

УДК 620.178.162

## ФТОРОПЛАСТСОДЕРЖАЩИЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ КОМПОЗИТЫ ПРИ НИЗКОСКОРОСТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. А. Кохановский<sup>1</sup>, Д. В. Глазунов<sup>2</sup>, А. А. Феденко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>vcohan@yandex.ru, <sup>2</sup>glazunovdm@yandex.ru, <sup>3</sup>afedenko62@gmail.com

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РГУПС)

Поступила в редакцию 06.11.2020

**Аннотация.** Рассмотрены основные отличия антифрикционных и фрикционных материалов в процессе эксплуатации технических агрегатов, машин и отдельных элементов. Проведены экспериментальные исследования триботехнических свойств антифрикционных полимерных фторопластсодержащих композиционных покрытий в условиях низких скоростей. Приведены результаты исследований антифрикционных полимерных композитов в условиях низкоскоростной эксплуатации. Определено, что в исследованном диапазоне скоростей температура в процессе трения зависит в основном от нагрузки, которая влияет на нее на 43,7 % интенсивнее скорости. Выявлены коэффициенты трения покрытия в исследованной области режимов ( $\approx 0,2$  при  $\sigma = 15$  МПа). В результате проведенных исследований обеспечивают ресурс антифрикционных композитов, соответствующий 8-му классу износостойкости.

**Ключевые слова:** фторопластсодержащие полимерные покрытия; низкоскоростная эксплуатация; специфика триботехнических параметров.

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс эксплуатации технических агрегатов, машин и отдельных элементных групп оборудования неизбежно сопровождается износом. Взаимное механическое воздействие деталей друг на друга с разной степенью интенсивности приводит к истиранию их поверхностей и разрушению внутренней структуры. К тому же подобное влияние нередко оказывает и окружающая среда в виде эрозии и кавитации. В результате наблюдается потеря работоспособности техники или как минимум снижение эксплуатационных свойств. Такие материалы рекомендуются к использованию и для промышленного оборудования, и бытовой техники, а также для строительного инструмента. Рассмотрение данных материалов в одном контексте обусловлено тем, что

их функция связана с общей характеристикой работы механизмов – коэффициентом трения. Но если антифрикционные элементы и добавки отвечают за понижение данного значения, то фрикционные – напротив, повышают его. При этом, например, порошковые сплавы с повышенным коэффициентом трения обеспечивают сопротивление износу и механическую прочность целевой рабочей группы. Для достижения таких качеств в состав фрикционного сырья вносятся тугоплавкие оксиды, карбиды бора, кремния и др.

Исследуемые антифрикционные материалы являются гибридным полимерным композитом, сформированным специальным тканым каркасом из фторопластовых нитей (полифен) и полиимидных – (аримидТ) в матричном связующем на основе феноль-

ных смол [1]. Армирующий компонент композита представляет собой специальную полутораслойную ткань (саржа 1/3), имеющую основу и верхний уток из фторопластовых нитей, а нижний уток – из полиимидных. При этом на рабочую поверхность ткани выведено до 85–90 % фторопласта, а на изнаночную – до 95 % полиимида.

К технологическим недостаткам фторопласта следует отнести отсутствие адгезии к матричному связующему, что позволяет закреплять полифен в покрытии чисто механически, ткацким переплетением. Кроме того, на рабочую поверхность композита выведена сетка из полиимидных нитей, имеющих более высокую прочность и значительную адгезию к матрице композита. Матричное связующее растворного типа выполнено из резольной смолы, модифицированной термостойким каучуком. Оно обеспечивает высокую технологичность процессу нанесения антифрикционного покрытия, одновременно отверждая его и обеспечивая адгезионное закрепление на субстрате. Существенным преимуществом растворных адгезивов является возможность изготовления на их основе технологических полуфабрикатов покрытий – препрегов, представляющих собой ткань, пропитанную неотвержденным связующим и высушенную от растворителей. Покрытия из подобных композитов широко применяются в трибосистемах самых разных машин при высоких нагрузках (до 150 МПа) и относительно низких скоростях ( $\leq 0,1$  м/с) [2–4]. Этот диапазон эксплуатационных режимов характерен для авиационных систем управления.

