

УДК 678.8

Е.А. Серкова<sup>1</sup>, В.В. Хмельницкий<sup>1</sup>, О.Б. Застрогина<sup>1</sup>

## ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-56-63

*Приведен обзор полимерных материалов различного строения, используемых в качестве антифрикционных материалов. Рассмотрен опыт использования различных полимерных материалов для изготовления антифрикционных покрытий. Выявлены преимущества термореактивных и термопластичных полимеров в сравнении с металлическими материалами. Описаны некоторые составы угле- и органопластиков, разработанные для подшипников скольжения. Сделан вывод о направлении исследований при разработке новых связующих для антифрикционных материалов.*

**Ключевые слова:** трибология, полимерные материалы, антифрикционные покрытия и материалы, бензоксазины, органопластики, термопласты, износ.

Е.А. Serkova<sup>1</sup>, V.V. Khmel'nitskiy<sup>1</sup>, O.B. Zastrogina<sup>1</sup>

## POLYMER MATERIALS FOR ANTIFRICTION COATINGS (review)

*An overview of polymeric materials of various structures used as antifriction materials is given. The experience of using various polymeric materials for the manufacture of antifriction coatings is considered. The advantages of thermosetting and thermoplastic polymers in comparison with metallic materials are revealed. Some compositions of carbon and organoplastics developed for plain bearings are described. A conclusion is made about the direction of research in the development of new binders for antifriction materials.*

**Keywords:** tribology, polymer materials, antifriction coatings and materials, benzoxazines, organoplastics, thermoplastics, wearout.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

Окружающий мир находится в постоянном движении, а любое движение (будь то на уровне элементарных частиц или же на макроуровне) сопровождается преодолением тех или иных сил с выделением или поглощением энергии.

Одним из факторов сопротивления движению тел является трение. Во все времена человек пытается либо увеличить воздействие силы трения, высвобождая и используя при этом тепловую энергию, либо уменьшить – для придания ускорения или снижения затрат на механическую работу.

К моменту формирования понятия силы трения стало ясно, что излишнее воздействие силы в зоне трущихся тел приводит к изнашиванию материалов, а изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности трущихся тел получило название *износ*. Изучением процессов трения и износа, возникающих при контакте

двух перемещающихся относительно друг друга тел, занимается наука *трибология*. Одной из важнейших задач трибологии является повышение износостойкости материалов в процессе трения.

Трение и износ материалов существенно зависят от конкретных условий эксплуатации узла трения (контактной среды). Наибольшее влияние при этом имеют влажность и температура – в зависимости от этих факторов сила трения между контактирующими материалами может меняться в несколько раз.

В то же время целенаправленное введение в зону контактирования трущихся поверхностей «третьего тела» позволяет изменить трибологические характеристики материалов (коэффициент трения, интенсивность изнашивания и др.) в нужном направлении, а именно повышение фрикционных или антифрикционных свойств в зависимости от поставленной задачи.

Самым распространенным методом снижения коэффициента трения и увеличения износостойкости является применение смазочных материалов, в качестве которых могут выступать специальные жидкости, твердые тела и адсорбционные слои [1].

Одним из традиционных антифрикционным материалом является древесина. Еще 200 лет назад был обнаружен особый сорт древесины – бакаут (гваяковое дерево) с плотностью до  $1,4 \text{ г/см}^3$ , которая тонет в воде и при механическом воздействии на ствол выделяет гваяковую смолу (естественную смазку) и сапонины (природные поверхностно-активные вещества). Благодаря своим природным особенностям бакаут образует в воде коллоидный раствор, дающий «мыльную» пену, что широко использовали в судостроении для изготовления подшипников гребных валов. В настоящее время все виды гваякового дерева находятся под угрозой исчезновения, поэтому бакаут является остродефицитным и дорогостоящим материалом.

Традиционными металлическими антифрикционными материалами являются алюминиевые сплавы, бронза и баббит (литейный сплав на основе олова, с добавлением меди и сурьмы и других легирующих компонентов). Важный недостаток таких материалов – необходимость применения масляной смазки, что значительно усложняет процесс эксплуатации и обслуживания деталей, а в случае попадания влаги на границу раздела пары трения «металл–металл» трибологические характеристики материалов значительно ухудшаются [2].

