

Исследование влияния технологических факторов производства на структуры и свойства антифрикционных полимерных материалов

С.П. Захарычев^a, Д.В. Отмахов^b

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, Россия

^a 000361@pnu.edu.ru, ^b 003290@pnu.edu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-0921-3662>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9019-494X>

Статья поступила 06.02.2023, принята 15.02.2023

В статье кратко описываются результаты исследования влияния технологических факторов изготовления полимерных антифрикционных материалов, армированных хлопчатобумажными тканями различной плотности, изготовленных способом радиальной мокрой намотки, на их структуру, прочностные и триботехнические свойства. Представлены структуры армированных материалов и их поверхности, полученных при различных натяжениях армирующих тканей, профилограммы состояния рабочих поверхностей материалов, армированных тканями различной плотности, кратко изложены результаты сравнительных триботехнических исследований антифрикционных свойств материалов при работе без смазки и после выдержки в масле в течение одних суток. Приведена схема физической машины трения, снабженной цифровым измерительно-вычислительным комплексом на основе микроконтроллера, позволяющим контролировать параметры трения, визуализировать и управлять режимами триботехнических экспериментов. Анализ полученных результатов свидетельствует, что прочностные и триботехнические характеристики антифрикционных полимерных композиционных материалов, армированных хлопчатобумажными тканями полотняного плетения, во многом зависят от натяжения последних в процессе изготовления материала и качества происходящей при этом пропитки компаундом тканей. При увеличении в процессе изготовления намоткой натяжения армирующих тканей до определенных величин возрастает плотность укладки волокон и при воздействии внешней нагрузки увеличивается доля, воспринимаемая армирующими волокнами, и частично разгружается матрица, что ведет к улучшению качественных и эксплуатационных свойств антифрикционных композиционных материалов

Ключевые слова: антифрикционные полимерные композиционные материалы, машина физического трения, трение, износ, автоматизация исследований, контроллер

Investigation of the influence of production technological factors on structures and properties of antifriction polymer materials

S.P. Zakharychev^a, D.V. Otmakhov^b

Pacific State University, 136 Pacific Street, Khabarovsk, Russia

^a 000361@pnu.edu.ru, ^b 003290@pnu.edu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-0921-3662>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9019-494X>

Article received 06.02.2023, accepted

The article briefly describes the results of a study of the influence of technological factors in the manufacture of polymer antifriction materials reinforced with cotton fabrics of various densities, made by radial wet winding, on their structure, strength and tribotechnical properties. The structures of reinforced materials and their surfaces obtained at different tensions of reinforcing fabrics are presented, profilograms of the state of the working surfaces of materials reinforced with fabrics of different densities are presented, the results of comparative tribotechnical studies of the antifriction properties of materials when working without lubrication and after exposure to oil for one day are briefly presented. The scheme of a physical friction machine equipped with a digital measuring and computing complex based on a microcontroller, which allows you to control the friction parameters, visualize and control the modes of tribotechnical experiments, is presented. The analysis of the obtained results shows that the strength and tribotechnical characteristics of antifriction polymer composite materials reinforced with cotton fabrics of plain weave largely depend on the tension of the latter during the manufacture of the material and the quality of the impregnation of fabrics with the compound. With an increase in the tension of reinforcing fabrics during the manufacturing process by winding to certain values, the density of fiber laying increases and when exposed to external load, the proportion perceived by reinforcing fibers increases and the matrix is partially unloaded, which leads to an improvement in the quality and operational properties of antifriction composite materials

Keywords: antifriction polymer composite materials, physical friction machine, friction, wear, research automation, controller

Введение. В научно-исследовательской лаборатории композиционных материалов (НИЛ КМ) Тихоокеанского государственного университета (ТОГУ) ведутся работы в области полимерных композиционных материалов (ПКМ) с целью создания самосмазывающихся антифрикционных подшипников для узлов трения различных машин [1–3]. В процессе длительных исследований стало очевидно, что антифрикционные и физико-механические свойства определяются не только составом, но и строением структур ПКМ, образующихся под воздействием технологических факторов процессов изготовления компаундов, полуфабрикатов рабочего тела и конструкций подшипников и узлов трения на различных масштабных уровнях. Известную формулу материаловедов — ССС (состав – структура – свойства) требуется дополнить технологией, причем ее в линейной форме следует расположить после состава, — СТСС. Этот системный подход был использован при создании ряда технологий производства антифрикционных ПКМ различного назначения [4; 5; 9–11].