Однако для применения рассматриваемых антифрикционных покрытий при более низких скоростях требуются данные об их триботехнических характеристиках в этих условиях. Подобная информация в доступной литературе отсутствует. Результаты экспериментальных исследований, приведенные в настоящей статье, в какой-то степени заполняют этот пробел.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ФТОРОПЛАСТСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ТРЕНИИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ СКОРОСТЕЙ

Исследования проводились на стенде с вращательным движением в диапазоне средних (по проекции вала) контактных напряжений 15–150 МПа и скоростей в пределах 0,01–0,05 м/с. Коэффициент трения измерялся *S*-образным тензодатчиком с индикатором R320, температура – комплексом ТМ-902С, а величина износа – микрометром МК25.

Экспериментальные образцы представляли собой полувтулки из стали 45 с покрытием на внутренней поверхности размером  $\varnothing 14 \times 10$  мм. Контртела в виде валиков  $\varnothing 14 \times 200$  мм обрабатывались до  $R_a = 0,25$  мкм. Исследования выполнялись по полнофакторным двухуровневым планам типа ПФЭ 2<sup>2</sup>.

Испытания образцов покрытий продолжались до их полного износа, что устанавливалось по повышению коэффициента трения. Величина износа принималась равной разнице замеров толщины образца до и после испытаний с вычетом вязкоупругой деформации полимерного покрытия. Деформация уменьшает толщину покрытия, но не влияет на объем смазочного материала – фторопласта, т. е. увеличение зазора деформации не влияет на износ.

В результате обработки экспериментальных результатов была получена регрессионная модель зависимости коэффициента трения от нагрузочно-скоростных режимов. Модель адекватна, обеспечивает при интерполяционных расчетах погрешность не более 3 % и имеет следующий вид

$$f = 5,4 \sigma^{-0,904} V^{0,54 - 0,216 \lg \sigma}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – средние контактные напряжения, МПа;  $V$  – скорость скольжения, м/с.

Графическая интерпретация модели представлена на рис. 1.

