

## ANALYSIS OF SCIENTIFIC-TECHNICAL AND PATENT LITERATURE IN THE FIELD OF CREATION OF FREEZING POLYMERIC MATERIALS

P. N. Petrova\*, O. V. Gogoleva, A. G. Argunova, A. L. Fyodorov

*Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
 20 Avtodorozhnaya St., 677007, Yakutsk, Russia*

\*Corresponding author. E-mail: [pavlina@yandex.ru](mailto:pavlina@yandex.ru);  
 address for correspondence: 677007, ul. Avtodorozhnaya, 20, Yakutsk, Russia.  
 Tel.: +7 (4112) 35 79 16

The paper analyzes the scientific, technical and patent information to select promising polymer and composite materials for products with increased reliability and durability intended for operation in Arctic regions, as well as technologies for their production that provide a high technical level of performance and competitiveness.

*Keywords: polymer, polymeric composite material, frost resistance, wear resistance, friction coefficient*

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2017.2.053-065

### References

1. Savkin V.G., Biran V.V., Volzhin A.I., Solntsev A.P. Antifriction materials based on a polyamide binder. *Plastmassy*, 1986, no. 4, pp. 15–17. (In Russian)
2. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Baibaratskaya M.Yu., Mamaev O.A. *Polimernye kompozitsionnye materialy v tribotekhnike* [Polymeric Composite Materials in Tribology], M., Nedra-Bizness-Tsentr Publ., 2004, 262 p. (In Russian).
3. Stukach A.V., Kireenko O.F., Fadin Yu.A. Interrelation of tribological and thermal characteristics for filled polyamide. *Trenie i iznos*, 2004, vol. 25, no. 5, pp. 539–541. (In Russian).
4. Hitoshi Takita, Katsuo Take. Process for preparing carbon fiber-reinforced polyamide resins, *US Patent 3882077*, 1975.
5. Motorin S.V. Friction insert of absorbing apparatus of railway and metro car automatic coupler made of composite polymer antifriction material, *RF Patent 2595135*, 2016. (In Russian).
6. Motorin S.V. Base ring of absorbing apparatus of railway and metro car automatic coupler made of polyamide-based composite polymer antifriction material, *RF Patent 2581889*, 2016. (In Russian).
7. Burya A.I., Kozlov G.V. Wear mechanisms of phenylone-based coal-plastics: structural interpretation, *Trenie i iznos*, 2005, vol. 26, no. 3, pp. 321–324. (In Russian).
8. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Surikov V.I., Kalistratova L.F. *Kompozitsionnye materialy na osnove politetrafluoretilena* [Polytetrafluoroethylene-Based Composite Materials]. M., Mashinostroenie Publ., 2005, 240 p., ill. (In Russian).
9. Gu Dapeng, Duan Changsheng, Fan Bingli, Chen Suwen, Yang Y. Tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric composite in vacuum, *Tribology International*, 2016, vol.103, pp. 423–431. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.08.004.
10. Argunova A.G., Petrova P.N., Okhlopkova A.A., Shadrinov N.V., Gogoleva O.V., Cho Jin-Hozx, Ultrasonication-Induced Changes in Physicomechanical and Tribotechnical Properties of PTFE Composites. *Journal of the Korean Chemical Society*, 2015, vol. 59, no. 3, pp. 233–237. Available at: <http://dx.doi.org/10.5012/>.
11. Petrova P.N., Fedorov A.L. Development of polytetrafluoroethylene-based polymeric composites with high wear resistance intended for dry friction units. *Vestnik mashinostroeniya*, 2010, no. 9, pp. 50–53. (In Russian).