Для замены традиционных материалов в ряде научных и производственных организаций разработаны и внедряются новые антифрикционные ПКМ, армированные природными и синтетическими волокнами, обладающие повышенными качественными характеристиками. В НИЛ КМ ТОГУ проведены исследования и разработаны новые материалы антифрикционные самосмазывающиеся (МАС) на основе эпоксидных смол, наполненных композициями твердых порошковых смазок — политетрафторэтилена, дисульфида молибдена и графита, армированных хлопчатобумажными тканями разной плотности [9–11].

Целью работы является определение влияния технологических режимов изготовления материалов на их прочностные и триботехнические характеристики.

Получение армированных ПКМ на основе реактопластичных эпоксидных матриц, предназначенных для самосмазывающихся подшипников скольжения, наиболее рационально путем мокрой намотки тканей различной природы на формообразующие оправки [12–17], а также центробежным способом литья в комбинации с намоткой [18]. При этом использовались созданные автоматизированные технологические установки намотки и центробежного литья. В этом случае получались заготовки требуемых геометрических размеров с минимальными допусками под финишную механическую обработку. Для отладки технологических режимов производства и сравнения характеристик полученных изделий из ПКМ использовались заготовки постоянных габаритных размеров.

При получении армированных ПКМ способом намотки слои тканей, укладываемые друг на друга, развивают различные по величине давления, способствующие пропитке компаундом. При этом под воздействием силы натяжения ткани деформируются по-разному, и плотность укладки слоев зависит от толщины волокон, их физико-механических свойств и способов переплетений. От натяжения ткани во время

намотки зависит площадь раздела фаз «волокно – матрица», что во многом определяет конечные свойства армированных тканями ПКМ (рис. 1).

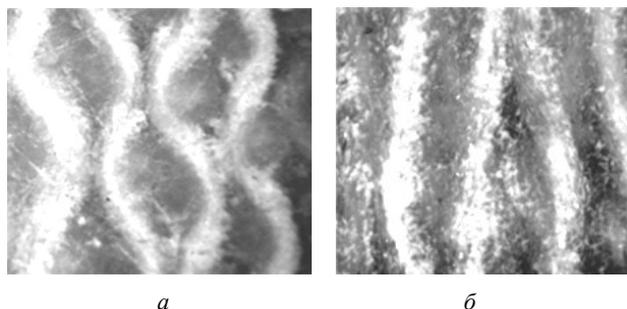


Рис. 1. Структура материала ($\times 200$), полученного при коэффициентах натяжения $K_n = 0,05$ (а) и $K_n = 0,5$ (б) от разрывной нагрузки ткани

Анализ структур ПКМ позволил сделать вывод о том, что при недостаточной степени натяжения армирующей ткани в процессе формирования заготовки основные напряжения в материале при его нагружении воспринимались матрицей. При увеличении степени натяжения доля внешней нагрузки на ПКМ, воспринимаемая нитями, возрастала. Кроме того, росли плотность укладки волокон и удельная площадь раздела фаз «матрица – волокно». В результате возрастала прочность получаемых ПКМ.

Об объемном содержании ткани в материале и его изменении при натяжении можно судить по микроструктуре поперечного сечения образцов. Для оценки наполнения получаемых материалов волокнистым наполнителем делались сколы образцов, охлажденных азотом (рис. 2).

По фотографиям микроструктуры материалов видно, что у образцов, полученных при высокой степени натяжения ткани $K_n = 0,5$, большая часть объема занята волокнистым наполнителем.

Кроме физико-механических показателей, определявшихся по известным методикам, проводились триботехнические испытания получаемых ПКМ на модернизированной машине физического трения (МФТ).

