, непроклеев и т.п. [7].

При отверждении заготовки в электропечах происходит уплотнение материала и, как следствие, падение предварительного натяжения армирующих элементов. Последующее охлаждение до температуры стеклования полимерной матрицы сопровождается развитием деформаций в неоднородной среде с нестабильными (зависящими от температуры) свойствами и возникновением усадочных явлений.

Механические явления, протекающие на отдельных этапах технологического процесса переработки, рассматриваются во многих работах: В. В. Болотина, Г. А. Ванина, В. В. Васильева, Н. С. Ениколопова, Ю. Н. Работнова, Ю. М. Тарнопольского, В. Т. Томашевского, В. С. Яковлева, В. Н. Шалыгина. Результаты исследований, изложенные в работах этих ученых, позволяют представить физическую сущность процессов на каждом из рассмотренных этапов ТП. Сложность получения практических рекомендаций по этим исследованиям обусловлена отсутствием физико-механических характеристик полуфабрикатов на каждом из этапов, необходимых для анализа механических явлений, а также специального оборудования и соответствующей аппаратуры для экспериментальной проверки процессов, происходящих в этих явлениях.

2. Экспериментальные исследования влияния режимов нагружения на работоспособность подшипника скольжения

Выбор материала для разрабатываемой вновь конструкции ПС неизбежно связан с проведением сравнительной оценки его свойств. Чтобы отдать предпочтение какому-либо материалу, проводится комплексный анализ ме-

ханических, теплофизических и триботехнических свойств материалов, их зависимости от изменения условий эксплуатации. В этой связи сравнительную оценку материалов целесообразно проводить для конкретной конструкции узла трения и условий его эксплуатации. Каждый из анализируемых классов материалов занимает свое «поле», в пределах которого его использование наиболее эффективно, и задачей материаловедов и технологов является расширение границ этого поля. Значимость меры оценки каждого отдельно взятого материала подшипника скольжения для конкретной конструкции узла трения и условий эксплуатации может быть различной. Так, например, известен опыт успешного использования капроновых подшипников в катках опорно-поворотного устройства порталных кранов, блоков успокоителя грейфера и противовеса кабельного барабана [5]. Скорость скольжения в этих трибосопряжениях составляет 0,08–0,25 м/с, а давление не превышает 10 МПа. В то же время ограниченная теплостойкость и повышенная хрупкость при температурах ниже 253 К, повышенная склонность к естественному и искусственному старению и относительно низкая прочность при сжатии ограничивают применение этих материалов в тяжело нагруженных узлах трения, эксплуатация которых осуществляется в разнообразных климатических условиях. Нестабильность размеров подшипников из полиамидов в процессе эксплуатации, обусловленная повышенными значениями коэффициента линейного температурного расширения и изменением линейных размеров при изменении влажности окружающей среды, вызывает необходимость увеличения начального сборочного зазора в трибосопряжении, что не всегда желательно с точки зрения эксплуатации.

В последнее время из-за нарастающего дефицита и высокой стоимости цветных металлов становится актуальной проблема изыскания материалов-заменителей, не уступающих бронзам и латуням по прочностным характеристикам. И особенно остро эта проблема возникает в эксплуатирующих предприятиях при ремонте машин и восстановлении изношенных деталей. Известно, что ведущие зарубежные фирмы (*Caterpillar, Kamatsu, Marion*) достаточно широко используют ПКМ в конструкциях узлов трения горнодобывающей, дорожно-строительной, автомобильной техники. Именно ПКМ для ПС, работающих в условиях граничного и сухого трения, не уступающие по физико-механическим и антифрикционным свойствам медесодержащим сплавам, изготовленные из доступного и серийно выпускаемого сырья и экономически эффективные в изготовлении, могут найти широкое применение в узлах трения этих машин. Сравнительный анализ вновь разрабатываемых узлов трения на основе подшипников скольжения из ПКМ с подшипниками из цветных металлов, пределы совершенствования которых почти полностью исчерпаны, выявляет очевидные преимущества композитов, использование которых позволяет повысить технические характеристики узлов трения и агрегатов в целом [7].

В рамках рассмотренного ТП были изготовлены две партии ПС (табл. 1), у которых внутренний слой был изготовлен из двух слоев ленты ЛУ-П/0,2. При изготовлении ПС партии № 1 слои ленты ЛУ-П/0,2 наматывались под углом 90°, а при изготовлении партии № 2 – 45°. Корпус ПС изготавливался из стеклоткани марки Т-10НТ-14. Материал связующего в обоих случаях – эпоксифенолформальдегидная смола.