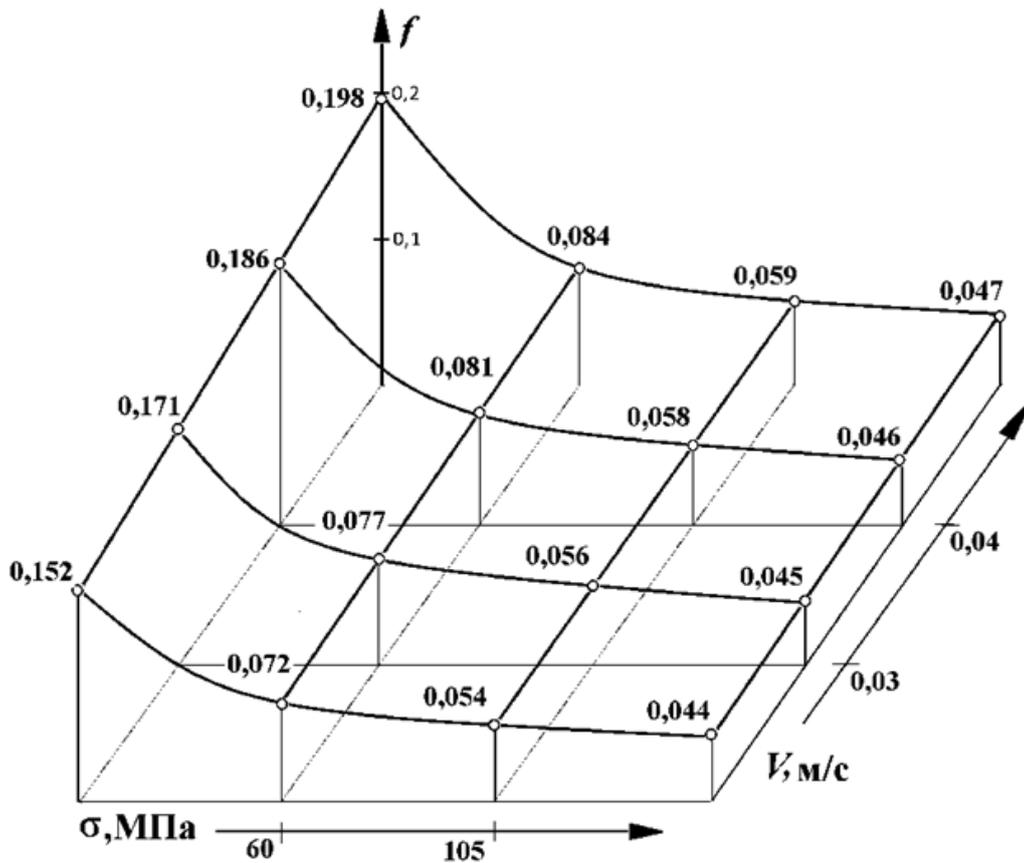


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от нагрузочно-скоростных режимов

Анализ экспериментальных результатов показывает, что с увеличением нагрузки выше  $\approx 65$  МПа влияние принятых скоростей на коэффициент трения становится незначительным ( $\approx 8\text{--}10\%$ ), не превышающим погрешности измерений. Только при снижении нагрузки до  $45\text{--}60$  МПа коэффициент трения изменяется на  $\approx 17\text{--}30\%$ . Следовательно, в диапазоне скоростей  $0,01\text{--}0,05$  м/с можно считать, что коэффициент трения зависит только от нагрузки, при ее изменении в пределах  $\approx 60\text{--}150$  МПа.

Эта особенность трибоконтакта при эксплуатации на малых скоростях может быть объяснена малой величиной генерируемой температуры, практически равной температуре окружающего воздуха. Применяемый диапазон скоростей при относительно малых нагрузках снижает в локальных зонах генерацию тепла и затрудняет адаптационные и релаксационные процессы в макромолекулах фторопласта. Следствием этого

и являются относительно высокие коэффициенты трения, установленные при исследованиях.

Необходимо отметить, что при более высоких скоростях их влияние на генерацию тепла в металлополимерных парах превышает влияние нагрузки [5, 6]. Это может быть объяснено тем, что в результате деформации в металлополимерной трибосистеме менее жесткого полимерного покрытия значительно возрастает площадь фактического контакта и снижаются контактные напряжения.

Обработка результатов измерения температуры позволила получить адекватную регрессионную модель ее зависимости от нагрузочно-скоростных режимов. Модель имеет следующий вид

$$T = 0,989 \sigma^{1,272} V^{0,657} \lg \sigma^{-0,673}. \quad (2)$$

Погрешность модели не превышает  $3\%$ , а ее график приведен на рис. 2.