Другим типом твердых антифрикционных покрытий являются монолитные керамики и керамоматричные композиты, армированные дискретными или непрерывными волокнами. Триботехнические изделия из данных материалов выдерживают повышенные температуры до  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ , работают в агрессивных средах и стойки к абразивному износу. Единственный недостаток керамоматричных композитов – достаточно сложный и длительный процесс их переработки [3, 4].

При моделировании конструкций узлов трения необходимо учитывать то, что материалы, из которых они будут изготавливаться, должны обеспечивать прочность и надежность изделий, длительный ресурс работы при воздействии силовых нагрузок и температур, снижение удельной массы изделий и увеличение полезной нагрузки [5].

Не менее важен вопрос улучшения экологических показателей производства путем переработки отработанных смазочных материалов, а также их улавливания при попадании в окружающую среду и очистке мест разлива.

Ввиду вышеперечисленного перспективным направлением материаловедения является разработка самосмазывающихся полимерных материалов (ПМ) антифрикционного назначения [6, 7].

### Полимерные материалы антифрикционного назначения

При выборе ПМ для узлов трения необходимо учитывать достоинства и недостатки полимеров, которые могут повлиять на трибологические характеристики материалов. Основными недостатками полимеров в сравнении с металлами считаются низкая теплопроводность, высокие значения температурного коэффициента линейного расширения, а также низкая твердость и электризация при трении. К тому же ПМ чувствительны к воздействию локальных температур, возникающих при трении, при которых начинаются химические превращения в полимере, приводящие к термодеструкции и изменению его свойств.

Химическая природа полимеров существенно влияет на процессы деформации и трибодеструкции поверхностей трения под воздействием механических напряжений. Вследствие этого происходит активация поверхностных слоев контактирующих тел с образованием вторичных структур, что в свою очередь может иметь как положительный, так и отрицательный эффект. Для каждого класса полимеров физико-химические процессы, протекающие во время деформации и массопереноса, являются индивидуальными показателями и до сих пор ведутся исследования данных явлений. Поэтому правильный выбор полимерной матрицы, армирующего наполнителя и модифицирующих добавок для конкретных условий эксплуатации позволяет минимизировать недостатки ПМ в триботехнике [8, 9].

Простейшим примером полимерных антифрикционных материалов для подшипников, работающих на смазке водой, являются составы на основе термореактивных фенольных смол резольного типа. Выбор данных смол обоснован их распространенностью и невысокой ценой, при этом они обладают повышенной термостойкостью, химической стойкостью и износостойкостью. В качестве наполнителей и модификаторов использовали древесные опилки, кокс, графит, алюминиевую пудру, олеиновую кислоту и др. [10–14]. Данные покрытия наносили тонким слоем на трущиеся металлические поверхности или из них изготавливали цельнолитые детали методом прессования под давлением.

В дальнейшем перспективным направлением разработок ПМ для антифрикционных покрытий стало создание полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе термопластов, номенклатура которых превышает сотни наименований, таких фирм-производителей, как Dupont, Sabic Innovative Plastics, Ticona, Mitsubishi Engineering, Solvay и др. [15, 16].

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, Ф-4, тефлон) – один из самых востребованных полимеров в трибологии, особенно в узлах сухого трения в контакте с агрессивными средами. В свою очередь, используются также фторопласты на основе сополимеров тетрафторэтилена, эксплуатационные и технологические характеристики которых определяются содержанием фтора в полимере [17]. Так, ПТФЭ обладает рекордно низким коэффициентом трения, химически стоек к кислотам, растворителям и нефтепродуктам, диапазон рабочих температур – от  $-269$  до  $+260$  °С, гидрофобен. Однако обладает рядом существенных недостатков: высокой скоростью износа, повышенной ползучестью под нагрузкой (хладотекучесть), высокими антиадгезионными свойствами к металлам и другим материалам [18].

Для устранения данных недостатков используют антифрикционные добавки: дисульфид молибдена, графит, кокс, рубленое стекло- и углеволокно, порошок бронзы и др. Каждый наполнитель имеет направленное действие, и в зависимости от параметров эксплуатации изделия подбирается процентное содержание наполнителя или их смесь [19–24].

Другими представителями термопластов антифрикционного назначения являются полиамиды, поликарбонат, полиоксиметилен, полифениленоксид и др.