Таблица 1

Характеристика изготовленных ПС

№ партии	Тип наполнителя	Количество слоев	Толщина монослоя, мм	Схема армирования
1	ЛУ-П/0,2	2	0,15	90/2
	стеклоткань	19	0,25	90/19
2	ЛУ-П/0,2	2	0,15	45/2
	стеклоткань	19	0,25	90/19

Схема модельного узла одностороннего трения типа «вал–втулка» (рис. 1) была реализована на специальной машине трения 2070 СМТ-1 с использованием камеры, воспроизводящей условия закрытого узла трения.

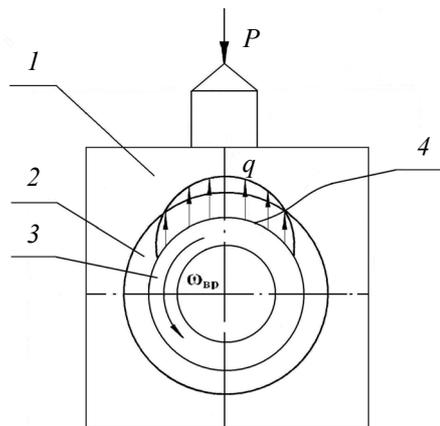


Рис. 1. Схема модельного узла трения

Расчет давления q на пятне контакта проводился при фиксированных значениях нормальной нагрузки P , определяющих режимы испытаний, по формуле

$$q = P/A_r, \quad (1)$$

где A_r – геометрическая площадь контакта.

Коэффициент трения f исследуемого материала рассчитывался по формуле

$$f = M_{\text{тр}}/FR, \quad (2)$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трения на образце; R – радиус поверхности трения, равный 0,02 м.

Анализ совместного влияния эксплуатационных факторов $[q, v]$, определяющих экстремальный режим эксплуатации исследуемого узла трения, включал фиксацию давления q на определенном значении и изменение скорости трения v до такого значения, при котором еще обеспечивалась стабильность триботехнических характеристик.

Определение диапазонов рабочих режимов исследуемых ПС проводилось следующим образом:

1) устанавливались входные параметры: время испытаний для обоих образцов – 8 мин; нормальная нагрузка фиксировалась в семи точках;

2) определялись выходные параметры: момент трения (с помощью электронного потенциометра и самописца машины трения 2070 СМТ-1); контактное давление вычислялось по формуле (1); коэффициент трения – по формуле (2); измерялась площадь пятна контакта.

С использованием результатов экспериментальных исследований оценивалось семь значений $(q \cdot v)$ -факторов на границе работоспособности трибосопряжений.

Методика испытаний состояла в следующем:

1. Поверхности образцов обезжиривались и просушивались.

2. Образец (втулка из ПКМ) и контрообразец (вал из стали 40Х) закреплялись в держателе машины трения 2070 СМТ-1 в соответствии с установленными требованиями [10].

3. Пуск машины производился в следующей последовательности: задавалась требуемая скорость вращения шпинделя испытательной установки, обеспечивающая необходимые параметры вращательного движения; нагрузка подавалась плавно от винта механизма нагружения через рычаг испытательной камеры, контроль значения требуемой нагрузки осуществлялся по встроенному миллиамперметру стойки управления машины трения; включался самописец стойки управления для записи значений момента трения.

4. После 8 мин испытаний или при достижении предельного момента трения (его значение резко возрастало) машина трения отключалась в обратной последовательности.

5. После каждого опыта проводился анализ состояния поверхностей трения и значений выходных параметров с соответствующими записями в журнал испытаний и обработкой результатов эксперимента по установленной форме.

6. Испытаниям подвергались образцы из двух партий (табл. 2, 3).

Таблица 2
Исследование триботехнических характеристик ПС партии № 1

P , Н	n , мин ⁻¹	v , м/с	$M_{тр}$, Нм	$f_{тр}$	A_r , см ²	q , МПа	$q \cdot v$, МПа·м/с
3000	57	0,12	14,3	0,24	–	2,44	0,29
2000	72	0,15	11,2	0,27	12,24	1,63	0,24
1500	96	0,2	8,6	0,28	–	1,22	0,24
1000	96	0,2	7,0	0,35	–	0,81	0,16
500	125	0,25	5,2	0,52	–	0,40	0,1
200	150	0,3	3,6	0,9	–	0,16	0,05

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 2, 3, из которых видно, что предельное значение давления в зоне трения, при котором исследуемые узлы трения сохраняют работоспособность, составляет 2,44–3,16 МПа. Предельное значение линейной скорости трения не превышает 0,3 м/с.