12. Wani Mohd Farooq, Vohra Karan, Anand Ankush, Ul Haq Mir Irfan, Raina Ankush. Tribological Characterization of a Self Lubricating PTFE Under Lubricated Conditions. *MATERIALS FOCUS*, 2016, vol. 5, no. 3, pp. 293–295.
13. Revina I.V. Technological possibilities of enhancing the quality of friction unit parts. *Vestnik VSGUTU*, 2012, no. 4 (39), pp. 53–58. (In Russian).
14. Ignatieva L.N., Adamenko N.A., Agafonova G.V. Effect of explosive processing on the structure and properties of polytetrafluoroethylene. *Vestnik Dalnevostochnogo otdeleniya Rossiiskoy akademii nauk*, 2013, no. 5 (171), pp. 44–52. (In Russian).
15. Hu Z.S., Dong J.H., Chen G.X. Study on anti-wear and reducing friction additive of nanometer ferric oxide. *Tribol. Intern*, 1998, vol. 31, no. 7, pp. 355–360. DOI: 10.1016/S0301-679X(98)00042-5.
16. Krasnov A.P., Mit V.A., Afonicheva O.V., Said-Galiev E.E., Nikolaev A.Yu., Vasilkov A.Yu., Podshibikhin V.L., Naumkin A.Yu., Volkov I.O. Friction of silver-containing UHMWPE nanocomposites. *Voprosy materialovedeniya*, 2009, vol. 57, no. 1, pp. 161–169. (In Russian).
17. Ma Y., Wang H., Bhushan B., Pei G., Wang H., Tong J., Menon C. Tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) filled with copper micro-powder. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 2017, vol. 48, no. 2, pp. 139–150. DOI: 10.1002/mawe.201700547.
18. Okhlopko A.A., Shits E.Yu., Gogoleva O.V. Tribotechnical-purpose PCM based on UHMWPE and ultrafine compounds. *Trenie i iznos*, 2004, vol. 25, no. 2, pp. 202–206. (In Russian).
19. Selyutin G.E., Gavrilov Yu.Yu., Voskresenskaya E.N., Zakharov V.A., Nikitin V.E., Poluboyarov V.A. Composite materials based on ultra-high-molecular-weight polyethylene: properties, application prospects. *Khimiya v intereskh ustoichivogo razvitiya*, 2010, vol. 18, pp. 375–388. (In Russian).
20. Panin S.V., Wannasri S., Pouvadin T., Ivanova L.R., Kornienko L.A., Sergeev S.V., Tkachev A.G., Fedorova T.V. Increasing tribotechnical properties of UHMW-PE based composite materials with nanomodifiers by mechanical and chemical modification and surface irradiation. In: *Abstracts of the 3rd International Conference "Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies"*, Novosibirsk, 2009, Novosibirsk, NGU, 2009, p. 58. (In Russian).
21. Poluboyarov V.A., Selyutin G.E., Korotaeva Z.A., Gavrilov Yu.Yu. The applicability of the method of mechanochemical effects to the preparation of nanodispersions and modification of polymers and metals with them, as well as to the creation of ceramic materials. *Perspektivnye materialy*, 2008, no. 6, pp. 86–90. (In Russian).
22. Wang Fei, Liu Lichao, Xue Ping, Ji Mingyin. Crystal Structure Evolution of UHMWPE/HDPE Blend Fibers Prepared by Melt Spinning. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 96. DOI: 10.3390/polym9030096.
23. Panin S.V., Kornienko L.A., Wannasri S., Piriyaon S., Poowadin T., Ivanova L.R., Shilko S.V., Sergeev S.V. Effect of mechanical activation, ion implantation and the type of fillers on the formation of a transfer film in the tribological coupling of UHMWPE-based composites. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2011, vol. 47, no. 5, pp. 727–738. (In Russian).
24. Costa L., Bracco P., Brach del Prever E., Luda M.P., Trossarelli L. Analyses of products diffused into UHMWPE prosthetic components in vivo. *Biomaterials*, 2001, vol. 22, no. 14, pp. 307–315. DOI: 10.1016/S0142-9612(00)00182-4.
25. Panin S.V., Kornienko L.A., Ivanova L.R., Piriyaon S., Poowadin T., Mandoung T., Sarondjaitam N., Shilko S.V., Wannasri S. Design of polymeric UHMWPE-based composites with increased tribotechnical properties by mechanical activation, ion implantation, chemical modification and nanofiller enforcement. In: *Proceedings of the third International Conference on heterogeneous material mechanics (ICHMM-2011)*, May 22–26, 2011, Shanghai (Chong Ming Island). China, Shanghai, 2011, pp. 612–615.
26. Panin S.V., Kornienko L.A., Piriyaon S., Ivanova L.R., Shil'ko S. V., Pleskachevskii Yu.M., Orlov V.M. Antifrictional composites based on chemically modified UHMWPE. Part 2. The effect

- of nanofillers on the mechanical and triboengineering properties of chemically modified UHMWPE. *Journal of Friction and Wear*, 2011, vol. 32, no. 4, pp. 233–239. DOI: 10.3103/S106836661104009X.
27. Sviridenok A.I., Meshkov V.V. High-speed sliding friction of polymer composites. *Trenie i Iznos*, 2005, vol. 26, no. 1, pp. 32–36.
  28. Anisimov A.V., Bakhareva V.E., Karpinsky G.S, Lishevich I.V., Nikitina I.V. Application prospects of superstructural thermoplastics intended for sliding bearings of centrifugal pumps. *Nasosy. Turbiny. Systemy*, 2014, no. 3 (12), pp. 3–13. (In Russian).
  29. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kulkov A.A., Oshmyan V.G. *Polimernye kompozitsionnye materialy* [Polymeric Composite Materials]. Dolgoprudnyi, Izdatelskiy Dom Intellect Publ., 2010, 352 p. (In Russian).
  30. Richardson M. *Promyshlennyye polimernye kompozitsionnye materialy* [Industrial Polymeric Composite Materials]. M., Khimiya Publ., 1980, 472 p. (In Russian).
  31. Yurkhanov V.B., Shavrin E.G., Darienko I.N., Chistyakov P.A., Matasova A.A. Antifrictional composite polymer material, *RF Patent 2524958*, 2013. (In Russian).
  32. Adam A., Deinert J. Plain bearing material comprising PTFE and chalk and composite multi-layer material, *US Patent 5686176*, 1997.
  33. Kolyago G.G., Struk V.A. *Materialy na osnove nenasyshchennykh poliefirov* [Materials Based on Unsaturated Polyesters]. M., Nauka i Tekhnika Publ., 1990, 144 p. (In Russian).
  34. Bogdanovich S.P., Pesetskiy S.S. The metal counterbody effect on triboengineering properties of compatibilized polyamide 6-polyethylene blend: mass transfer analysis. *Trenie i iznos*, 2004, vol. 25, no. 5, pp. 531–538. (In Russian).
  35. Krasnov A.P., Said-Galiev E.E., Afonicheva O.V., Stakhanov A.I., Mit V.A., Nikolaev A.Yu., Atamanov A.V., Klabukova L.F., Kalinichenko V.A., Topolnitsky O.R., Kassis M., Khokhlov A.R. Frictional behavior of incompatible UHMWPE-PMMA polymer blends obtained in the environment of supercritical dioxide. *Trenie i Iznos*, 2007, vol. 28, no. 3, pp. 288–295. (In Russian).
  36. Nikulin A.V., Savelov A.S., Sachek B.Ya. A comparative analysis of the triboengineering properties of phenolic and epoxy carboplastics. *Journal of Friction and Wear*, 2010, vol. 31, no. 3, pp. 198–202. DOI: 10.3103/S1068366610030074.
  37. Adrianova O.A. *Modified polymeric and elastomeric tribotechnical materials to be used in facilities working in the North*. Doctoral thesis, 2000, 337 p. (In Russian).
  38. Kryzhanovsky V.K., Burlov V.V. *Plastmassovye detali tekhnicheskikh ustroystv (vybor materiala, konstruirovaniye, raschet)* [Plastic Parts of Engineering Devices (material selection, design, calculation)]. SPb, Nauchnye osnovy tekhnologii, 2014, 456 p. (In Russian).
  39. Barvinsky I.A., Barvinskaya I.E. *Spravochnik po litievyim termoplastichnyim materialam. Svoystva, primery primeneniya, pererabotka, torgovye marki, izgotoviteli* [Reference Book on Lithium Thermoplastic Materials. Properties, Applications, Processing, Trademarks, Producers. CD-ROM, version 1.3]. Inzhenernaya Firma AB Universal Publ, 2004. (In Russian).
  40. Okhlopkova A.A., Adrianova O.A., Popov S.N. *Modifikatsiya polimerov ultradispersnyimi soedineniyami* [Modification of Polymers by Ultrafine Compounds]. Yakutsk, YaF Izd-va SO RAN Publ., 2003, 224 p. (In Russian).
  41. Gogoleva O.V., Okhlopkova A.A., Petrova P.N. Development of Self-Lubricating Antifriction Materials Based on Polytetrafluoroethylene and Modified Zeolites. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, no. 5, pp. 383–388. DOI: 10.3103/S1068366614050055.
  42. *Modifitsirovannyye polymernyye i kompozitsionnye materialy dlya severnykh usloviy* [Modified Polymeric and Composite Materials for Northern Conditions]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN Publ., 2017, 217 p. (In Russian).
  43. Gogoleva O.V., Popov S.N., Petrova P.N., Okhlopkova A.A. Structure and properties of composites based on ultrahigh-molecular polyethylene and thermally expanded graphite. *Russian Engineering Research*, 2014, vol. 34, no. 12, pp. 743–746. DOI: 10.3103/S1068798X14120120.