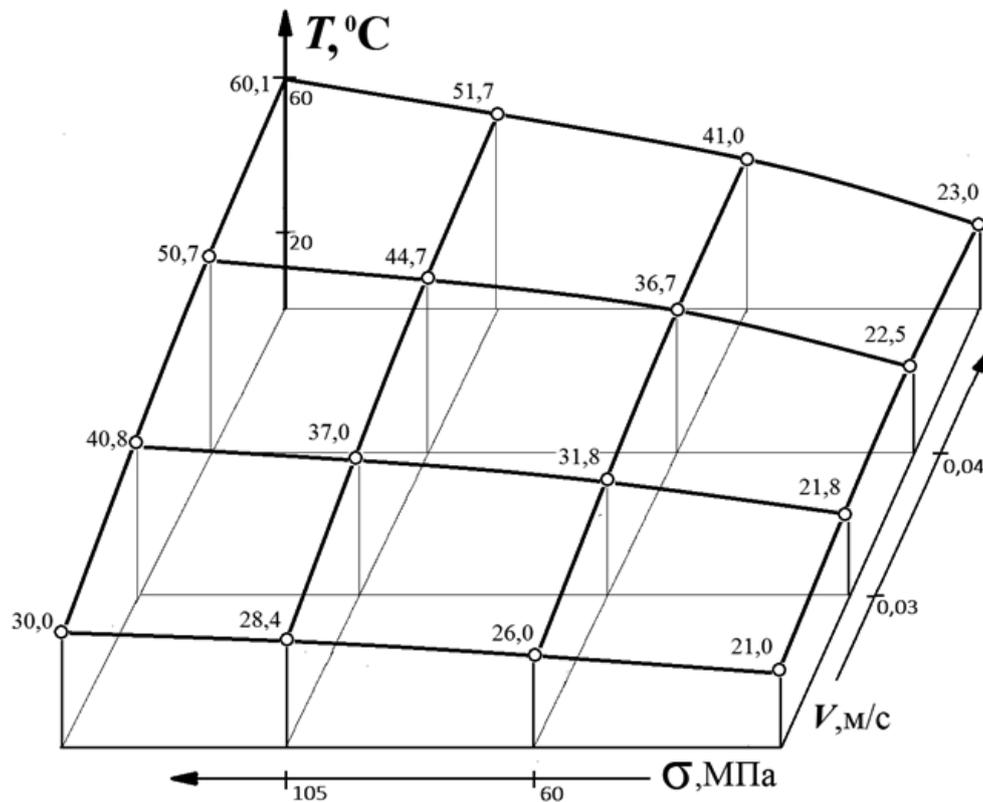


Рис. 2. Зависимость температуры в зоне трения от режимов эксплуатации

Полученные результаты подтверждают выводы, сделанные выше. Наличие смешанных взаимодействий в модели доказывает, что наблюдается общее влияние на температуру скорости и нагрузки. Причем контактные напряжения обеспечивают более интенсивный нагрев, чем скорость, в среднем на 43,7%. Это объясняется не столько большим, чем скорость, диапазоном варьирования нагрузки, сколько низким уровнем скоростей. Подобное соотношение влияния режимов трения на генерацию тепла в трибосистеме характерно только для весьма малых скоростей – менее 0,08 м/с.

Поскольку реальные узлы трения с рассматриваемым покрытием предназначены для тяжело нагруженных трибосистем, работающих в самых разных условиях, представляется целесообразным установить их триботехнические характеристики при критических режимах нагружения, часто воз-

никающих в аварийных ситуациях. Предельная величина нагрузочно-скоростных режимов для металлополимерных трибосистем с фторопластсодержащими покрытиями характеризуется не только разрушением материала покрытия, как в металлических парах, но и кинематическим переходом фенольной матрицы композита в состояние вынужденной высокоэластичности. Этот переход происходит при совместном действии нагрузки и температуры, причем рост нагрузки снижает порог температурного перехода. Условия этого перехода определяются выражением:

$$\sigma_{\text{вв}} = 1137,4 - 217,16 T, \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{вв}}$  – предел вынужденной высокоэластичности, МПа;  $T$  – температура зоны трибоконтakta, К.

На рис. 3 представлены графики зависимости этих величин.

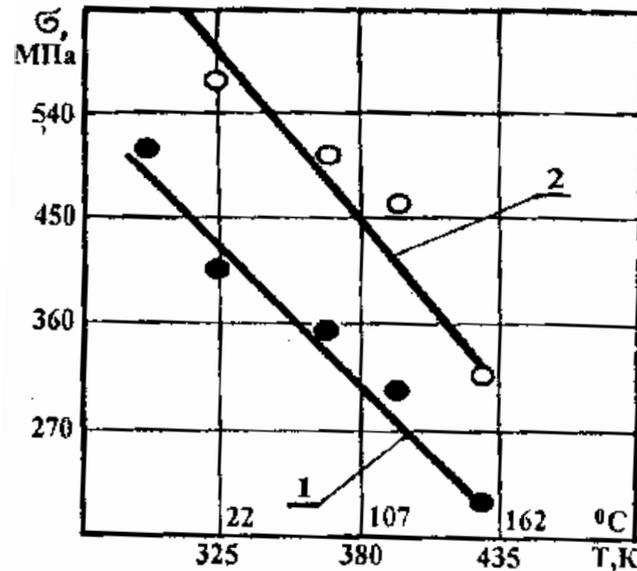


Рис. 3. Влияние контактных напряжений и температуры на переход матрицы композита в состояние вынужденной эластичности (1) и его разрушения (2)

Выражение (3) связывает в единый комплекс два параметра, одновременное действие которых определяет рассматриваемый кинетический переход, а также прочность композита. Следует отметить, что общий рост температуры сужает величину температурного промежутка между наступлением состояния вынужденной высокоэластичности и полным разрушением покрытия. В исследованном диапазоне параметров эта величина уменьшается примерно от 70 до 40°. Это свидетельствует о том, что разрушение антифрикционного покрытия, т. е. полный отказ трибосистемы, наступает через некоторый промежуток времени, отдаляющий наступление аварийного отказа [7]. Сравнение коэффициентов трения покрытия и контртел из различных материалов выполнялось при нагрузке 30 МПа и скорости 0,08 м/с (рис. 4).

