

## ДИСПЕРСНЫЙ ПОЛИОКСАДИАЗОЛЬНЫЙ МОДИФИКАТОР ДЛЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ ТЕКСТОЛИТОВ

М.О. Панова, Д.И. Буяев, В.В. Шапошникова

Мария Олеговна Панова\* (ORCID 0000-0002-1952-5582), Дмитрий Игоревич Буяев (ORCID 0000-0003-4496-5843), Вера Владимировна Шапошникова (ORCID 0000-0001-9064-7366)

Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, ул. Вавилова, 28, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 119334

E-mail: maxi4@list.ru\*, bicomp@bk.ru, vsh@ineos.ac.ru

*Антифрикционные полимерные композиционные материалы на основе фенолформальдегидных резольных связующих, армированные текстильно-комбинированными волокнами полиоксадиазола и целлюлозы, обладают высокими трибологическими и физико-механическими свойствами. Это открывает перспективы для решения широкого спектра задач при конструировании узлов трения машин и механизмов с увеличенным сроком службы. Однако, технологические сложности, возникающие при переработке этих материалов в готовые изделия, ограничивают их применение. Использование дисперсного модификатора упрощает технологию получения полимерных композиционных материалов. Путем измельчения волокон полиоксадиазола в шаровой вибрационной мельнице получен новый тип антифрикционного дисперсного модификатора фенолформальдегидных связующих. В соответствии с данными дифрактометрического анализа, при измельчении полиоксадиазольного волокна происходит незначительное снижение его кристалличности, что практически не оказывает влияния на физико-механические свойства материала. Полученный дисперсный модификатор представляет собой смесь коротких фрагментов деформированных филаментов полиоксадиазола и чешуйчатых полиоксадиазольных частиц неправильной формы, размеры которых достигают 200-250 мкм. Данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии свидетельствуют об увеличении содержания азота в полученном порошкообразном продукте по сравнению с исходным полиоксадиазольным волокном. Введение порошкообразного полиоксадиазольного модификатора в фенолформальдегидное связующее для хлопчатобумажных текстолитов обеспечило получение самосмазывающихся износостойких антифрикционных полимерных композиционных материалов, обладающих хорошими трибологическими свойствами: наблюдается снижение коэффициента трения, износа и температуры в зоне фрикционного контакта (в условиях сухого трения по стальному контртелу). Наилучшими трибологическими показателями обладают образцы исследуемых материалов при небольшом содержании полиоксадиазольного модификатора (5% мас.) в фенолформальдегидном связующем. Свойства полученных материалов сопоставимы со свойствами полимерных композиционных материалов, армированных тканевой комбинацией волокон полиоксадиазола и целлюлозы.*

**Ключевые слова:** фенолформальдегидная смола, полиоксадиазольное волокно, модификатор, коэффициент трения, износ, полимерные композиционные материалы, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, сканирующая электронная микроскопия

### Для цитирования:

Панова М.О., Буяев Д.И., Шапошникова В.В. Дисперсный полиоксадиазольный модификатор для антифрикционных фенолформальдегидных текстолитов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 11. С. 79–85. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711.7051.

### For citation:

Panova M.O., Buyayev D.I., Shaposhnikova V.V. Dispersed polyoxadiazole modifier for antifriction phenolformaldehyde textolites. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 11. P. 79–85. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711.7051.

## DISPERSED POLYOXADIAZOLE MODIFIER FOR ANTIFRICTION PHENOLFORMALDEHYDE TEXTOLITES

M.O. Panova, D.I. Buyaev, V.V. Shaposhnikova

Mariya O. Panova\* (ORCID 0000-0002-1952-5582), Dmitriy I. Buyaev (ORCID 0000-0003-4496-5843), Vera V. Shaposhnikova (ORCID 0000-0001-9064-7366)

A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the RAS, Vavilova st., 28, bld. 1, Moscow, 119334, Russia