Полиамиды превосходят фторопласты по прочности и величине модуля упругости, но набухают в воде и имеют сниженную химическую стойкость к маслам.

Антифрикционные материалы на основе полиамидимидов выдерживают скорости вращения в несколько тысяч оборотов в минуту, имеют низкие значения коэффициента трения и температурного коэффициента линейного расширения, при этом технологии их переработки сравнимы с переработкой поливинилхлорида (литье под давлением, экструзия) [25–28].

Среди термопластичных конструкционных соединений лидирующие позиции занимает полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), который обладает высокой износостойкостью, прочностью, повышенной рабочей температурой, низким коэффициентом трения ( $\mu \geq 0,4$  – при сухом скольжении) и низкой теплопроводностью [29–32]. Единственным недостатком ПЭЭК является его высокая стоимость.

Следует отметить, что термопластичные материалы уступают по упругопрочностным характеристикам металлическим антифрикционным сплавам и долгое время использовались как «твердые смазки» [33, 34]. Для устранения данного недостатка полимерных материалов стали использовать тканые наполнители (углеродные и органические), пропитанные термореактивными связующими.

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны антифрикционные органопластики: Оргалон АФ-1М на основе фенолокаучукового связующего [35, 36] и ВАП-8 на основе эпоксидного связующего [37] для высоконагруженных подшипников скольжения (табл. 1). В качестве армирующих наполнителей использовали комбинированные ткани из полимерных волокон: ПТФЭ нитей марки «Полифен» с полиимидными нитями марки «Аримид» (Оргалон АФ-1М и ВАП-8) и ПТФЭ нитей с арамидными нитями марки «Русар» (Оргалон АФ-1МР).

Таблица 1

**Сравнительные свойства антифрикционных органопластиков**

Свойства	Значения свойств для органопластиков марок				
	АФ-1М-260	АФ-1М-500	ВАП-8	АФ-1МР-260	АФ-1МР-500
Толщина антифрикционного покрытия, мм	0,25–0,32	0,45–0,52	0,25–0,30	0,25–0,32	0,46–0,52
Прочность при отслаивании от конструкционной стали при 20 °С, Н/м	$\geq 1200$	$\geq 1200$	440–590	$\geq 2250$	$\geq 2120$
Коэффициент трения, отн. ед.	0,03–0,19		0,10–0,15	0,10	
Диапазон рабочих температур, °С	-60 ÷ +200	-60 ÷ +200	-60 ÷ +60	-60 ÷ +200	-60 ÷ +200
Удельная нагрузка, МПа	15–150		1–2	30	
Скорость скольжения, м/с	0,01–0,05		0,12	0,2	

Преимуществом данных изобретений являются работоспособность при высоких удельных нагрузках с низким коэффициентом трения, повышенная прочность при отслаивании от металла и возможность изготавливать сложные узлы трения [38, 39]. Данный эффект достигнут за счет плетения тканей, в которых на лицевой стороне преимущественно располагаются ПТФЭ волокна, обеспечивающие антифрикционные свойства материала, а на оборотной стороне – органические волокна, в большей степени отвечающие за прочностные характеристики материала под действием нагрузки и адгезионное взаимодействие полимерного связующего с металлическим контртелом [40].

Во ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» разработаны полимерные углепластики антифрикционного назначения на основе термореактивных связующих: эпоксидном (УГЭТ)

и фенольном (ФУТ) [41–43] – для подшипников скольжения, работающих при высоких контактных давлениях до 100 МПа (УГЭТ) или повышенных скоростях до 40 м/с (ФУТ) в широком диапазоне температур, смачиваемые водой (табл. 2).

Таблица 2

Свойства антифрикционных материалов

Свойства	Значения свойств для материалов марок		
	УГЭТ	УГЭТ-МФ	ФУТ
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1450	1450	1450
Прочность при сжатии, МПа	200	200	150
Коэффициент трения, отн. ед.	0,12	0,06	0,01
Скорость скольжения, м/с	0,004–0,5		≤40
Допустимое контактное давление, МПа	100	100	5,0
Диапазон рабочих температур, °С	–200 ÷ +80		–200 ÷ +125

По мнению авторов работы [2] термореактивная полимерная матрица и углеродный наполнитель обладают трибохимической активностью и создают на поверхности фрикционного контакта полимерную пленку, что способствует снижению силы трения. На примере эпоксидных олигомеров показано влияние структуры полимера на трибохимическую активность матрицы. Использование хлорированных смол и аминных отвердителей повышает износостойкость полимера, ввиду образования на металлическом контртеле пленок хлоридов металлов, обладающих пластинчатой структурой.