44. Argunova A.G. *Development and investigation of functional composites based on polytetrafluoroethylene and nanostructured aluminum and magnesium oxides*. Candidate thesis, 2012. (In Russian).
45. Petukhova E.S., Savvinova M.E., Krasnikova I.V., Mishakov I.V., Okhlopkova A.A., Dae-Yong Jeong, Jin-Ho Cho. Reinforcement of Polyethylene Pipes with Modified Carbon Microfibers. *Journal of the Korean Chemical Society*, 2016, vol. 60, iss. 3, p. 177–180. DOI: 10.5012/jkcs.2016.60.3.177.
46. Chukov D.I. *Formation of the structure and properties of carbon-fiber-reinforced composite materials based on ultra-high-molecular-weight polyethylene*. Candidate thesis, Moscow, 2013. (In Russian).
47. Gogoleva O.V., Petrova P.N., Popov S.N., Okhlopkova A.A. Wear-resistant composite materials based on ultrahigh molecular weight polyethylene and basalt fibers. *Journal of Friction and Wear*, 2015, vol. 36, no. 4, pp. 301–305. DOI: 10.3103/S1068366615040054.
48. Okhlopkova A.A., Vasil'ev S.V., Petrova P.N., Gogoleva O.V. Frictional basalt-reinforced polymers based on polytetrafluoroethylene. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 4, pp. 285–288. DOI: 10.3103/S1068798X16040134.

Подана в журнал: 31.05.2017  
УДК 678.07:66.018:620.16  
DOI: 10.17804/2410-9908.2017.2.053-065

## АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ И ПАТЕНТНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ МОРОЗОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

П. Н. Петрова\*, О. В. Гоголева, А. Г. Аргунова, А. Л. Федоров

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа СО РАН,  
ул. Автодорожная, 20, Якутск, Российская Федерация*

\*Ответственный автор. Электронная почта: [pavlina@yandex.ru](mailto:pavlina@yandex.ru);  
адрес для переписки: 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, Российская Федерация.  
Телефон: +7 (4112) 35-79-16

В статье проведен анализ научно-технической и патентной информации с целью выбора перспективных полимерных и композиционных материалов для изделий с повышенной надежностью и долговечностью, предназначенных для эксплуатации в зонах Арктики, а также технологий их изготовления, обеспечивающих высокий технический уровень эксплуатационных свойств и конкурентоспособность.

*Ключевые слова: полимер, полимерный композиционный материал, морозостойкость, износостойкость, коэффициент трения.*

### 1. Введение

Исследование и разработка эффективных триботехнических полимерных морозостойких материалов являются – основные пути решения технических проблем, связанных со снижением потерь на трение и износ в машинах и механизмах, в том числе при отрицательных температурах. Вопрос о методе получения полимерных композиционных материалов (ПКМ) с заданным комплексом свойств решается путём одновременного выбора нужных компонентов – наполнителей и соответствующей технологии совмещения компонентов ПКМ (механоактивации, обработки в магнитном и электрическом полях, высокочастотными и импульсными искровыми разрядами и др.).

### 2. Материалы исследования

Современные триботехнические полимерные композиты можно условно разделить на следующие группы: 1) наполненные полимеры; 2) смеси термопластичных полимеров; 3) смеси термопластичных и термореактивных полимеров; 4) металлополимерные материалы; 5) органо-, угле- и стеклопластики; 6) древесно-полимерные композиты.

В последнее время активно ведутся исследования в области разработки ПКМ на основе полиамидов, полиимидов, поликарбонатов, полиакрилатов, полиэпоксидов, политетрафторэтилена, сверхвысокомолекулярного полиэтилена и других полимеров.