E-mail: maxi4@list.ru\*, bicomp@bk.ru, vsh@ineos.ac.ru

*Antifricition polymer composite materials based on phenol-formaldehyde resole binders, reinforced with textile-combined polyoxadiazole and cellulose fibers, have high tribological and physical-mechanical properties. This opens up prospects for solving a wide range of problems in the design of friction units of machines and mechanisms with an extended service life. However, when processing these materials into finished products, technological difficulties arise that limit their use. The use of a dispersed modifier simplifies the technology for producing polymer composite materials. By grinding polyoxadiazole fibers in a ball vibration mill, a new type of anti-friction dispersed modifier of phenol-formaldehyde binders was obtained. In accordance with the data of diffractometric analysis, when grinding polyoxadiazole fiber, there is a slight decrease in its crystallinity, which has virtually no effect on the physical and mechanical properties of the material. The resulting dispersed modifier is a mixture of short fragments of deformed polyoxadiazole filaments and flaky polyoxadiazole particles of irregular shape, the size of which reaches 200-250  $\mu\text{m}$ . X-ray photoelectron spectroscopy data indicate an increase in the nitrogen content in the resulting powdered product compared to the original polyoxadiazole fiber. The introduction of a powdered polyoxadiazole modifier into a phenol-formaldehyde binder for cotton textolites ensured the production of self-lubricating wear-resistant antifricition polymer composite materials with good tribological properties. A decrease in the coefficient of friction, wear and temperature in the friction contact zone is observed (under conditions of dry friction on a steel counterbody). The samples of the studied materials with a small content of polyoxadiazole modifier (5% wt.) in the phenol-formaldehyde binder have the best tribological characteristics. The properties of the resulting materials are due to polymer composite materials reinforced with a fabric combination of fibers, polyoxadiazole and cellulose.*

**Keywords:** phenol-formaldehyde resin, polyoxadiazole fiber, modifier, friction coefficient, wear, polymer composite materials, X-ray photoelectron spectroscopy, scanning electron microscopy

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых направлений современного материаловедения при решении проблем износа деталей и механизмов в машиностроении является создание полимерных композиционных материалов (ПКМ) путем сочетания разнородных компонентов. Его важность заключается не только в создании новых материалов, способных значительно увеличить ресурс работы узлов трения, но и в упрощении технологии изготовления ПКМ.

Фенолформальдегидные (ФФ) смолы, обладающие высокой тепло-, хемо- и абразивной стойкостью, нашли широкое применение в производстве антифрикционных ПКМ. Это обусловлено доступностью, низкой стоимостью и легкостью переработки этих полимеров [1-6].

Применение ПКМ антифрикционного назначения, например, текстолитов на основе природных целлюлозосодержащих волокон, получило развитие еще в 1930-х годах. В настоящее время эти материалы производятся в промышленных масштабах в соответствии с ГОСТ 5-78 и применяются для изготовления шестерен червячных колес, втулок, подшипников скольжения, вкладышей подшипников прокатных станков, роликов, колец и других изделий конструкционного назначения. При пропитке армирующих волокон ФФ связующим, которое содержит твердые частицы дисперсных модификаторов, формируется дискретный контакт на поверхности, что позволяет улучшить трибологические характеристики ПКМ. При разработке антифрикционных ФФ композитов была отмечена положительная роль введения твердых смазок, таких

как графит, дисульфид молибдена и пр., что позволило получить антифрикционные материалы с низким коэффициентом трения и износом для подшипников скольжения, уплотнений, направляющих, эксплуатируемых в условиях сухого трения [7-9].

В последние годы исследования процессов трения ФФ композитов, армированных высокопрочными термостойкими синтетическими волокнами, в основном были посвящены разработке фрикционных материалов (в том числе тормозных колодок), поскольку в таких системах, наряду с повышением износостойкости, наблюдается рост коэффициента трения [10-16].