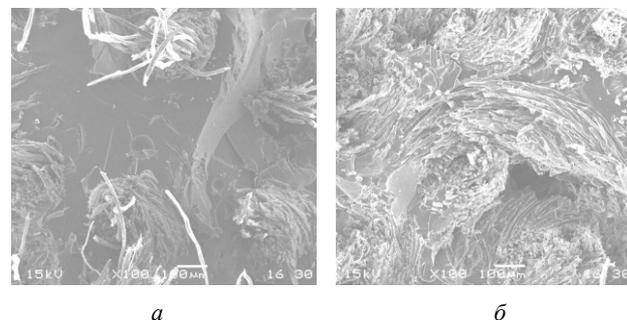


Рис. 2. Микроструктура материалов, армированных плотной тканью со степенью натяжения $K_n = 0,05$ (а), $K_n = 0,5$ (б)

Схема системы контроля и регистрации данных приведена на рис. 3 [15].

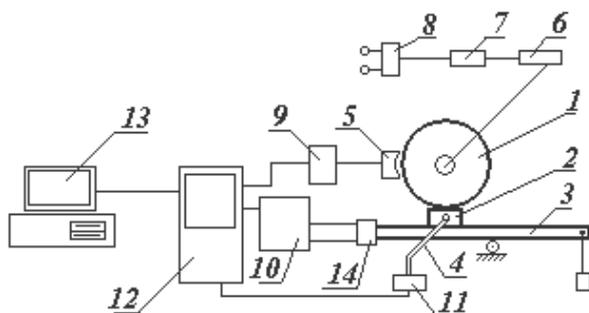


Рис. 3. Схема измерительной системы МФТ: 1 — диск; 2 — образец; 3 — рычаг с грузом; 4 — датчик температуры; 5 — датчик частоты вращения; 6 — привод диска; 7 — ЧРП; 8 — модуль привода; 9 — счетный модуль; 10 — модуль входов; 11 — модуль температурных аналоговых входов; 12 — контроллер; 13 — компьютер; 14 — тензометрический мост

В результате сравнительных испытаний материалов, армированных разными тканями (плотной, средней плотности и низкой плотности), определялись триботехнические параметры — коэффициент трения, температура и износостойкость при различных скоростных и нагрузочных режимах.

Типичные изменения коэффициента трения в зависимости от пути трения представлены на рис. 4.

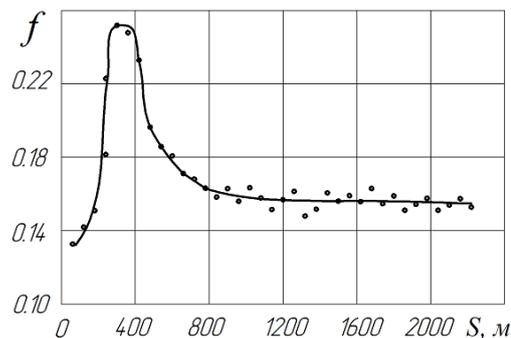
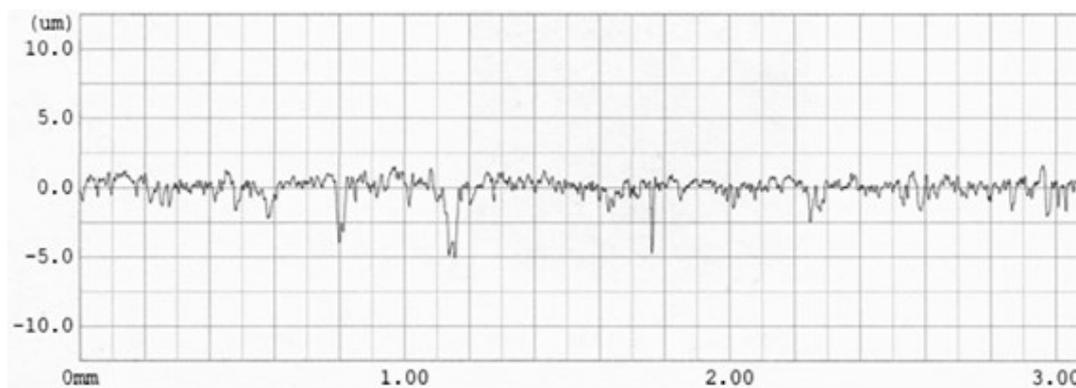