### 3. Результаты и обсуждение

Наиболее распространенными материалами являются *полиамиды*, как алифатические, так и ароматические, для наполнения которых используются тальк, мел, силикаты, порошкообразные металлы и их оксиды, оксид и дисульфид молибдена, мелкорубленое стекловолокно, измельченное углеродное волокно (УВ), графит и др. Количество наполнителя, в зависимости от поставленной задачи, может достигать 60 %. Анализ патентной информации показал, что наиболее перспективными модификаторами для разработки ПКМ

на основе полиамидов являются углеродные наполнители-модификаторы различной дисперсности и формы, например, УВ или смесь УВ со стекловолокном, однослойные и многослойные углеродные нанотрубки [1–6], а для модификации ароматического полиамида (фенилона) используют углеродное волокно [7].

*Политетрафторэтилен (ПТФЭ)* в чистом виде применяют редко вследствие низкой прочности, износостойкости и высокой ползучести под нагрузкой. Для повышения прочности и износостойкости (в 100, 1000 раз и более [8]) ПТФЭ модифицируют различными наполнителями, используя кокс, графит, дисульфид молибдена, металлические порошки, оксиды, нитриды, шпинели, цеолиты, слоистые глины, керамики, углеродное, базальтовое, стекловолокно, в количестве от 0,5 до 45 % по массе. Анализ патентов выявил, что наиболее распространенным методом модификации различных марок ПТФЭ является использование различных волокнистых и нанонаполнителей, в том числе в сочетании [8–12]. Эффективным приемом повышения износостойкости (до 5000 раз) является радиационная обработка ПКМ на основе ПТФЭ [13–14].

*Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ)* в ряду полимерных связующих занимает особое место благодаря высокой коррозионной и химической стойкости [15–16]. Для улучшения свойств СВМПЭ его модифицируют нанонаполнителями [17–19], в том числе механоактивированными [20–22], используют облучение композитов пучками заряженных частиц [23–24], метод ионной имплантации [25] и условную химическую модификацию [26].

*Композиты на основе поликарбонатов (ПК)* идеально подходят для работы в условиях низких и сверхнизких температур, вплоть до криогенных. Введение дисульфида молибдена (Эстеран-29, Эстеран-51), графита (ДАК-УП5Д) или 15–20 % фторопласта (ДАК-8) снижает коэффициент трения в 2–3 раза, наполнение ПК стекловолокном и фторопластом (Дифлон) придает изделиям высокие физико-механические и диэлектрические свойства. В статье [27] обсуждаются результаты исследования поведения ПКМ на основе полиарилатов и ПК при трении скольжения со скоростями до 1000 м/с.

Материалы на основе *полиимидов* обладают высокой радиационной и химической стойкостью, хорошими триботехническими свойствами и могут длительно эксплуатироваться при температуре 220–260 °С. Типичными наполнителями для полиимидов служат стеклянные и УВ в производстве сложных пластиков аэрокосмического назначения, работающих при переменной температуре до 400 °С [2].

Для повышения износостойкости и улучшения антифрикционных свойств *полиформальдегид* (ПОМ) наполняют стекловолокном, фторопластом, дисульфидом молибдена, УВ, коксом, сажей, графитом. Анализ патентной информации показал, что полиоксиметилен (полиформальдегид) модифицируют фенольным связующим в сочетании УВ и сухими смазками, или такими полимерами как ПТФЭ и СВМПЭ [28–32].

Для их изготовления композитов на основе смесей термопластичных полимеров часто используются полиамиды, полиацетали, полиолефины, ПТФЭ и др. [33–35]. Лучшие результаты для терморезистивных компонентов получены при использовании полиимидных, кремнийорганических, эпоксидных, фенольных и полиэфирных смол [33, 1].

Органо-, угле- и стеклопластики триботехнического назначения в последние годы все шире используются в тяжелонагруженных узлах трения. Углепластики достаточно широко используются для изготовления подшипников скольжения в судостроении, гидротурбостроении и ряде других отраслей машиностроения [36].

Начался промышленный выпуск новых термостойких (250 °С и выше) термопластов – полисульфонов, полифениленов, полифениленсульфидов, из которых получают ПКМ в виде сложных пластиков на основе стеклянных, асбестовых и углеродных тканей. Однако такие материалы еще не получили широкого применения [2].

Таким образом, номенклатура антифрикционных материалов на основе полимеров постоянно расширяется. Выбор оптимального антифрикционного материала зависит от условий его эксплуатации. Создание новых композиционных материалов на основе полимеров

для самых разнообразных условий эксплуатации должна базироваться на основе анализа накопленных экспериментальных данных и фундаментальных исследований.

Анализ отказов и дефектов техники [37] свидетельствует о том, что полимерные подшипники скольжения, функционирующие в устройствах на открытом воздухе, могут использоваться без смазки, однако в силу низкой морозостойкости (хрупкости) и высокой изнашиваемости они не способны обеспечить надежную и длительную эксплуатацию техники в условиях Севера. Следовательно, при выборе материалов для техники Севера необходимо отдавать предпочтение наиболее морозостойким полимерам. В табл. 1 приведены температурные характеристики наиболее широко применяемых полимерных материалов в узлах трения различного назначения.

Часто применяемыми в узлах трения являются материалы на основе достаточно морозостойких и агрессивостойких полиамидов, однако их применение при повышенных температурах ограничено 80–100 °С, что ограничивает их использование при высоких скоростях скольжения. Кроме того, ПА способны поглощать воду в больших количествах, что приводит к снижению прочностных характеристик и высокой адгезии изделий ко льду, которая вызывает рост усилий страгивания и пусковых износов подшипника [37]. Уплотнения из ПА предназначены для использования в гидравлических цилиндрах, работающих в тяжелых условиях: в цилиндрах с обратно-поступательным ходом поршня (до 1 м/с) при давлении до 50 МПа и температуре от –30 до 110 °С.