Перспективным трибостабильным полимером с высокой степенью кристалличности, который выпускается в виде волокон в промышленном масштабе, является полиоксадиазол (поли-*p*-фенилен-1,3,4-оксадиазол) (ПОД). Волокна ПОД обладают высокой термо- и износостойкостью и уникальным комплексом физико-механических свойств. В отличие от полиарамидных ПОД-волокон характеризуются хорошими антифрикционными свойствами [17-22]. При использовании комбинированных нитей и тканей на основе хлопчатобумажных и ПОД волокон созданы антифрикционные ФФ композиты с улучшенными технологическими и физико-механическими свойствами (Патент RU2278878C1). Однако, такой способ получения материалов является сложным, поскольку он подразумевает дополнительную операцию соединения нитей хлопчатобумажного (х/б) и ПОД волокна для последующего получения ткани или специальное ткачество полотна из нитей х/б и ПОД волокна в заданных соотношениях. В последнем случае использование готовых промышленно производимых х/б тканей технического назначения невозможно. Кроме того, при указанном способе получения данного материала невозможно достигнуть равномерного распределения малого количества ПОД волокна (менее 30%) в композите, что негативно сказывается на прочностных свойствах материала.

Научная новизна настоящего исследования заключается в применении полиоксадиазольного (ПОД) волокна не в качестве армирующего компонента, а как дисперсного антифрикционного модификатора фенолформальдегидных связующих хлопчатобумажных текстолитов. Для достижения цели создания ПКМ с улучшенными трибологическими свойствами необходимо решить следующие задачи: 1) получение и исследование структуры, морфологии, химического состава поверхности дисперсного ПОД модификатора; 2) создание анти-

фрикционного ПКМ на основе фенолформальдегидных связующих, армированных целлюлозными волокнистыми наполнителями по упрощенной технологии получения и при снижении количества вводимых модифицирующих добавок.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве армирующего наполнителя исследуемых ПКМ использовали промышленно выпускаемую хлопчатобумажную ткань полотняного переплетения марки МОСТ (арт. С-М/002-94 ООО «Мальцевотекс»). В качестве связующего – фенолформальдегидную смолу марки ФЭЛ-03 (ТУ 2221-026-48090685-2014, ЗАО «Химсинтез»).

Измельчение ПОД волокна марки «Арселон» (Светлогорское ПО «Химволокно») проводили в шаровой вибрационной мельнице с использованием металлических мелющих тел Ø 5 мм, размер полученных частиц от 20 до 250 мкм.

Модифицирующий дисперсный модификатор вводили в спиртовой раствор ФФ связующего перед пропиткой армирующего волокнистого наполнителя в количестве 1 мас.%, 5 мас.% и 10 мас.% (по сухой смоле). Образцы для испытаний получали прямым прессованием из препрегов,  $P_{уд} = 25$  МПа,  $T_{пр} = 160$  °С, время выдержки составило 2 мин на 1 мм толщины образца.

Степень кристалличности волокон оценивали по данным рентгенодифракционного анализа, полученным с использованием дифрактометра D8 Advance (Bruker AXS) в геометрии Брэгга-Брентано (CuK $\alpha$  излучение, шаг по углу  $0,02^\circ 2\theta$ , скорость съемки 0,5-2 град/мин). Обработку данных проводили с использованием программы Topas 4.2 (Bruker AXS).

Фотоэлектронные спектры снимали на спектрометре ES-2403 с использованием излучения Mg K $\alpha$  ( $h\nu = 1253,6$  eV). Спектрометр оснащен анализатором PHOIBOS 100-MCD5 (SPECS GmbH, Германия) и источником рентгеновского излучения XR-50 (SPECS GmbH, Германия). Спектры получены с использованием стандартного программного обеспечения SpecsLab2. Для анализа спектров был применен программный пакет CasaXPS.

Морфологию поверхности волокон и полученных продуктов измельчения изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). В работе использовался сканирующий электронный микроскоп JSM-6000PLUS (JEOL, Токио, Япония) с предварительным напылением на поверхность электропроводящего покрытия.