Однако при этом следует учитывать, что интенсивная трибодеструкция полимера может приводить к повышению износа металлического контртела вследствие миграции продуктов износа металла в зону контакта тел. В связи с этим целесообразно использовать в качестве полимерной матрицы соединения с максимальной молекулярной массой либо смеси полимеров с гетерогенной структурой, а также вводить в матрицу ингибиторы радикальных процессов, антиоксиданты и активные структурные модификаторы.

Перспективным классом полимеров являются бензоксазины. Это новое поколение фенольных смол, которые синтезируют из фенолов и аминов различного строения с добавлением параформальдегида [44]. Полученная смола не требует удаления растворителя или дополнительной очистки перед применением. Полимеризация происходит путем раскрытия оксазиновых циклов под действием температуры, причем, в отличие от традиционных фенольных смол, не требуется использования катализаторов основной или кислотной природы. Кроме того, бензоксазины обладают высокой термической стабильностью [45], низким водопоглощением, размеростабильностью при отверждении и повышенными механическими характеристиками, сравнимыми с характеристиками эпоксидных смол [46, 47]. Для широкого практического использования бензоксазинов в большинстве предложений их адаптируют, улучшая необходимые параметры путем выбора исходных фенолов и аминов. Возможность взаимодействовать с другими полимерами также позволяет получать новые связующие с уникальными свойствами [48, 49], исключая некоторые недостатки бензоксазинов. Несмотря на такой набор выдающихся свойств, полибензоксазины имеют некоторые ограничения, связанные с хрупкостью полимерной матрицы из-за высокой плотности сшивок макромолекул [50]. При этом стандартные бензоксазины (на основе простых фенолов) бывают недостаточно термостойкими, а технология получения ПКМ является достаточно сложной.

В статье [51] авторы улучшали трибологические, механические и термические свойства полибензоксазинов модификацией аминотерминированным бутадиен-

нитрильным каучуком. Полученные материалы разрабатывали для использования в качестве самосмазывающихся композиционных материалов. Обнаружено, что добавление от 5 до 20 % (по массе) такого каучука в состав бензоксазина позволило снизить коэффициент трения и повысить износостойкость композитов. Авторы сравнивают полученные свойства с литературными научно-техническими данными по эпоксидным и фенольным смолам, а также со свойствами чистого немодифицированного бензоксазина. Добавление небольшого количества каучука (5 % (по массе)) способствовало наибольшему снижению скорости изнашивания и коэффициента трения. Показано, что бензоксазины, модифицированные каучуком, демонстрируют лучшие свойства по сравнению с традиционными фенольными и эпоксидными связующими, а также обладают высоким потенциалом для использования в подшипниковых и самосмазывающихся материалах.

В статье [52] авторы модифицировали бензоксазины добавлением в состав бисмалеимида и поверхностно-функционализированных многослойных углеродных нанотрубок. Авторы сообщают об увеличении механических характеристик и уменьшении коэффициента трения. Добавление бисмалеимида к бензоксазину позволяет добиваться улучшения технологических свойств и механических характеристик отвержденной полимерной матрицы. При совместном отверждении бисмалеимида с бензоксазином аминогруппа из бензоксазина способна катализировать отверждение бисмалеимида [53]. Авторы сообщают, что добавление в состав до 0,4 % (по массе) углеродных нанотрубок снижает скорость износа на 87 % по сравнению и исходной бензоксазин-бисмалеимидной композицией.

### Заключения

В данной статье рассмотрены современные направления в области развития антифрикционных материалов на основе полимеров различного строения. Переход к новым полимерам открывает новые пути для глубокой модификации и дает возможность привносить в систему новые свойства. Дальнейшие перспективы в создании материалов антифрикционного назначения тесно связаны с синтезом полимеров со структурами, выдерживающими многократные деформации без разрушения, либо с использованием модификаторов, влияющих на механизмы во время массопереноса при трении.