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от пути трения

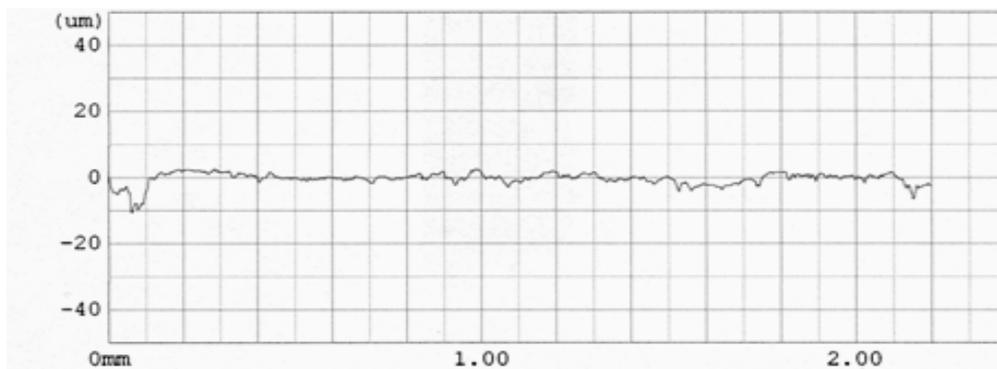
Графики изменения коэффициентов трения выявили, что существуют периоды приработки ПКМ, когда коэффициенты трения вначале увеличивались, а затем снижались и выходили на плато с постоянной величиной, которая определялась величиной давления, скоростными и температурными условиями.

Состояние рабочей поверхности ПКМ оценивалось на сканирующем зондовом микроскопе М1 ИНТЕГРА и на профилографе Surfcom 1800D (Япония).

На рис. 5 представлены профилограммы поверхностей образцов до трения и после.



a



б

Рис. 5. Профилограммы поверхности образцов до трения (а) и после трения (б)

Режимы механической обработки были одинаковы для всех экспериментальных образцов и соответствовали оптимальным при изготовлении подшипника скольжения: скорость резания 1,5 м/с; продольная подача — 0,08 мм/б; толщина снимаемого слоя — 0,5 мм.

В процессе трения происходит износ микронеровностей поверхности образца. Продукты износа, оставшиеся в зоне контакта, формируют сервовитную пленку, снижая при этом коэффициент трения и изменяя структуру поверхности трения (рис. 6).

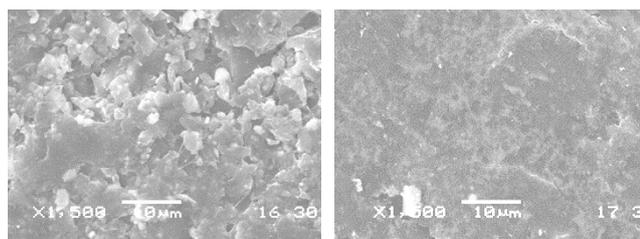


Рис. 6. Микроструктура поверхности образцов до трения (а) и после трения (б)

Для оценки качества пропитки композицией армирующих нитей, кроме кольцевых, изготавливались плоские образцы, вырезанные из стенки заготовки, и делались сколы образцов, охлажденных азотом (рис. 7).