Трибологические испытания проводили на машине торцевого трения И-47 по схеме «диск-плоскость» при  $P = 0,1$  МПа и скорости 0,5 м/с, время испытания – 60 мин. Коэффициент сухого трения по стальной поверхности (30x13 в соответствии с ГОСТ 5632-2014, полировка поверхности до  $Ra 0,2$ ) фиксировался непрерывно, массовый износ – после испытания. Замер температуры в зоне фрикционного контакта производился непрерывно на расстоянии 1 мм от поверхности контртела с помощью термопары.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным рентгенодифракционного анализа кристалличность исходного ПОД волокна составляет 74%, после измельчения волокна – 69%. Размеры упорядоченных областей кристалли

ческой фазы по рефлексу на  $26,5^\circ$  составили 3 нм для волокна и 2 нм для полученного порошка.

Морфология ПОД волокна и продуктов его измельчения была исследована методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис. 1). На начальном этапе измельчения ПОД волокна образуется промежуточный продукт – «вата». При этом, как видно на рис. 1 (а) и (б), сохраняется волокнистая структура и происходит деформация и расплющивание (с увеличением площади поверхности) филаментов ПОД волокна, исходный диаметр которых составляет 10-20 мкм. При более длительном механическом воздействии происходит деструкция филаментов с образованием дисперсного продукта (рис. 1 (в)), который состоит из коротких фрагментов деформированных филаментов волокна ПОД и чешуйчатых частиц неправильной формы (их размеры достигают 200-250 мкм).

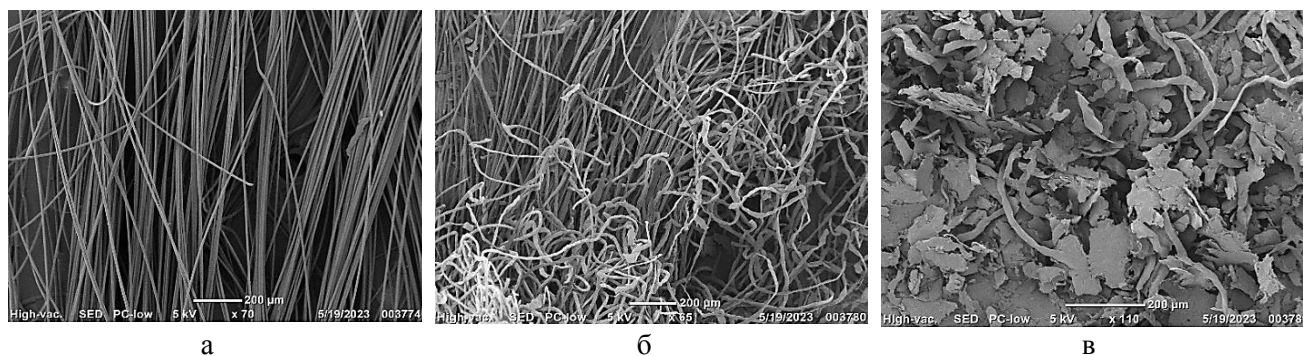


Рис. 1. Микрофотографии ПОД волокна (а), и продуктов его измельчения: «ваты» (б) и порошка (в)  
Fig. 1. Microphotographs of POD fiber (a), and the products of its grinding: “wadding” (b) and powder (v)

Данные анализа поверхности исходного ПОД волокна и продуктов его измельчения («ваты» и порошок) методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) свидетельствуют об изменении соотношения углерода, азота и кислорода (табл. 1). Отмечено значительное увеличение содержания азота в порошке измельченного ПОД волокна.

Таблица 1

Данные количественного РФЭС анализа  
Table 1. Data of quantitative XPS analysis

	Волокно, ат.%	«Вата», ат.%	Порошок, ат.%
C 1s	86	81	78
N 1s	2	7	11
O 1s	12	12	11

Данные исследования трибологических характеристик х/б текстолитов на основе ФФ связующего, модифицированных ПОД порошком, показывают, что введение в ФФ связующее 1 мас. %

ПОД модификатора позволяет снизить коэффициент трения до 0,34, в то время как в случае немодифицированного образца этот показатель достигает 0,36 (рис. 2 и табл. 2). При этом модифицированный текстолит характеризуется более чем в 2 раза меньшим износом (необходимо отметить, что температура в зоне фрикционного контакта снижается). При увеличении в ФФ связующем содержания ПОД модификатора до 5 мас.% наблюдается значительное снижение коэффициента трения (до 0,29), износа (до 0,8 мг) и фрикционной температуры (до 30,8 °С). Содержание 10 мас.% ПОД модификатора в связующем текстолита является избыточным, так как при данном количестве модификатора, вероятно, происходит более интенсивное отделение частиц дисперсного модификатора вместе со смолой в процессе трения, что приводит к повышению износа, коэффициента трения и фрикционной температуры.