### Библиографический список

1. Лужнов Ю.М., Александров В.Д. Основы триботехники. М.: МАДИ, 2013. 137 с.
2. Бахарева В.Е., Николаев Г.И., Анисимов А.В. Улучшение функциональных свойств антифрикционных полимерных композитов для узлов трения скольжения // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. 2009. Т. LIII. № 4. С. 4–18.
3. Кулик В.И., Нилов А.С. Перспективы применения керамических материалов в узлах трения оборудования горнодобывающей промышленности // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 9. С. 52–57. DOI: 10.26160/2658-3305-2020-9-52-57.
4. Антифрикционные материалы // НИИГрафит: офиц. сайт. URL: <https://www.niigrafit.ru> (дата обращения: 29.04.2021).
5. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
6. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.

7. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
8. Кузнецов А.А., Семенова Г.К., Свидченко Е.А. Конструкционные термoplastы как основа для самосмазывающихся полимерных композиционных материалов антифрикционного назначения // *Вопросы материаловедения*. 2009. № 1 (57). С. 116–126.
9. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
10. Энциклопедия полимеров: в 3 т. / под ред. В.А. Каргина. М.: Советская энциклопедия, 1972. Т. 1. С. 202.
11. Способ изготовления антифрикционного материала на основе композиционных древесных пластиков: пат. 905115 СССР. № 2641247/29-15; заявл. 11.07.78; опубл. 15.02.82.
12. Полимерная композиция для изготовления антифрикционного материала: пат. 1790201 Рос. Федерация; заявл. 17.07.89; опубл. 10.05.95.
13. Антифрикционная композиция: пат. 1807993 СССР; заявл. 06.03.91; опубл. 07.04.93.
14. Втулка рычажной тормозной системы рельсового транспорта: пат. 2298707 Рос. Федерация; заявл. 04.10.05; опубл. 10.05.07.
15. Application-tested MOLYKOTE® Specialty Lubricants solve your toughest challenges // DuPont: офиц сайт. URL: <https://www.dupont.com/molykote.html> (дата обращения: 30.03.2021).
16. Specialty Compounding Solutions from SABIC // SABIC's: офиц сайт. URL: <https://www.sabic.com/en/products/specialties/compounding-solutions> (дата обращения: 30.03.2021).
17. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
18. Бузник В.М., Юрков Г.Ю. Применение фторполимерных материалов в трибологии: состояние и перспективы // *Вопросы материаловедения*. 2012. № 4 (72). С. 133–138.
19. Истомин Н.П., Семенов А.П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. М.: Наука, 1981. 148 с.
20. Антифрикционное изделие: пат. 2068423 Рос. Федерация; заявл. 12.03.92; опубл. 27.10.96.
21. Антифрикционный композит: пат. 2155198 Рос. Федерация; заявл. 13.01.98; опубл. 27.08.00.
22. Композиционный триботехнический материал: пат. 2293092 Рос. Федерация; заявл. 28.12.05; опубл. 10.02.17.
23. Антифрикционный композитный материал для подшипников скольжения судовых валопроводов и гребных валов: пат. 2554182 Рос. Федерация; заявл. 19.12.13; опубл. 27.06.15.
24. A kind of environment protection type multifunctional carbon fiber wear-reduced coating and preparation method thereof: пат. CN 108219667A; filed 26.02.18; publ. 29.06.18.
25. Torlon® PAI // Solvay: офиц. сайт. URL: <https://www.solvay.com/en/brands/torlon-pai> (дата обращения: 30.03.2021).
26. Sliding bearing for internal combustion engine: пат. EP 0984182B1; filed 22.02.99; publ. 08.03.00.
27. Plain bearing: пат. EP 1775487A2; filed 09.10.06; publ. 18.04.07.
28. Anti-friction coating to piston assembly: пат. US 20140272188A2; filed 14.03.14; publ. 18.09.14.
29. David L.B., Gregory W.S. A low friction and ultra low wear rate PEEK/PTFE composite // *Wear*. 2006. Vol. 261. P. 410–418.
30. Антифрикционный композитный материал для изготовления элементов уплотнения судовой арматуры: пат. 2463321 Рос. Федерация; заявл. 01.04.11; опубл. 10.10.12.
31. Смазочная композиция: пат. 2596820 Рос. Федерация; заявл. 22.04.15; опубл. 10.09.16.
32. Высокопрочный антифрикционный композит на основе полиэфирэфиркетона для медицины и способ его изготовления: пат. 2729653 Рос. Федерация; заявл. 03.03.20; опубл. 11.08.20.
33. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2 т. / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алишина. М.: Машиностроение, 1979. Т. 1. 300 с.