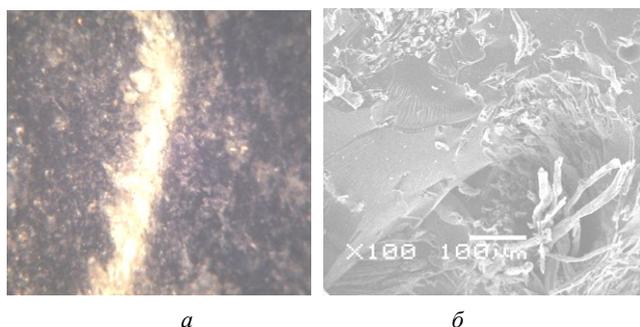


Рис. 7. Структура пропитанных связующим нитей: плоский срез (а), поперечный скол (б)

Сердцевина нити пропитывается композицией в меньшей степени, чем ее периферийные волокна, поэтому материал получается насыщенным каналами, что способствует повышенному масло- и водопоглощению при его дальнейшей эксплуатации.

Для определения влияния внутренней структуры образцов на их триботехнические характеристики были проведены сравнительные испытания образцов, армированных разными тканями (плотной, средней и низкой плотности) до и после выдержки в масле в течение одних суток (рис. 8).

Выдержка образцов материалов в масле способствует общему снижению коэффициента трения. У образцов, армированных плотной тканью и тканью средней плотности, наблюдается снижение коэффициента трения более чем в 2 раза. Это можно объяснить более высоким объемным содержанием волокнистого напол-

нителя, не пропитанного связующим, и, соответственно, большим маслопоглощением.

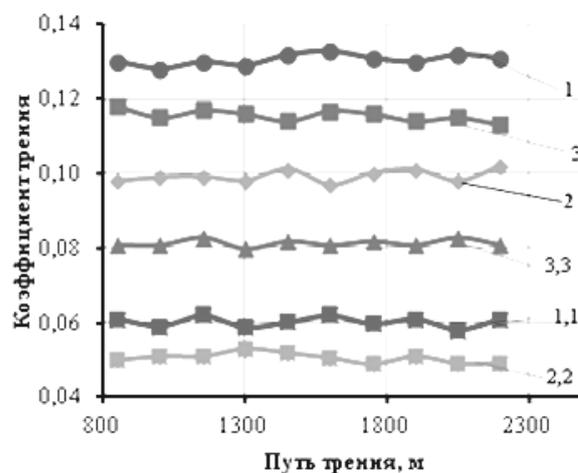


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения от пути трения для материалов, армированных разными тканями: 1 — плотной тканью; 2 — тканью средней плотности; 3 — тканью низкой плотности без выдержки в масле; 1.1, 2.2, 3.3 — после выдержки в масле в течение одних суток соответственно

Заключение

1. Анализ полученных результатов свидетельствует, что прочностные характеристики ПКМ, армированных хлопчатобумажными тканями полотняного плетения, напрямую зависят от ее натяжения в процессе изготовления материала. Это происходит за счет увеличения доли внешней нагрузки, воспринимаемой тканью.

2. Армирующие ткани пропитываются связующим не полностью — сердцевина нитей не пропитывается, поэтому в результате получается структура, насыщенная каналами, позволяющими материалу поглощать и удерживать влагу. В результате коэффициент трения у материалов, выдержанных в масле, снижается более чем в 2 раза по сравнению с образцами без выдержки.

Авторский вклад. С.П. Захарычев — идея исследований, общее руководство, сбор и анализ данных (50 %); Д.В. Отмахов — сбор и анализ данных, проведение экспериментов (50 %).

Литература

- Иванов В.А. Системный подход к созданию антифрикционных материалов и узлов трения. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 239 с.
- Захарычев С.П., Иванов В.А. Основы технологии эпоксидофторопластов для самосмазывающихся подшипников скольжения. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. 318 с.
- Отмахов Д.В. Эпоксидофторопласты, получаемые намоткой. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. 133 с.
- Иванов В.А. Самосмазывающиеся подшипники для высоких нагрузок // Антифрикционные самосмазывающиеся пластмассы и их применение в промышленности: материалы семинара. М.: МДНТП, 1984. С. 134-139.
- Иванов В.А. Совершенствование материалов и конструкций узлов лесопромышленного оборудования. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1987. Вып. 2. 42 с.
- Lancaster J.K. Accelerated wear testing as an aid to failure diagnosis and materials selection // Tribology International. 1981. V. 15. № 6. P. 323-329.
- Evans D.C., Senior G.S. Self-lubricating materials for plain bearing // Tribology International. 1982. V. 15. № 5. P. 234, 243-248.
- Miyake Shojiro, Yukio Sekine, Junichi Noshiro, Shuichi Watanabe. Low-friction and long-life solid lubricant films structured of nanoperiod tungsten disulfide and molybdenum disulfide multilayer // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. 2004. № 7A. P. 4338-4343.
- Иванов В.А., Захарычев С.П. Самосмазывающиеся композиционные подшипники скольжения и технология их