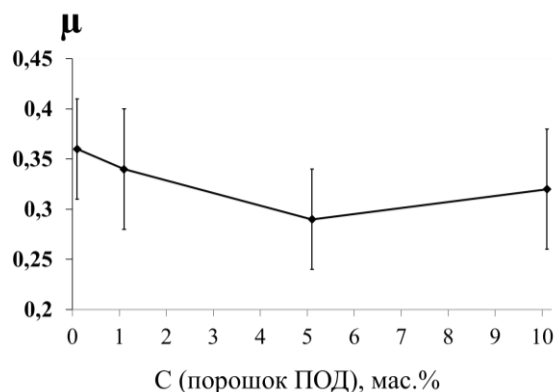


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения и амплитуды его колебания для ПКМ, армированных хлопчатобумажной тканью, от количества вводимого порошка ПОД (С, мас.%) в ФФ связующее

Fig. 2. Dependence of the friction coefficient and the amplitude of its vibration for PCM reinforced with cotton fabric on the amount of POD powder (C, wt.%) introduced into the PF binder

Таблица 2

**Трибологические свойства ФФ композитов, армированных хлопчатобумажной тканью, и модифицированных порошком ПОД**

**Table 2. Tribological properties of PF composites reinforced with cotton fabric and modified with POD powder**

Количество вводимого ПОД модификатора	Износ, мг	$T_{\text{фр. max}}^*$ , °C
Без модификатора	2,7	42
1%	1,2	36
5%	0,8	31
10%	1,7	37

Примечания: \* максимальная температура в зоне фрикционного контакта при испытании

Note: \* maximum temperature in the friction contact zone during testing

Основываясь на данных трибологических испытаний, можно предположить, что на поверхности исследуемых образцов ПКМ присутствуют дисперсные частицы антифрикционного кристаллического полимера – ПОД, которые при трении о стальную контрповерхность не только воспринимают нагрузку, формируя дискретный контакт, но и облегчают сдвиговые усилия при скольжении благодаря увеличенной площади их поверхности.

#### ВЫВОДЫ

В результате выполненного исследования получен новый тип антифрикционного модифика-

тора – измельченное ПОД волокно. На основании данных дифрактометрического анализа установлено, что при измельчении ПОД волокна снижение его кристалличности является незначительным. Полученный дисперсный продукт состоит из коротких фрагментов деформированных филаментов волокна ПОД и чешуйчатых частиц неправильной формы величиной 200-250 мкм. Данные РФЭС свидетельствуют об увеличении содержания азота в порошкообразном продукте.

Введение даже незначительных количеств порошкообразного ПОД модификатора в фенолформальдегидное связующее хлопчатобумажных текстолитов способствует снижению коэффициента трения, износа и температуры в зоне фрикционного контакта в условиях сухого трения ПКМ по стали. Наилучшие трибологические показатели образцов исследуемых композитов достигнуты при 5%-ном содержании ПОД модификатора в ФФ связующем.

Применение антифрикционного модификатора ПОД в дисперсной форме, полученного путем измельчения ПОД волокна, обеспечивает получение антифрикционных износостойких самосмазывающихся ФФ композитов с улучшенными трибологическими свойствами. Результаты выполненного исследования могут быть успешно использованы для получения высококачественных антифрикционных ПКМ с целью расширения ассортимента серийно выпускаемых антифрикционных текстолитов триботехнического назначения с применением доступных материалов и технологий переработки.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

*Работа выполнена в рамках Государственного задания №075-00697-22-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The research was carried out within the state assignment No. 075-00697-22-00 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алиева А.П. Композиционные материалы на основе фенолформальдегидных смол. *Промышл. пр-во и использ. эластомеров*. 2021. № 1. С. 34-43. DOI: 10.24412/20718268-2021-1-34-43.