Как следует из рис. 2, при малых скоростях трения (до 0,2 м/с) наибольшую зону работоспособности имеет втулка из партии № 2, у которой схема армирования углеродной ЛУ-П/0,2 была 45/2. При увеличении скорости

трения свыше 0,2 м/с картина меняется – лучшую работоспособность проявляет втулка партии № 1, у которой схема армирования углеленты ЛУ-П/0,2 была 90/2. Из анализа рис. 3 следует, что исследуемые трибосопряжения в режиме сухого трения сохраняют работоспособность при удельной нагрузке 1,5...3,0 МПа, которой соответствуют значения коэффициента трения от 0,3 до 0,2.

Таблица 3

Исследование триботехнических характеристик ПС партии № 2

P , Н	n , мин ⁻¹	v , м/с	$M_{тр}$, Нм	$f_{тр}$	A_r , см ²	q , МПа	$q \cdot v$, МПа·м/с
3000	57	0,12	12	0,2	–	3,16	0,38
2000	72	0,15	10,4	0,26	9,46	2,11	0,32
1500	84	0,175	9,0	0,3	–	1,58	0,29
1000	96	0,2	7,4	0,37	–	1,05	0,2
500	110	0,22	6,6	0,66	–	0,53	0,11
200	125	0,25	3,9	0,97	–	0,21	0,05

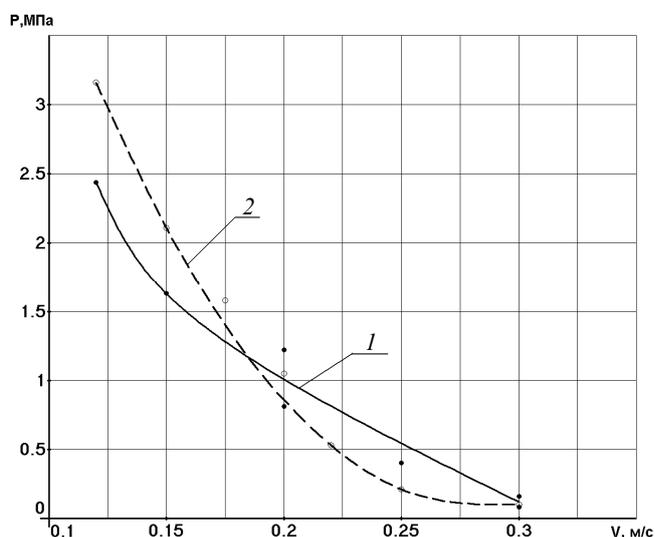


Рис. 2. Граничные значения работоспособности исследуемых трибосопряжений: 1 – партия № 1, 2 – партия № 2

Более объективное описание процессов, происходящих в зоне трения, возможно при совместном учете влияния давления и скорости в зоне трения на изменение коэффициента трения. Рисунок 4 наглядно показывает преимущества ПС из партии № 2. Очевидно, что зона работоспособности этого ПС будет ограничиваться в точке перегиба графика при значении $f = 0,45$. При этом $(q \cdot v)$ -фактор может варьироваться в пределах 0,15–0,38 МПа·м/с.

Заключение

Как показывает мировой опыт, широкое применение ПКМ в конструкциях изделий различного функционального назначения обусловлено снижением массы создаваемых изделий, снижением затрат, повышением прочности, безотказности и других эксплуатационных характеристик. Вместе с тем

из анализа проведенных исследований видно, что прямое заимствование технологии изготовления и последующая эксплуатация сопровождаются рядом проблем. Так, наработка на отказ тяжело нагруженных узлов трения может быть снижена из-за наличия в конструкциях ПС производственных дефектов. Превышение предельных скоростей и нагрузок вызывает скачкообразный рост коэффициента трения, что неизбежно приводит к фрикционному разогреву и последующему разрушению ПС. Наряду с приведенными рекомендациями по бездефектному производству ПС необходимо усовершенствование ТП по повышению смазывающих свойств применяемых ПКМ.

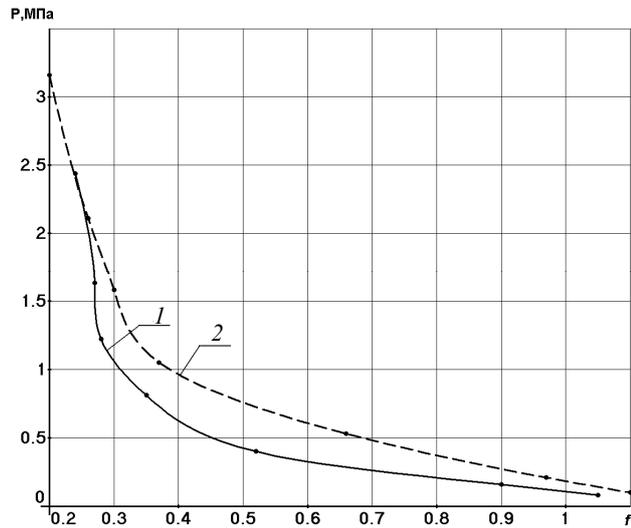


Рис. 3. Влияние давления q на изменение коэффициента трения f .
1 – партия № 1; 2 – партия № 2