- производства // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов: тр. 3-й Междунар. конф. М.: Знание, 2004. С. 253-257.
10. Захарычев С.П. Разработка и исследование высокоизносостойких самосмазывающихся материалов для судовых механизмов, создание технологии и опытного производства для предприятий судостроения: отчет о НИР по Гос. контракту № П1733 от 25.09.09. и доп. от 05.04.10. ГР № 01200963319; Инв. № 02201151020. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2009. Ч. 1. 146 с.
 11. Захарычев С.П. Разработка и исследование полимерных композиционных материалов для судовых механизмов, создание технологии производства для предприятий судостроения: отчет о НИР по Соглашению ГК № 14. В37.21.1829 от 04.10.12. ГР № 01201276050; Инв. № 02201363952. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. Ч. 2. 92 с.
 12. Захарычев С.П., Иванов В.А. Разработка установки радиальной намотки для изготовления армированных полимерных композиционных материалов // Вестн. Тихоокеан. гос. ун-та. 2008. № 1 (8). С. 101-110.
 13. Zacharychev S.P., Otmahov D.V. Research of the radial winding process reinforced fabrications from antifriction polymeric compositions materials // Modern materials and technologies 2009: International Xth Russia-Chinese Symposium. Proceedings. Khabarovsk: Pacific National University, 2009. P. 363-368.
 14. Захарычев С.П., Иванов В.А., Отмахов Д.В., Авдеев В.А., Манаков В.М. Влияние технологических условий намотки на свойства полимерных композиционных материалов // Вестн. Тихоокеан. гос. ун-та. 2010. № 1 (16). С. 55-64.
 15. Иванов В.А., Авдеев В.А. Исследование триботехнических характеристик самосмазывающихся полимерных композитов // Учен. заметки ТОГУ. 2013. Т. 4. № 4. С. 1519-1531.
 16. Zacharychev S.P. Creation of mixers and research mixing of polymeric compounds // JSRSAPT 2006. JOINT CHINA-RUSSIA SYMPOSIUM ON ADVANSED MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY. P.R. China: Harbin, 2006. P. 74-77.
 17. Zacharychev S.P., Otmahov D.V. Using Polymer Adhesive Compositions in Design of Slider Bearings // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. 2011. V. 4. № 4. P. 314-316.
 18. Goncharov S.V., Ivanov V.A., Zakharychev S.P. Centrifugal shaping of polymer composites // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. № 3. P. 259-263.
 19. Zakharychev S.P., Ivanov V.A. Self-Lubricating Bearings Based on Compound Epoxy Fluoroplastics // Russian Engineering Research. 2017. V. 37. № 3. P. 206-210.
 20. Захарычев С.П., Иванов В.А. Подшипники скольжения из эпоксиэфторопластов. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017. 314 p.
 5. Ivanov V.A. Improvement of materials and designs of nodes of timber equipment. M.: VNIPIEllesprom, 1987. Vyp. 2. 42 p.
 6. Lancaster J.K. Accelerated wear testing as an aid to failure diagnosis and materials selection // Tribology International. 1981. V. 15. № 6. P. 323-329.
 7. Evans D.C., Senior G.S. Self-lubricating materials for plain bearing // Tribology International. 1982. V. 15. № 5. P. 234, 243-248.