Коэффициенты трения распределились в соответствии с теплофизическими и структурными параметрами [8] применяемых материалов.

Итогом исследований низкоскоростных режимов являлось установление интенсивности изнашивания полимерных покрытий. Эти исследования проводились по однофакторному плану при скорости  $V = 0,025$  м/с и варьировании нагрузки в пределах 5–30 МПа, обеспечивающих 8-й класс износостойкости.

Полученная регрессионная зависимость близка линейной и описана выражением

$$I = (0,37\sigma - 0,84) \times 10^{-9}. \quad (3)$$

График зависимости представлен на рис. 5.

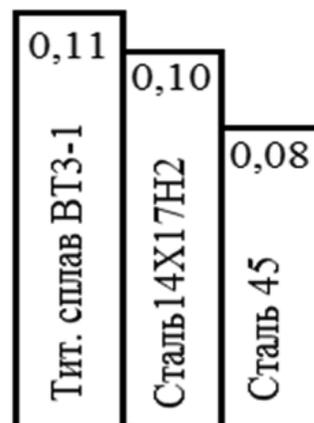


Рис. 4. Влияние материала контртел на коэффициент трения

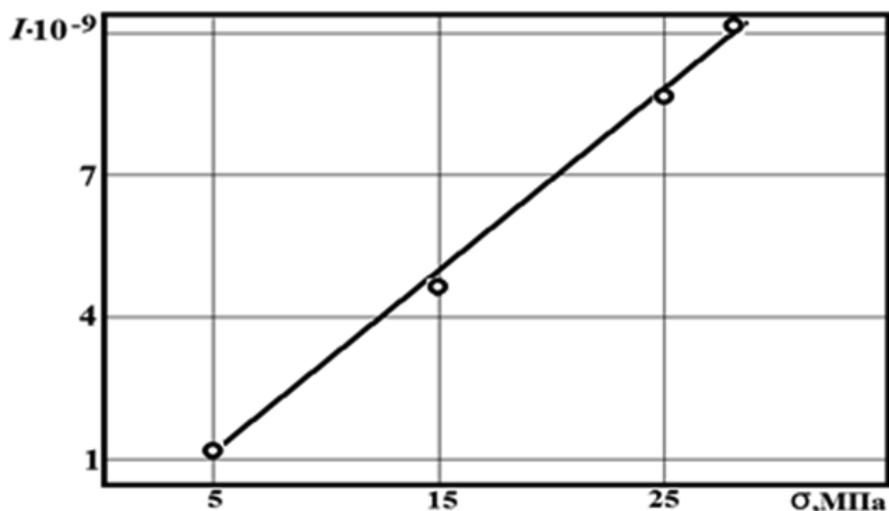


Рис. 5. Влияние средних контактных напряжений на интенсивность изнашивания покрытий

Значительная износостойкость фторопластсодержащих покрытий при очень низких скоростях скольжения, несмотря на относительно высокие значения коэффициента трения, может быть объяснена спецификой смазывания фторопластом, происходящим в результате его адгезионного переноса на контртело [9–13]. Медленное движение обеспечивает его медленный перенос по закону, близкому к линейному.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс экспериментальных исследований триботехнических свойств антифрикционных полимерных фторопластсодержащих композиционных покрытий при трении в условиях низких (0,01–0,05 м/с) скоростей позволяет сделать ряд выводов.

При низком диапазоне скоростей в диапазоне нагрузок  $\approx 80$ –150 МПа коэффициент трения в металлополимерных трибосистемах с композиционными фторопластсодержащими покрытиями варьируется незначительно (на 6,4 %) и может аппроксимироваться средней величиной.