34. Белый В.А., Свариденко А.А., Петровец М.И., Савкин В.Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. Минск: Наука и техника, 1986. 430 с.
35. Соломенцева А.В., Фадеева В.М., Железина Г.Ф. Антифрикционные органопластики для тяжело нагруженных узлов трения скольжения авиационных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 2 (41). С. 30–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-30-34.
36. Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Левакова Н.М. Антифрикционные органопластики для высоконагруженных узлов трения // Труды ВИАМ. 2019. № 2 (74). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-89-96.
37. Кулагина Г.С., Коробова А.В., Ильичев А.В., Железина Г.Ф. Физические и физико-механические свойства антифрикционных органопластиков на основе комбинированного тканого наполнителя и эпоксидного связующего // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-8-8.
38. Связующее для получения антифрикционных изделий, препрег и изделие, выполненное из него: пат. 2313010 Рос. Федерация; заявл. 06.06.06; опубл. 20.12.07.
39. Препрег антифрикционного органопластика и изделие, выполненное из него: пат. 2404202 Рос. Федерация; заявл. 31.03.09; опубл. 20.11.10.
40. Антифрикционный материал: пат. 1590495 СССР; заявл. 01.07.88; опубл. 07.09.90.
41. Антифрикционная композиция: пат. 2295546 Рос. Федерация; заявл. 01.08.05; опубл. 20.03.07.
42. Антифрикционная наполненная композиция и способ ее получения: пат. 2394850 Рос. Федерация; заявл. 10.12.08; опубл. 20.07.10.
43. Антифрикционная композиция: пат. 2526989 Рос. Федерация; заявл. 30.10.12; опубл. 27.08.14.
44. Хмельницкий В.В., Шимкин А.А. Высокомолекулярные бензоксазины – новый тип высокотемпературных полимерных связующих (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 2 (74). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-43-57.
45. Christian S., Katharina L., Andreas T. Benzoxazine miniemulsions stabilized with polymerizable nonionic benzoxazine surfactants // *Macromolecules*. 2010. Vol. 43. P. 8933–8941.
46. Ghosh N., Kiskan B., Yagci Y. Polybenzoxazines – new high performance thermosetting resins: synthesis and properties // *Progress in Polymer Science*. 2007. Vol. 32. P. 1344–1391.
47. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
48. Ishida H., Agag T. *Handbook of Benzoxazine Resins*. Amsterdam: Elsevier, 2011. 688 p. DOI: 10.1016/B978-0-444-53790-4.00063-1.
49. Хмельницкий В.В., Сарычев И.А., Хасков М.А., Гусева М.А. Исследование влияния эпоксидных смол различного строения на свойства бензоксазинового мономера ВА-а и их сополимеров // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-38-46.
50. Jin L., Agag T., Ishida H. Bis(benzoxazine-maleimide)s as a novel class of high performance resin: Synthesis and properties // *European Polymer Journal*. 2010. Vol. 46. P. 354–363.
51. Jubsilp C., Taewattana R., Takeichi T., Rimdusit S. Investigation on Rubber-Modified Polybenzoxazine Composites for Lubricating Material Applications // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2015. Vol. 24. P. 3958–3968. DOI: 10.1007/s11665-015-1660-5.
52. Jia Y., Yan H., Ma L., Zhang J. Improved mechanical and tribological properties of benzoxazine-bismaleimides resin by surface-functionalized carbon nanotubes // *Journal Polymer Research*. 2014. Vol. 21. P. 499. DOI: 10.1007/s10965-014-0499-z.
53. Wang Z., Zhao J., Ran Q. et al. Research on curing mechanism and thermal property of bis-allyl benzoxazine and N,N'-(2,2,4-trimethylhexane-1,6-diyl) dimaleimide blend // *Reactive and Functional Polymers*. 2013. Vol. 73. P. 668–673.