 8. Miyake Shojiro, Yukio Sekine, Junichi Noshiro, Shuichi Watanabe. Low-friction and long-life solid lubricant films structured of nanoperiod tungsten disulfide and molybdenum disulfide multilayer // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. 2004. № 7A. P. 4338-4343.
 9. Ivanov V.A., Zaharychev S.P. Self-lubricating composite sliding bearings and technology of their production // Teoriya i praktika tekhnologij proizvodstva izdelij iz kompozicionnyh materialov i novyh metallicheskih splavov: tr. 3-j Mezhdunar. konf. M.: Znanie, 2004. P. 253-257.
 10. Zaharychev S.P. Development and research of highly wear-resistant self-lubricating materials for ship machinery, creation of technology and pilot production for shipbuilding enterprises: otchet o NIR po Gos. kontraktu № P1733 ot 25.09.09. i dop. ot 05.04.10. GR № 01200963319; Inv. № 02201151020. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2009. CH. 1. 146 p.
 11. Zaharychev S.P. Development and research of polymer composite materials for ship mechanisms, creation of production technology for shipbuilding enterprises: otchet o NIR po Soglasheniyu GK № 14. V37.21.1829 ot 04.10.12. GR № 01201276050; Inv. № 02201363952. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2012. CH. 2. 92 p.
 12. Zaharychev S.P., Ivanov V.A. Development of a radial winding installation for the manufacture of reinforced polymer composite materials // Bulletin of PNU. 2008. № 1 (8). P. 101-110.
 13. Zacharychev S.P., Otmahov D.V. Research of the radial winding process reinforced fabrications from antifriction polymeric compositions materials // Modern materials and technologies 2009: International Xth Russia-Chinese Symposium. Proceedings. Khabarovsk: Pacific National University, 2009. P. 363-368.
 14. Zaharychev S.P., Ivanov V.A., Otmahov D.V., Avdeev V.A., Manakov V.M. Effect of technological conditions of winding on properties of polymeric composite materials // Bulletin of PNU. 2010. № 1 (16). P. 55-64.
 15. Ivanov V.A., Avdeev V.A. Investigation of tribotechnical characteristics of self-lubricating polymer composites // Scientists notes PNU. 2013. V. 4. № 4. P. 1519-1531.
 16. Zacharychev S.P. Creation of mixers and research mixing of polymeric compounds // JSRSAPT 2006. JOINT CHINA-RUSSIA SYMPOSIUM ON ADVANSED MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY. P.R. China: Harbin, 2006. P. 74-77.
 17. Zacharychev S.P., Otmahov D.V. Using Polymer Adhesive Compositions in Design of Slider Bearings // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. 2011. V. 4. № 4. P. 314-316.
 18. Goncharov S.V., Ivanov V.A., Zakharychev S.P. Centrifugal shaping of polymer composites // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. № 3. P. 259-263.
 19. Zakharychev S.P., Ivanov V.A. Self-Lubricating Bearings Based on Compound Epoxy Fluoroplastics // Russian Engineering Research. 2017. V. 37. № 3. P. 206-210.
 20. Zaharychev S.P., Ivanov V.A. Sliding bearings from epoxido-fluoroplasts. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017. 314 p.