Таблица 1 – Температурные характеристики термо- и реактопластов [38]

Композит	Технические характеристики				
	Предел рабочих температур, °С		Температура размягчения по Вика, °С	Теплостойкость по Мартенсу, °С	Температура плавления, °С
	верхний	нижний			
Полиакрилат	160	–	–	208–210	360–400
Полиэфиркетон	250–300	–	–	185–200	360–380
ПА-6	90	–60	190–200	75–76	221–223
ПА-66	80–120	–30	220–240	65–70	254–262
ПА-12	70–80	–60	170	65	178–180
ПФ	90–100	–40	160–165	90	167–172
ПК	115–135	–120	145–160	120–145	220–240
ПЭТФ	150–160	–60	160–180	110	250–265
Эпоксипласт	60–220	–30	–	125–140	–
Стеклотекстолит	130–250	–60	–	160–240	–
Фенопласты	66–120	–60(–40)	–	125–250	–
ПЭВП	70–80	–150(–60)	125–128	–	120–135
ПП	95–110	–50(–5)	–	–	160–168
ПВХ	60–85	–20(–10)	70–85	65–70	165–170
ПТФЭ	250–260	–269	–	110	320–330
ПС	65–70	–40	82–105	70–80	160–175
АБС	75–85	–60	44–50	30–32	165–180
ПВБ	48–75	–	115–120	90–95	160–165

В последнее время широкое применение во многих сферах промышленности получили полимерные материалы на основе полиоксиметилена (ПОМ, полиацеталь). Металлопластиковые подшипники, изготовленные с применением ПОМ способны выдерживать большие нагрузки и скорости скольжения. Допустимые удельные нагрузки для подшипника из компо-

зита ПОМ с оловянной бронзой составляют 120 Н/мм<sup>2</sup> в динамическом режиме и 250 Н/мм<sup>2</sup> в статическом режиме, скорость 2 м/с. Подшипники, изготовленные полностью из ПОМ композита, выдерживают нагрузку до 65 Н/мм<sup>2</sup> при скорости скольжения 1 м/с. Температурный диапазон эксплуатации подшипников ПОМ от –40 °С до 100 °С (125 °С непродолжительно). Температура перехода в стеклообразное состояние приходится примерно на –60 °С, т. е. при низких температурах возможна потеря пластичности. Из ПОМ или его композитов изготавливают опорные кольца в составе уплотнений штока гидроцилиндров, работающих при давлениях от 25 МПа до 50 МПа (зависит от эластомерной составляющей уплотнения) и скоростях 0,5 м/с. Поршневые уплотнения из ПОМ в комбинации с другими материалами способны функционировать при давлениях до 70 МПа. Для направляющих колец из ПОМ возможные скорости до 5 м/с. Температурный диапазон эксплуатации данных изделий производители указывают –30–100(110 °С).

Еще один класс полимерных материалов – материалы на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), который имеет высокие механические характеристики, стойкость к температурным воздействиям и химическую стойкость. Подшипники скольжения, изготовленные из ПЭЭК, способны выдерживать удельные нагрузки до 90 Н/мм<sup>2</sup>, скорости – до 1 м/с в режиме сухого трения и ограниченной смазки.

Технические характеристики рассмотренных полимерных материалов (ПА, ПОМ, ПЭЭК) представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Технические характеристики ПА, ПОМ и ПЭЭК

Технические характеристики	Композит		
	ПА	ПОМ	ПЭЭК
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,06–1,20	1,41	1,30
Предел текучести при растяжении, МПа	25–93	–	–
Прочность при растяжении, МПа		65	100–115
Прочность при сжатии, МПа		100	120–130
Предел текучести при растяжении (влажность 50 %), МПа	20–43	–	–
Модуль упругости при растяжении, МПа	950–4200	–	3700
Модуль упругости при сжатии, МПа			3400
Модуль упругости при растяжении (влажность 50 %), МПа	450–1500		
Коэффициент трения по стали	0,2	0,25–0,32	0,34–0,40
Температурный диапазон эксплуатации, °С	–60–90	–50(–40 для подшипников, –30 для уплотнений) – 100	–60–260

Антифрикционные ПКМ на основе СВМПЭ обладают ценным набором технических характеристик [39] – высокой ударопрочностью (до –180 °С), температурой эксплуатации от –269 до 120 °С, низкой ползучестью и стойкостью к растрескиванию. СВМПЭ используется в качестве уплотнений поршня гидравлического цилиндра в виде компоновки с другими материалами, чаще всего с эластомерами.

К материалам антифрикционного назначения, которые способны функционировать и при криогенных, и при повышенных температурах (от –269 °С до 280 °С) можно отнести материалы на основе ПТФЭ. Из-за исключительной химической инертности ПТФЭ используется при эксплуатации для хранения, транспортировки высоко агрессивных сред. Композиты на основе ПТФЭ перспективно использовать в машиностроении в качестве подшипников и опор скольжения, подвижных уплотнителей – поршневых колец, манжет при высоких скоро-

стях линейного перемещения до 2 м/с для уплотнений штока и до 15 м/с для поршневых колец и давлении 25 МПа. Промышленные марки ПКМ на основе ПТФЭ – Ф4К20 (Ф-4 и 20 % кокса), Ф4С15 (Ф-4 и 15 % стекловолокна) выдерживают давление до 40 МПа при скорости 5 м/с [40]. Технические характеристики промышленно-выпускаемых наполненных композитов на основе ПТФЭ представлены в табл. 3.

Рациональный выбор полимерного материала – необходимое условие повышения надежности и сроков службы изделий в экстремальных условиях. При выборе материала следует учитывать основные критерии: стоимость материала и себестоимость его переработки в изделие; механические, теплофизические свойства; электрические свойства; комплекс специальных требований.