#### REFERENCES

1. Aliyeva A.P. Composite materials based on phenol formaldehyde resins. *Prom. Proizvod. Ispol'z. Elastomerov*. 2021. N 1. P. 34-43 (in Russian). DOI: 10.24412/2071-8268-2021-1-34-43.

2. **Аракелян А.Г.** Получение и применение текстолита. *Тенденции развития науки и образования*. 2018. № 38-4. С. 32-33. DOI: 10.18411/lj-05-2018-84.
3. **Матвеева И.Г., Лебедев М.П.** Исследование прочностных свойств текстолита, армированного тканями с различным типом переплетения. *Тр. Кольского науч. центра РАН*. 2017. Т. 8. № 5-1. С. 94-97.
4. **Sharifullin S.N., Denisov V.A., Zadorozhny R.N., Kudryashova, E.Yu., Reschikov E., Izikaeva A.I.** Tribotechnical tests of layered polymers. *Tribol. Ind.* 2020. V. 42. N 1. P. 81. DOI: 10.24874/ti.2020.42.01.08.
5. **Гусев Е.В., Набойщикова Н.А., Агеева Т.А.** Технологические предпосылки получения композиционного материала на основе твердых синтетических смол и волокнистого наполнителя. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 58-63. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6553.
6. **Гусев Е.В., Набойщикова Н.А., Колобов М.Ю., Агеева Т.А.** Разработка и получение фенопластовых композитов машиностроительного назначения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 9. С. 82-89. DOI: 10.6060/ivkkt.20246709.7021.
7. **Юдин А.С., Буяев Д.И., Краснов А.П., Сачек Б.Я., Афоничева О.В., Баженова В.Б.** Дисперсные наполнители в трибологических полимерных волокноармированных материалах (поисковое исследование). *Вопр. материаловедения*. 2012. Т. 72. № 4. С. 231-239.
8. **Ксантоса М.** Функциональные наполнители для пластмасс. С-Пб.: Научные основы и технологии. 2010. 462 с.
9. **Li D., Hu, X., Huang Z., Chen Y., Han H., Xiao Ch.** Effect of several modifiers on the mechanical and tribological properties of phenol formaldehyde resin. *High Perform. Polym.* 2018. V. 30. N 5. P. 580-590. DOI: 10.1177/0954008317710317.
10. **Kumar N., Bharti A., Goyal H.S., Patel K.K.** The evolution of brake friction materials: a review. *Mater. Phys. Mech.* 2021. V. 47. N 5. P. 796-815. DOI: 10.18149/MPM.4752021\_13.
11. **Ünlü B.S., Atic E., Yilmaz S.S.** Tribological behaviors of polymer based journal bearings manufactured from particle reinforced bakelite composites. *Mater. Des.* 2009. V. 30. P. 3896-3899. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.03.024.
12. **Перепелкин К.Е.** Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы. СПб: Издание СПГУТД. 2008. 354 с.
13. **Железина Г.Ф.** Конструкционные и функциональные органопластики нового поколения. *Тр. ВИАМ*. 2013. № 4. С. 6.
14. **Lertwassana W. Parnklang T., Mora P., Jubsilp C., Rimdusit S.** High performance aramid pulp/carbon fiber-reinforced polybenzoxazine composites as friction materials. *Compos. Part B: Eng.* 2019. V. 177. P. 107280. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107280.
15. **Давыдова И.Ф., Кавун Н.С.** Теплостойкие антифрикционные текстолиты. *Тр. ВИАМ*. 2014. № 11. С. 4. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-4-4.
16. **Burmistr M.V., Boiko V.S., Lipko E.O., Gerasimenko K.O., Gomza Yu.P., Vesnin R.L., Chernyayev A.V., Ananchenko B.A., Kovalenko V.L.** Antifriction and construction materials based on modified phenol-formaldehyde resins reinforced with mineral and synthetic fibrous fillers. *Mech. Compos. Mater.* 2014. V. 50. P. 213-222. DOI: 10.1007/s11029-014-9408-0.