References

1. Ivanov V.A. A systematic approach to the creation of anti-friction materials and friction units. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2015. 239 p.
2. Zaharychev S.P., Ivanov V.A. Fundamentals of epoxy fluoroplastic technology for self-lubricating sliding bearings. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2012. 318 p.
3. Otmahov D.V. Epoxido-fluoroplasts obtained by winding. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2013. 133 p.
4. Ivanov V.A. Self-lubricating bearings for high loads // Antifrikcionnye samosmazvayushchiesya plastmassy i ih primenenie v promyshlennosti: materialy seminar. M.: MDNTP, 1984. P. 134-139.
5. Ivanov V.A. A systematic approach to the creation of anti-friction materials and friction units. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2015. 239 p.
6. Zaharychev S.P., Ivanov V.A. Fundamentals of epoxy fluoroplastic technology for self-lubricating sliding bearings. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2012. 318 p.
7. Otmahov D.V. Epoxido-fluoroplasts obtained by winding. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2013. 133 p.
8. Ivanov V.A. Self-lubricating bearings for high loads // Antifrikcionnye samosmazvayushchiesya plastmassy i ih primenenie v promyshlennosti: materialy seminar. M.: MDNTP, 1984. P. 134-139.
9. Ivanov V.A. Improvement of materials and designs of nodes of timber equipment. M.: VNIPIEllesprom, 1987. Vyp. 2. 42 p.
10. Lancaster J.K. Accelerated wear testing as an aid to failure diagnosis and materials selection // Tribology International. 1981. V. 15. № 6. P. 323-329.
11. Evans D.C., Senior G.S. Self-lubricating materials for plain bearing // Tribology International. 1982. V. 15. № 5. P. 234, 243-248.
12. Miyake Shojiro, Yukio Sekine, Junichi Noshiro, Shuichi Watanabe. Low-friction and long-life solid lubricant films structured of nanoperiod tungsten disulfide and molybdenum disulfide multilayer // Jap. J. Appl. Phys. Pt 1. 2004. № 7A. P. 4338-4343.
13. Ivanov V.A., Zaharychev S.P. Self-lubricating composite sliding bearings and technology of their production // Teoriya i praktika tekhnologij proizvodstva izdelij iz kompozicionnyh materialov i novyh metallicheskih splavov: tr. 3-j Mezhdunar. konf. M.: Znanie, 2004. P. 253-257.
14. Zaharychev S.P. Development and research of highly wear-resistant self-lubricating materials for ship machinery, creation of technology and pilot production for shipbuilding enterprises: otchet o NIR po Gos. kontraktu № P1733 ot 25.09.09. i dop. ot 05.04.10. GR № 01200963319; Inv. № 02201151020. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2009. CH. 1. 146 p.
15. Zaharychev S.P. Development and research of polymer composite materials for ship mechanisms, creation of production technology for shipbuilding enterprises: otchet o NIR po Soglasheniyu GK № 14. V37.21.1829 ot 04.10.12. GR № 01201276050; Inv. № 02201363952. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2012. CH. 2. 92 p.
16. Zaharychev S.P., Ivanov V.A. Development of a radial winding installation for the manufacture of reinforced polymer composite materials // Bulletin of PNU. 2008. № 1 (8). P. 101-110.
17. Zacharychev S.P., Otmahov D.V. Research of the radial winding process reinforced fabrications from antifriction polymeric compositions materials // Modern materials and technologies 2009: International Xth Russia-Chinese Symposium. Proceedings. Khabarovsk: Pacific National University, 2009. P. 363-368.
18. Zaharychev S.P., Ivanov V.A., Otmahov D.V., Avdeev V.A., Manakov V.M. Effect of technological conditions of winding on properties of polymeric composite materials // Bulletin of PNU. 2010. № 1 (16). P. 55-64.
19. Ivanov V.A., Avdeev V.A. Investigation of tribotechnical characteristics of self-lubricating polymer composites // Scientists notes PNU. 2013. V. 4. № 4. P. 1519-1531.
20. Zacharychev S.P. Creation of mixers and research mixing of polymeric compounds // JSRSAPT 2006. JOINT CHINA-RUSSIA SYMPOSIUM ON ADVANSED MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY. P.R. China: Harbin, 2006. P. 74-77.
21. Zacharychev S.P., Otmahov D.V. Using Polymer Adhesive Compositions in Design of Slider Bearings // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. 2011. V. 4. № 4. P. 314-316.
22. Goncharov S.V., Ivanov V.A., Zakharychev S.P. Centrifugal shaping of polymer composites // Russian Engineering Research. 2009. V. 29. № 3. P. 259-263.
23. Zakharychev S.P., Ivanov V.A. Self-Lubricating Bearings Based on Compound Epoxy Fluoroplastics // Russian Engineering Research. 2017. V. 37. № 3. P. 206-210.
24. Zaharychev S.P., Ivanov V.A. Sliding bearings from epoxido-fluoroplasts. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017. 314 p.