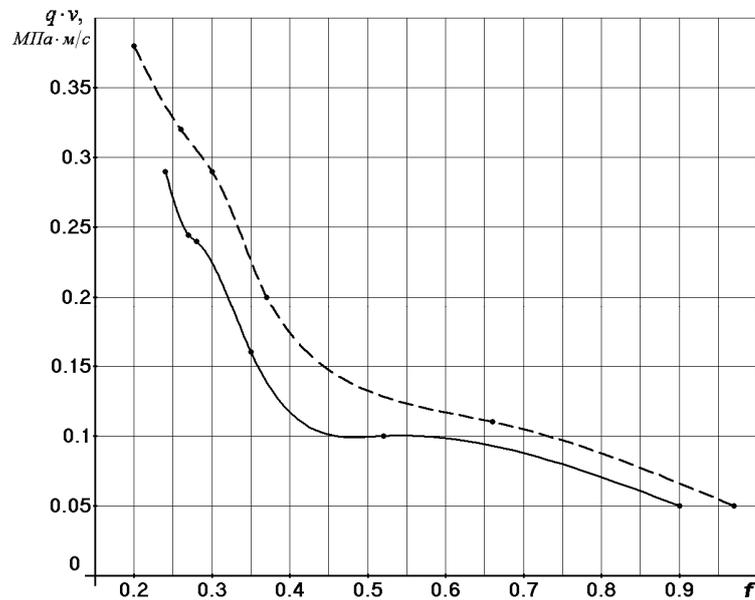


Рис. 4. Влияние $(q \cdot v)$ -фактора на изменение коэффициента трения f

Анализ результатов проведенных исследований показал, что для достижения этой цели не достаточно применения в ПС антифрикционного слоя, например из графитосодержащей ленты ЛУ-П/0,2 с определенной схемой армирования волокон. Необходима разработка такой структуры ПКМ, которая бы поддерживала в зоне трения ПС режим самосмазывания в течение заданного периода эксплуатации.

Список литературы

1. **Болотин, В. В.** Влияние технологических факторов на механическую надежность конструкций из композитов / В. В. Болотин // *Механика полимеров*. – 1972. – № 3. – С. 529–540.
2. **Болотин, В. В.** Анализ технологических напряжений в намоточных изделиях на протяжении всего процесса изготовления / В. В. Болотин, А. Н. Воронцов, Р. Х. Мурзаханов // *Механика композитных материалов*. – 1980. – № 3. – С. 500–508.
3. **Тарнопольский, Ю. М.** Проблемы механики намотки толстостенных конструкций из композитов / Ю. М. Тарнопольский // *Механика композитных материалов*. – 1992. – № 5. – С. 618–626.
4. **Томашевский, В. Т.** Теория и методы обеспечения бездефектной макроструктуры армированных полимеров при переработке в конструкции специальной техники / В. Т. Томашевский, В. И. Смыслов, В. Н. Шалыгин, В. С. Яковлев. – М. : ЦНИИинформации, 1984. – 316 с.
5. **Исаков, Ю. А.** Расчет контактных давлений при опрессовке канатом цилиндрической пластмассовой оболочки, подверженной действию нестационарного температурного поля / Ю. А. Исаков, А. А. Филипенко, В. Д. Протасов // *Механика полимеров*. – 1977 – № 2. – С. 220–224.
6. **Томашевский, В. Т.** Научные основы технологических процессов переработки композиционных материалов в конструкции бездефектной структуры / В. Т. Томашевский и др. – Л. : Румб, 1980. – Ч. 1. – 170 с.
7. **Мережко, Ю. А.** Подшипники скольжения из армированных реактопластов. Кн. 1. Исследования и конструкторская отработка подшипников из полимерных композиционных материалов / Ю. А. Мережко, Р. С. Зиновьев. – Екатеринбург : Межрегиональный совет по науке и технологиям, 2002. – 249 с.
8. **Томашевский, В. Т.** Прогнозирование технологических дефектов и способы их предотвращения в намоточных армированных полимерах / В. Т. Томашевский и др. // Тезисы докладов I Всесоюзн. конф. по композиционным полимерным материалам и их применению в народном хозяйстве. – Ташкент : Изд-во ТПИ, 1980. – Т. III. – С. 40.
9. Исследование влияния микроструктуры полимерных композитов на эксплуатационные свойства подшипников скольжения импульсных тепловых машин / А. И. Богомолов, В. М. Голощапов, В. Я. Савицкий, А. Ю. Муйземнек, Р. С. Зиновьев // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2014. – № 4 (32). – С. 158–176.
10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации машины для испытаний на трение и износ 2070 СМТ-1. – М. : ВЦИО, 1980. – 71 с.