2. **Arakelyan A.G.** Preparation and use of textolite. *Tendentsii Razvitiya Nauki Obrazovaniya*. 2018. N 38-4. P. 32-33 (in Russian). DOI: 10.18411/lj-05-2018-84.
3. **Matveeva I.G., Lebedev M.P.** Study of the strength properties of textolite reinforced with fabrics with different types of weave. *Tr. Kol'skogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2017. V. 8. N 5-1. P. 94-97 (in Russian).
4. **Sharifullin S.N., Denisov V.A., Zadorozhny R.N., Kudryashova, E.Yu., Reschikov E., Izikaeva A.I.** Tribotechnical tests of layered polymers. *Tribol. Ind.* 2020. V. 42. N 1. P. 81. DOI: 10.24874/ti.2020.42.01.08.
5. **Gusev E.V., Naboyshchikova N.A., Ageeva T.A.** Technological background for obtaining a composite material based on hard synthetic resins and fiber filler. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 58-63 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6553.
6. **Gusev E.V., Naboyshchikova N.A., Kolobov M.Y., Ageeva T.A.** Development and production of phenoplastic composites for mechanical engineering purpose. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 9. P. 82-89 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246709.7021.
7. **Yudin A.S., Buyaev D.I., Krasnov A.P., Sachek B.Ya., Afonicheva O.V., Bazhenova V.B.** Dispersed fillers in tribological polymer fiber-reinforced materials (exploratory study). *Vopr. Materialoved.* 2012. V. 72. N 4. P. 231-239 (in Russian).
8. **Xantosa M.** Functional fillers for plastics. S-Pb.: Nauchnyye osnovy i tekhnologii. 2010. 462 p. (in Russian).
9. **Li D., Hu, X., Huang Z., Chen Y., Han H., Xiao Ch.** Effect of several modifiers on the mechanical and tribological properties of phenol formaldehyde resin. *High Perform. Polym.* 2018. V. 30. N 5. P. 580-590. DOI: 10.1177/0954008317710317.
10. **Kumar N., Bharti A., Goyal H.S., Patel K.K.** The evolution of brake friction materials: a review. *Mater. Phys.Mech.* 2021. V. 47. N 5. P. 796-815. DOI: 10.18149/MPM.4752021\_13.
11. **Ünlü B.S., Atic E., Yilmaz S.S.** Tribological behaviors of polymer based journal bearings manufactured from particle reinforced bakelite composites. *Mater. Des.* 2009. V. 30. P. 3896-3899. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.03.024.
12. **Perepelkin K.E.** Chemical fibers: development of production, methods of production, properties, prospects. SPb: Izdaniye SPGUTD. 2008. 354 p. (in Russian).
13. **Zhelezina G.F.** New generation of structural and functional organic plastics. *Tr. VIAM*. 2013. N 4. P. 6-8 (in Russian).
14. **Lertwassana W. Parnklang T., Mora P., Jubsilp C., Rimdusit S.** High performance aramid pulp/carbon fiber-reinforced polybenzoxazine composites as friction materials. *Compos. Part B: Eng.* 2019. V. 177. P. 107280. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107280.
15. **Davydova I.F., Kavun N.S.** Heat-resistant anti-friction textolites. *Tr. VIAM*. 2014. N 11. P. 4 (in Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-4-4.
16. **Burmistr M.V., Boiko V.S., Lipko E.O., Gerasimenko K.O., Gomza Yu.P., Vesnin R.L., Chernyayev A.V., Ananchenko B.A., Kovalenko V.L.** Antifriction and construction materials based on modified phenol-formaldehyde resins reinforced with mineral and synthetic fibrous fillers. *Mech. Compos. Mater.* 2014. V. 50. P. 213-222. DOI: 10.1007/s11029-014-9408-0.