В исследованном диапазоне скоростей температура, генерируемая в процессе трения, зависит в основном от нагрузки, которая влияет на нее на 43,7 % интенсивнее скорости.

Несмотря на высокие для фторопласта коэффициенты трения покрытия, в исследованной области режимов ( $\approx 0,2$  при  $\sigma = 15$  МПа) они обеспечивают ресурс, соответствующий 8-му классу износостойкости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кохановский В. А.** Структура и свойства антифрикционных волоконитов // Безызносность: сб. науч. тр. Ростов н/Д: РИСХМ, 1992. Вып. 2. С. 132–137. [V. A. Kokhanovsky, "Structure and properties of anti-friction fiber", (in Russian), in *Bezyznosnost*, Rostov-na-Donu: RISXM, vol. 2, pp. 132-137, 1992.]
2. **Self-lubricating bearing.** 1 Dry bearings // Engineering. 1980. № 220. P. 1–6. [ "Self-lubricating bearing. 1 Dry bearings", in *Engineering*, no. 220, pp. 1-6, 1980.]
3. **Ina Elges.** Gelenklager, Gelenkköpfe. Makatalog K227D. Ausgabe: 1980, Juli. 103 p. [ Ina Elges. Spherical bearings, rod ends. Catalogue K227D. Edition: 1980, July. 103 p.]
4. **Артамонов В. Н., Дроздов Ю. Н.** Трибологические характеристики сферических шарнирных подшипников скольжения с самосмазывающимся покрытием на основе ткани // Вестник машиностроения. 1987. № 4. С. 10–14. [V. N. Artamonov, Yu. N. Drozdov, "Tribological characteristics of spherical plain bearings with a self-lubricating coating on the basis of fabric", (in Russian), in *Vestnik mashinostroeniya*, no. 4, pp. 10-14, 1987.]
5. **Кохановский В. А.** Износостойкость металлополимерных трибосистем с композиционным покрытием // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. № 1. С. 13–19. [V. A. Kokhanovsky, "Wear resistance of metal-polymer tribosystems with a composite coating", (in Russian), in *Trenie i smazka v mashinach i mekhanizmah*, no. 1, pp. 13-19, 2007.]
6. **Трение и износ материалов на основе полимеров / В. А. Белый [и др.]** Минск: Наука и техника, 1976. 431 с. [V. A. Bely, et al., *Friction and wear of polymer-based materials*, (in Russian). Minsk: Nauka i tehnika, 1976.]
7. **Кохановский В. А.** Предельное прочностное состояние антифрикционных самосмазывающихся волоконитов // Пластические массы. 1990. № 6. С. 25–27. [V. A. Kokhanovskiy, "Ultimate strength state of antifriction self-lubricating fiberglass", (in Russian), in *Plasticheskie massy*, no. 6, pp. 25-27, 1990.]
8. **Виницкий А. Г., Галько А. В., Смолеско П. А.** Исследование влияния структуры на поверхностную прочность углеродистых и хромистых сталей при трении // Металловедение и термическая обработка металлов. 1979. № 2.

С. 15–17. [ A. G. Vinitkiy, A. V. Galyko, P. A. Smosenko, “Investigation of the effect of structure on the surface strength of carbon and chromium steels during friction”, (in Russian), in *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, no. 2, pp. 15-17, 1979. ]

9. **Особенности** процесса изнашивания ПТФЭ и композита на его основе / А. Н. Сенатрев [и др.] // Трение и износ. 1989. Т. 10, № 4. С. 604–609. [ A. N. Senatrev, et al., “Features of the wear process of PTFE and composite based on it”, (in Russian), in *Trenie i iznos*, vol. 10, no. 4, pp. 604-609, 1989. ]

10. **Синатров А. Н., Смуругов В. А., Савкин В. Г.** К механизму фрикционного переноса и самосмазывания ПТФЭ // Трение и износ. 1991. Т. 12, № 6. С. 1023–1027. [ A. N. Sinatrov, V. A. Smurugov, V. G. Savkin, “To the mechanism of frictional transfer and self-lubrication of PTFE”, (in Russian), in *Trenie i iznos*, vol. 12, no. 6, pp. 1023-1027, 1991. ]