References

1. Bolotin V. V. *Mekhanika polimerov* [Polymer mechanics]. 1972, no. 3, pp. 529–540.
2. Bolotin V. V. et al. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Composite material mechanics]. 1980, no. 3, pp. 500–508.
3. Tarnopol'skiy Yu. M. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Composite material mechanics]. 1992, no. 5, pp. 618–626.

4. Tomashevskiy V. T., Smyslov V. I. et al. *Teoriya i metody obespecheniya bezdefektnoy makrostruktury armirovannykh polimerov pri pererabotke v konstruksii spetsial'noy tekhniki* [Theory and methods of defect-free makrostructure ensuring in reinforced polymers at processing into constructions of special machinery]. Moscow: TsNII-informatsii, 1984, 316 p.
5. Isakov Yu. A., Filipenko A. A., Protasov V. D. *Mekhanika polimerov* [Polymer mechanics]. 1977, no. 2, pp. 220–224.
6. Tomashevskiy V. T. et al. *Nauchnye osnovy tekhnologicheskikh protsessov pererabotki kompozitsionnykh materialov v konstruksii bezdefektnoy struktury* [Scientific basis of technological processes of composite material processing into defect-free constructions]. Leningrad: Rumb, 1980, part 1, 170 p.
7. Merezhko Yu. A., Zinov'ev R. S. *Podshipniki skol'zheniya iz armirovannykh reaktoplastov. Kn. 1. Issledovaniya i konstruktorskaya otrabotka podshipnikov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov* [Slider bearings made of reinforced thermosetting plastics. Book 1. Research and design testing of bearings made of polymer composite materials]. Ekaterinburg: Mezhhregional'nyy sovet po nauke i tekhnologiyam, 2002, 249 p.
8. Tomashevskiy V. T. et al. *Tezisy dokladov I Vsesoyuzn. konf. po kompozitsionnym polimernym materialam i ikh primeneniyu v narodnom khozyaystve* [Proceedings of I All-USSR conference on composite polymer materials and application thereof in the national economy]. Tashkent: Izd-vo TPI, 1980, vol. III, p. 40.
9. Bogomolov A. I., Goloshchapov V. M., Savitskiy V. Ya., Muiyemnek A. Yu., Zinov'ev R. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 4, pp. 158–176.
10. *Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii mashiny dlya ispytaniy na trenie i iznos 2070 SMT-1* [Technical specifications and operationg instructions for tension and wear testing 2070 SMT-1]. Moscow: VTsIO, 1980, 71 p.

Будимирова Татьяна Сергеевна

преподаватель, кафедра
общепрофессиональных дисциплин,
Пензенский артиллерийский
инженерный институт (Россия,
г. Пенза-5)

E-mail: demeshoffa@mail.ru

Budimirova Tat'yana Sergeevna

Lecturer, sub-department of professional
disciplines, Penza Artillery Engineering
Institute (Penza-5, Russia)

Савицкий Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра № 11, Пензенский
артиллерийский инженерный институт
(Россия, г. Пенза-5)

E-mail: W.savis@gmail.com

Savitskiy Vladimir Yakovlevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department №11, Penza Artillery
Engineering Institute (Penza-5, Russia)

Муиземнек Александр Юрьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: muiyemnek@yandex.ru

Muiyemnek Aleksandr Yur'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Зиновьев Радий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
технический директор группы
научно-промышленных компаний
«Полидор» (Россия, г. Челябинск,
ул. Федорова, 1а)

E-mail: zinoviev@polidor.ru

Zinov'ev Rادیy Sergeevich

Candidate of engineering sciences,
associate Professor, technical director
of the «Polydor» research and production
group (1a Fyodorova street, Chelyabinsk,
Russia)

УДК 621

Будими́рова, Т. С.

Исследование взаимосвязи технологии изготовления полимерных подшипников скольжения с эксплуатационными режимами нагружения / Т. С. Будими́рова, В. Я. Савицкий, А. Ю. Муйземнек, Р. С. Зиновьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 124–135. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-11