Анализ триботехнических полимерных материалов показал, что наиболее перспективными полимерными матрицами для эксплуатации в условиях Севера являются ПТФЭ, СВМПЭ и полиформальдегид (полиоксиметилен) (ПОМ). Свойства выбранных полимеров представлены в табл. 4.

Таблица 3 – Свойства ПТФЭ и композитов на его основе

Технические характеристики	Композит		
	ПТФЭ	Ф4К20	Ф4С15
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,12–2,20	2,05	2,18
Предел текучести при растяжении, МПа	11,8	14	–
Прочность при растяжении, МПа	14–34	12–15	18–20
Модуль упругости при растяжении, МПа	550	805	520
Модуль упругости при сжатии, МПа	680	1500	480
Коэффициент трения по стали	0,04–0,06	0,27	0,25
Относительная износостойкость	1	600	250
Температурный диапазон эксплуатации, °С	–269–260		

Таблица 4 – Сводная таблица свойств композитов на основе СВМПЭ, ПТФЭ, ПОМ

Композит	Технические характеристики		
	Температура эксплуатации, °С	Предел прочности, МПа	Коэффициент трения по стали
СВМПЭ	–200...+70	45	0,25
ПТФЭ	–200...+300	25–30	0,15
ПОМ	–100...+100	75	0,25

Для получения ПКМ с необходимым уровнем свойств проводят их модификацию – комплекс методов направленного регулирования их структуры и свойств путем введения в композиции различных целевых добавок – наполнителей. К наполнителям предъявляются следующие требования: высокий уровень физико-механических свойств, низкое водопоглощение, хорошая смачиваемость, отсутствие вредных примесей, низкая стоимость, высокая химическая стойкость и термостойкость, негорючесть, доступность придания заданной формы и размеров частиц, хорошая диспергируемость, смешиваемость с полимером, сохранение свойств при хранении, переработке и эксплуатации.

При производстве пластических масс наиболее широкое применение находят минеральные наполнители, составляющие примерно 80 % мирового рынка, например, природные нанослоистые глины (вермикулит, серпентинит, бентонит, каолин), цеолит, терморасширен-

ный графит, нитрид бора, дисульфид молибдена, сиалон [41–44]. Существенная часть рынка представлена нанокompозитами с использованием в качестве наполнителей нанопорошков, нановолокон и нанотрубок (шпинели магния, оксиды алюминия, углеродные нанотрубки) с размерами частиц от 1 до 100 нм [45–47]. Существенное улучшение эксплуатационных показателей можно достичь даже при микромодифицировании исходной полимерной матрицы в количестве от 0,05–0,5 мас. %. Волокнистые наполнители (стекловолокна, углеволокна, хлопчатобумажные, базальтовые и синтетические волокна, а также отходы их производства), в зависимости от длины и дисперсности могут проявлять свойства как близкие к дисперсным материалам, так и усиливающие (армирующие). Оптимальная концентрация свойств рубленых волокнистых наполнителей приходится на 40–50 % [48].

Эффективным способом модификации свойств полимерных материалов является использование в качестве полимерной матрицы смесей различных полимеров. Путем планомерного подбора разных полимеров, а также различных модификаторов можно получить композиционные материалы с совершенно новыми свойствами, что невозможно достигнуть при использовании одного полимера, например, сочетание таких противоречивых свойств материала, как с одной стороны, морозостойкость, а с другой – прочность, износостойкость, агрессивностойкость.

#### 4. Заключение

Полимерные материалы, предназначенные для узлов трения, а также в качестве уплотнений техники, эксплуатирующейся в условиях холодного климата, должны иметь высокую морозостойкость до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , повышенную износостойкость и удовлетворительные антифрикционные свойства, низкую адгезию ко льду, исключающую возможность когезионного разрушения контактирующих материалов. Перспективными полимерами для разработки морозостойких агрессивностойких композитов являются политетрафторэтилен, сверхвысокомолекулярный полиэтилен и полиоксиметилен. Для соответствия техническим требованиям для эксплуатации в условиях Севера необходимы исследования по их модификации волокнистыми и дисперсными наполнителями с целью повышения деформационно-прочностных и триботехнических характеристик полимерных композитов в широком диапазоне нагрузок, скоростей и температур.

#### Литература

1. Материалы антифрикционного назначения на основе полиамидного связующего / В. Г. Савкин, В. В. Биран, А. И. Волжин, А. П. Солнцев // Пластмассы. – 1986. – № 4. – С. 15–17.
2. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, М. Ю. Байбарацкая, О. А. Мамаев. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – 262 с.
3. Стукач А. В., Киреенко О. Ф., Фадин Ю. А. Взаимосвязь триботехнических и тепловых характеристик для наполненного полиамида // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, № 5. – С. 539–541.
4. Process for preparing carbon fiber-reinforced polyamide resins : pat. US3882077 / Hitoshi Takita, Katsuo Take. – No. 408,880 ; filed 23.10.73 ; publ. 06.05.75.
5. Вкладыш трения поглощающего аппарата автосцепки железнодорожного транспорта и вагонов метро из композиционного полимерного антифрикционного материала : пат. 2595135 Рос. Федерация / Моторин С. В. – Бюл. № 23. – 2016.
6. Опорное кольцо поглощающего аппарата автосцепки железнодорожного транспорта и вагонов метро из композиционного полимерного антифрикционного материала на основе полиамида : пат. 2581889 Рос. Федерация / Моторин С. В. – Бюл. № 11. – 2016.
7. Буря А. И., Козлов Г. В. Механизмы изнашивания углепластиков на основе фенолона: структурная трактовка // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 3. – С. 321–324.

8. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Суриков В. И., Калистратова Л. Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. – М. : Машиностроение, 2005. – 240 с.: ил.
9. Tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric composite in vacuum / Dapeng Gu, Changsheng Duan, Bingli Fan, Suwen Chen, Yulin Yang // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 103. – P. 423–431. – DOI: 10.1016/j.triboint.2016.08.004.
10. Ultrasonication-Induced Changes in Physicomechanical and Tribotechnical Properties of PTFE Composites / A. G. Argunova, P. N. Petrova, A. A. Okhlopkova, N. V. Shadrinov, O. V. Gogoleva, Jin-Ho Cho // *Journal of the Korean Chemical Society*. – 2015. – Vol. 59, no. 3. – P. 233–237. – URL: <http://dx.doi.org/10.5012/>.
11. Петрова П. Н., Федоров А. Л. Разработка полимерных композитов на основе политетрафторэтилена с повышенной износостойкостью для узлов сухого трения // *Вестник машиностроения*. – 2010. – № 9. – С. 50–53.
12. Tribological Characterization of a Self Lubricating PTFE Under Lubricated Conditions / K. Vohra, A. Anand, M.I. Ul Haq, A. Raina, M.F. Wani // *MATERIALS FOCUS*. – 2016. – Vol. 5, no. 3. – P. 293–295. – DOI: 10.1166/mat.2016.1324.
13. Ревина И. В. Технологические возможности повышения качества деталей узлов трения // *Вестник ВСГУТУ*. – 2012. – № 4 (39). – С. 53–58.
14. Игнатьева Л. Н., Адаменко Н. А., Агафонова Г. В. Влияние взрывной обработки на строение и свойства политетрафторэтилена // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. – 2013. – № 5 (171). – С. 44–52.
15. Hu Z. S., Dong J. H., Chen G. X. Study on anti-wear and reducing friction additive of nanometer ferric oxide // *Tribol. Intern.* – 1998. – Vol. 31, no. 7. – P. 355–360. – DOI: 10.1016/S0301-679X(98)00042-5.
16. Трение нанокompозитов серебросодержащего СВМПЭ / А. П. Краснов, В. А. Мить, О. В. Афоничева, Э. Е. Саид-Галиев, А. Ю. Николаев, А. Ю. Васильков, В. Л. Подшибихин, А. Ю. Наумкин, И. О. Волков // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – Т. 57, № 1. – С. 161–169.
17. Tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) filled with copper micro-powder / Y. Ma, H. Wang, B. Bhushan, G. Pei, H. Wang, J. Tong, C. Menon // *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*. – 2017. – Vol. 48, no. 2. – P. 139–150. – DOI: 10.1002/mawe.201700547.
18. Охлопкова А. А., Шиц Е. Ю., Гоголева О. В. ПКМ триботехнического назначения на основе СВМПЭ и ультрадисперсных соединений // *Трение и износ*. – 2004. – Т. 25, № 2. – С. 202–206.
19. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования / Г. Е. Селютин, Ю. Ю. Гаврилов, Е. Н. Воскресенская, В. А. Захаров, В. Е. Никитин, В. А. Полубояров // *Химия в интересах устойчивого развития*. – 2010. – Т. 18. – С. 375–388.
20. Increasing tribotechnical properties of UHMW-PE based composite materials with nanomodifiers by mechanical and chemical modification and surface irradiation / S. V. Panin, S. Wannasri, T. Pouvadin, L. R. Ivanova, L. A. Kornienko, S. V. Sergeev, A. G. Tkachev, T. V. Fedorova // III International Conference “Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies”, Novosibirsk, 2009 : abstracts. – Novosibirsk : NGU. – P. 58.
21. Возможности метода механохимических воздействий для приготовления нанодисперсий и модифицирования ими полимеров, металлов, а также для создания керамических материалов / В. А. Полубояров, Г. Е. Селютин, З. А. Коротаева, Ю. Ю. Гаврилов // *Перспективные материалы*. – 2008. – № 6. – С. 86–90.
22. Crystal Structure Evolution of UHMWPE/HDPE Blend Fibers Prepared by Melt Spinning / Fei Wang, Lichao Liu, Ping Xue, Mingyin Jia // *Polymers*. – 2017. – Vol. 9, no. 3. – P. 96. – DOI: 10.3390/polym9030096.
23. Влияние механической активации, ионной имплантации и типа наполнителей на формирование пленки переноса при трибосопряжении композитов на основе СВМПЭ / С. В. Панин,