11. **Порошковые** подшипники с полимерными вставками / В. А. Кохановский [и др.] // Трение и износ. 2019. Т. 40, № 3. С. 291–297. [ V. A. Kokhanovsky, et al., “Powder bearings with polymer inserts”, (in Russian), in *Trenie i iznos*, vol. 40, no. 3, pp. 291-297, 2019. ]

12. **Кохановский В. А., Глазунов Д. В.** Фторопластсодержащие покрытия при возвратно-качательном движении // Вестник машиностроения. 2019. № 11. С. 69–71. [ V. A. Kokhanovskiy, D. V. Glazunov, “Fluoroplastic coatings in a reciprocating rocking motion”, (in Russian), in *Vestnik mashinostroeniya*, no. 11, pp. 69-71, 2019. ]

13. **Кохановский В. А., Глазунов Д. В., Зориев И. А.** Макрокомпозиционные полимерпорошковые подшипники // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 2. С. 40–45. [ V. A. Kokhanovskiy, D. V. Glazunov, I. A. Zoriev, “Macro-composite polymer powder bearings”, (in Russian), in *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, no. 2, pp. 40-45, 2019. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**КОХАНОВСКИЙ Вадим Алексеевич**, проф. каф. «Технология металлов» ФГБОУ ВО РГУПС. Дипл. инж.-мех. (РИСХМ, 1962). Д-р техн. наук, проф. Иссл. в обл. трения и износа в машинах.

**ГЛАЗУНОВ Дмитрий Владимирович**, доц. каф. «Транспортные машины и триботехника» ФГБОУ ВО РГУПС. Дипл. инж.-мех. (РГУПС, 2003). Канд. техн. наук. Иссл. в обл. трения и износа в машинах.

**ФЕДЕНКО Алексей Алексеевич**, доц. каф. «Основы проектирования машин» ФГБОУ ВО РГУПС. Дипл. инж.-мех. (ДГТУ, 1988). Канд. техн. наук. Иссл. в обл. трения и износа в машинах.

#### METADATA

**Title:** Fluoroplast-containing antifriction composites for low-speed operation.

**Authors:** V. A. Kokhanovskiy<sup>1</sup>, D. V. Glazunov<sup>2</sup>, A. A. Fedenko<sup>3</sup>

#### Affiliation:

Rostov State Transport University (RSTU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>vcohan@yandex.ru, <sup>2</sup>glazunovdm@yandex.ru, <sup>3</sup>afedenko62@gmail.com

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 4 (90), pp. 3-9, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The main differences between antifriction and friction materials during the operation of technical units, machines and individual elements are considered. Experimental studies of the tribological properties of antifriction polymeric fluoroplastic composite coatings at low speeds have been carried out. The results of studies of antifriction polymer composites under conditions of low-speed operation are presented. It has been determined that in the investigated range of speeds, the temperature during friction depends mainly on the load, which affects it 43.7 % more intensively than the speed. Coefficients of friction of the coating were revealed in the investigated range of modes ( $\approx 0.2$  at  $\sigma = 15$  MPa). As a result of the research carried out, the resource of antifreeze composites is provided, corresponding to the 8th class of wear resistance.

**Key words:** fluoroplast-containing polymer coatings; low-speed operation; specific tribological parameters.

#### About author:

**KOKHANOVSKIY, Vadim Alekseevich**, Prof., Dept. of Technology of metals RSTU. Dipl. eng.-fur. (RAHM, 1962). Dr. of Tech. Sci., prof. Research in the field of friction and wear in cars.

**GLAZUNOV, Dmitry Vladimirovich**, Assoc. Prof., Dept. of Transport machines and tribotechnics RSTU. Dipl. eng.-mech. (RSTU, 2003). Cand. of Tech. Sci. Research in the field of friction and wear in cars.

**FEDENKO, Alexey Alekseevich**, Assoc. Prof., Dept. of Principles of design of machines RSTU. Dipl. eng.-fur. (DSTU, 1988). Cand. of Tech. Sci. Research in the field of friction and wear in cars.