17. Buyaev D.I., Krasnov A.P., Naumkin A.V., Yudin A.S., Afonicheva O.V., Golub A.S., Goroshkov M.V., Buzin M.I. Effect of chemical structure of aramide and polyoxadiazole fibers on friction of organoplastics. *J. Frict. Wear.* 2016. V. 37. N 4. P. 351-357. DOI: 10.3103/S106836661604005X.
18. Sazanov Yu.N., Dobrovol'skaya I.P., Lysenko V.A., Sal'nikova P.Yu., Kosyakov D.S., Pokryshkin S.A. Thermochemical structural transformations of polyoxadiazoles. *Russ. J. Appl. Chem.* 2015. V. 88. N 8. P. 1304-1310. DOI: 10.1134/S1070427215080121.
19. Yan X., Li Z., Zhou W., Jiang M., Liu P., Xu J. Study of the thermal decomposition and flame-retardant mechanism of sulfonated polyoxadiazole fibers. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016. V. 126. P. 1301-1311. DOI: 10.1007/s10973-016-5752-8.
20. Краснов А.П., Тимофеев В.А., Афоничева О.В., Буяев Д.И., Чукаловский П.А., Кузнецов В.В. Роль трибохимически активных связующих в создании нового армированного антифрикционного износостойкого материала. *Вопр. материаловедения.* 2006. Т. 46(2). С. 105.
21. Buyaev D. I., Naumkin, A.V., Yudin, A.S, Alekseev V.V., Maslakov K.I., Afonicheva O.V., Kiselev S.S., Osipchik V.S., Klabukova L.F., Krasnov A.P. Tribochemical processes in epoxyorganic textolite-steel friction pair. *J. Frict. Wear.* 2016. V. 37. P. 15-22. DOI: 10.3103/S1068366616010049.
22. Буря А.И., Томина А.М.В., Чернов В.А. Влияние содержания волокна оксалон на триботехнические характеристики органических пластиков на основе фенилона С-1. *Probl. Tribol.* 2016. Т. 82. № 4. С. 11-16.
17. Buyaev D.I., Krasnov A.P., Naumkin A.V., Yudin A.S., Afonicheva O.V., Golub A.S., Goroshkov M.V., Buzin M.I. Effect of chemical structure of aramide and polyoxadiazole fibers on friction of organoplastics. *J. Frict. Wear.* 2016. V. 37. N 4. P. 351-357. DOI: 10.3103/S106836661604005X.
18. Sazanov Yu.N., Dobrovol'skaya I.P., Lysenko V.A., Sal'nikova P.Yu., Kosyakov D.S., Pokryshkin S.A. Thermochemical structural transformations of polyoxadiazoles. *Russ. J. Appl. Chem.* 2015. V. 88. N 8. P. 1304-1310. DOI: 10.1134/S1070427215080121.
19. Yan X., Li Z., Zhou W., Jiang M., Liu P., Xu J. Study of the thermal decomposition and flame-retardant mechanism of sulfonated polyoxadiazole fibers. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016. V. 126. P. 1301-1311. DOI: 10.1007/s10973-016-5752-8.
20. Krasnov A.P., Timofeev V.A., Afonicheva O.V., Buyaev D.I., Chukalovsky P.A., Kuznetsov V.V. Influence of tribochemical active bindings in creation of new reinforced antifrictional material. *Vopr. Materialoved.* 2006. V. 46(2). P. 105-113 (in Russian).
21. Buyaev D. I., Naumkin, A.V., Yudin, A.S, Alekseev V.V., Maslakov K.I., Afonicheva O.V., Kiselev S.S., Osipchik V.S., Klabukova L.F., Krasnov A.P. Tribochemical processes in epoxyorganic textolite-steel friction pair. *J. Frict. Wear.* 2016. V. 37. P. 15-22. DOI: 10.3103/S1068366616010049.
22. Burya A.I., Tomina A.-M.V., Chernov V.A. Effect of fiber on oksalon tribological characteristics organic plastics based on phenylone C-1. *Probl. Tribol.* 2016. V. 82. N 4. P. 11-16 (in Russian).

Поступила в редакцию 10.01.2024

Принята к опубликованию 13.02.2024

Received)10.01.2024

Accepted 13.02.2024