- Л. А. Корниенко, С. Ваннасри, С. Пирияон, Т. Пувадин, Л. Р. Иванова, С. В. Шилько, С. В. Сергеев // *Механика композитных материалов*. – 2011. – Т. 47, № 5. – С. 727–738.
24. Analyses of products diffused into UHMWPE prosthetic components in vivo / L. Costa, P. Bracco, E. Brach del Prever, M. P. Luda, L. Trossarelli // *Biomaterials*. – 2001. – Т. 22, № 14. – P. 307–315. – DOI: 10.1016/S0142-9612(00)00182-4.
25. Design of Polymeric UHMWPE-based composite with increased Tribotechnical properties by Mechanical activation, ion implantation, Chemical modification and Nanofiller enforcement / S. V. Panin, L. A. Kornienko, L. R. Ivanova, S. Piriyaon, T. Poowadin, T. Mandoung, N. Sarondjaitam, S. V. Shilko, Victor Petrovich Sergeev // 3rd International Conference on heterogeneous material mechanics (ICHMM-2011), May 22–26, 2011, Shanghai (Chong Ming Island) : proceedings. – China, Shanghai. – P. 612–615.
26. Antifrictional composites based on chemically modified UHMWPE. Part 2. The effect of nanofillers on the mechanical and triboengineering properties of chemically modified UHMWPE / S. V. Panin, L. A. Kornienko, S. Piriyaon, L. R. Ivanova, S. V. Shil'ko, Yu. M. Pleskachevskii, V. M. Orlov // *Journal of Friction and Wear*. – 2011. – Vol. 32, no. 4. – P. 233–239. – DOI: 10.3103/S106836661104009X.
27. Sviridenok A. I., Meshkov V. V. High-speed sliding friction of polymer composites // *Trenie i Iznos*. – 2005. – Vol. 26, no. 1. – P. 32–36.
28. Перспективы применения суперконструкционных термопластов для подшипников скольжения центробежных насосов / А. В. Анисимов, В. Е. Бахарева, Г. С. Карпинский, И. В. Лишевич, И. В. Никитина // *Насосы. Турбины. Системы*. – 2014. – № 3 (12). – С. 3–13.
29. Полимерные композиционные материалы / С. Л. Баженов, А. А. Берлин, А. А. Кульков, В. Г. Ошмян. – Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 352 с.
30. Ричардсон М. Промышленные полимерные композиционные материалы / под ред. П. Г. Бабаевского. – М. : Химия, 1980. – 472 с.
31. Антифрикционный композиционный полимерный материал : пат. 2524958 Рос. Федерация / Юрханов В. Б., Шаврин Е. Г., Дариенко И. Н., Чистяков П. А., Матасова А. А., открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – № 2013111444/04 ; заявл. 14.03.2013 ; опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22.
32. Plain bearing material comprising PTFE and chalk and composite multi-layer material : pat. US 5686176 A / Achim Adam, Jurgen Deinert. – US 08/519,498.
33. Коляго Г. Г., Струк В. А. Материалы на основе ненасыщенных полиэфиров. – М. : Наука и техника, 1990. – 144 с.
34. Bogdanovich S. P., Pesetskiy S. S. The metal counterbody effect on triboengineering properties of compatibilized polyamide 6-polyethylene blend: mass transfer analysis // *Trenie i iznos*. – 2004. – Vol. 25, no. 5. – P. 531–538.
35. Поведение при трении смесей несовместимых полимеров сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полиметилметакрилата, полученных в среде сверхкритического диоксида углерода / А. П. Краснов, Э. Е. Саид-Галиев, О. В. Афоничева, А. И. Стаханов, В. А. Мить, А. Ю. Николаев, А. В. Атаманов, Л. Ф. Клабукова, В. А. Калининченко, О. Р. Топольницкий, М. Кассис, А. Р. Хохлов // *Трение и износ*. – 2007. – Т. 28, № 3. – С. 288–295.
36. Nikulin A. V., Savelov A. S., Sachek B. Ya. A comparative analysis of the triboengineering properties of phenolic and epoxy carboplastics // *Journal of Friction and Wear*. – 2010. – Vol. 31, no. 3. – P. 198–202. – DOI: 10.3103/S1068366610030074.
37. Адрианова О. А. Модифицированные полимерные и эластомерные триботехнические материалы для техники Севера : дисс. ... докт. техн. наук : 05.02.01. – Москва, 2000. – 337 с.
38. Крыжановский В. К., Бурлов В. В. Пластмассовые детали технических устройств (выбор материала, конструирование, расчет). – СПб. : Научные основы технологии, 2014. – 456 с.

39. Барвинский И. А., Барвинская И. Е. Справочник по литьевым термопластичным материалам. Свойства, примеры применения, переработка, торговые марки, изготовители. – 1 CD-ROM. Версия 1.3. – Инженерная фирма «АБ Универсал». – 2004.
40. Охлопкова А. А., Адрианова О. А., Попов С. Н. Модификация полимеров ультратонкими соединениями. – Якутск : ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. – 224 с.
41. Gogoleva O. V., Okhlopkova A. A., Petrova P. N. Development of Self-Lubricating Anti-friction Materials Based on Polytetrafluoroethylene and Modified Zeolites // *Journal of Friction and Wear*. – 2014. – Vol. 35, no. 5. – P. 383–388. – DOI: 10.3103/S1068366614050055.
42. Модифицированные полимерные и композиционные материалы для северных условий. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 217 с.
43. Structure and properties of composites based on ultrahigh-molecular polyethylene and thermally expanded graphite / O. V. Gogoleva, S. N. Popov, P. N. Petrova, A. A. Okhlopkova // *Russian Engineering Research*. – 2014. – Vol. 34, no. 12. – P. 743–746. – DOI: 10.3103/S1068798X14120120.
44. Аргунова (Парникова) А. Г. Разработка и исследование функциональных композитов на основе политетрафторэтилена и наноструктурных оксидов алюминия и магния : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.16.09. – Комсомольск-на-Амуре, 2012. – 20 с.
45. Reinforcement of Polyethylene Pipes with Modified Carbon Microfibers / E. S. Petukhova, M. E. Savvinova, I. V. Krasnikova, I. V. Mishakov, A. A. Okhlopkova, Jeong Dae-Yong, Cho Jin-Ho // *Journal of the Korean Chemical Society*. – 2016. – Vol. 60, iss. 3. – P. 177–180. – DOI: 10.5012/jkcs.2016.60.3.177.
46. Чуков Д. И. Формирование структуры и свойства композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, армированных углеродными волокнами : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.16.06. – Москва, 2013. – 20 с.
47. Wear-resistant composite materials based on ultrahigh molecular weight polyethylene and basalt fibers / O. V. Gogoleva, P. N. Petrova, S. N. Popov, A. A. Okhlopkova // *Journal of Friction and Wear*. – 2015. – Vol. 36, no. 4. – P. 301–305. – DOI: 10.3103/S1068366615040054.
48. Frictional basalt-reinforced polymers based on polytetrafluoroethylene / A. A. Okhlopkova, S. V. Vasil'ev, P. N. Petrova, O. V. Gogoleva // *Russian Engineering Research*. – 2016. – Vol. 36, no. 4. – P. 285–288. – DOI: 10.3103/S1068798X16040134.