

УДК 678.073:661.481

## РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА<sup>1</sup>

Охлопкова А.А.<sup>1,2</sup>, Васильев С.В.<sup>1</sup>, Гоголева О.В.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

<sup>2</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск  
e-mail: \*oli-gogoleva@yandex.ru

**Аннотация.** Приведены результаты исследований по разработке износостойких полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и базальтового волокна. Исследованы физико-механические и триботехнические свойства полимерного композиционного материала на основе ПТФЭ, содержащего базальтовое волокно. Показано повышение износостойкости композитов по сравнению с фторопластовыми материалами, содержащими углеродное волокно. Разработаны перспективные полимерные композиты для повышения надежности, безопасности и эффективности эксплуатации транспортной техники и технологического оборудования нефте-, газодобывающей промышленности.

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен (ПТФЭ), полимерный композиционный материал (ПКМ), трение, базальтовое волокно, износостойкость, коэффициент трения

### Введение

В настоящее время увеличивается доля полимерных композиционных материалов, используемых в узлах трения технологического, горнодобывающего оборудования и огромного парка карьерной техники. Исследования, проведенные ранее, были направлены на разработку герметизирующих полимерных материалов [1]. В то время как наиболее уязвимым звеном при эксплуатации техники, остаются подшипники скольжения. Отечественной промышленностью выпускается совершенно малый ассортимент полимерных подшипниковых материалов, способных эксплуатироваться при низких температурах. Одним из перспективных способов создания триботехнических материалов является введение волокнистых наполнителей в полимеры, характеризующиеся повышенной морозостойкостью [2]. Волокнистые наполнители придают полимерам высокие несущую способность, прочность, жесткость, химическую стойкость [5]. Изучение закономерностей влияния базальтовых волокон на процессы формирования композитов, их свойства позволит управлять их служебными характеристиками. В связи с этим развитие исследований по разработке триботехнических материалов с максимально улучшенным комплексом физико-механических и трибологических свойств,

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №09-03-98502-р\_восток\_a).

создание новых конструкций уплотнительных устройств, обеспечивающих необходимый ресурс и работоспособность техники и технологического оборудования в экстремальных климатических условиях, является одним из актуальных направлений полимерного материаловедения.

### ***Методики и объекты исследования***

Объектами исследования являются политетрафторэтилен (ГОСТ 10007-80), и композиты на его основе, армированные базальтовым волокном диаметром 7-10 мкм и длиной не менее 30-90 мм.

Композиты получали сухим смешением навесок компонентов в высокоскоростном лопастном смесителе. Образцы композитов для физико-механических, триботехнических и структурных исследований получали по технологии холодного прессования с последующим спеканием.

Физико-механические свойства – предел прочности при растяжении ( $\sigma_p$ ) и относительное удлинение при разрыве ( $\epsilon_p$ ) определяли на разрывной машине “Инстрон” при скорости движения подвижных захватов 100 мм/мин. Скорость массового изнашивания и коэффициент трения полимерных композитов определяли на машине трения СМЦ-1 (схема трения «вал-втулка» при контактном давлении 0,45 МПа, скорости скольжения 0,39 м/с, контртело- стальной вал из стали 45 с твердостью 45-50 HRC и шероховатостью  $R_a = 0,06-0,07$  мкм). Скорость изнашивания оценивали по потере массы образцов в единицу времени. Момент трения фиксировали с помощью бесконтактного индуктивного датчика, подающего электрические сигналы на цифровой милливольтметр, который показывает и записывает величину измеряемого момента трения в процессе испытания образцов и рассчитывали коэффициент трения. Температуру в зоне контакта ПКМ - стальное контртело определяли термопарой, закрепленной в полимерной втулке на расстоянии 1 мм от поверхности трения. При оценке скорости изнашивания ПКМ среднеквадратичная ошибка определялась погрешностями измерения массы, скорости и длительности трения и не превышала 5 %.

Исследование надмолекулярной структуры разработанных материалов проводили на атомно-силовом микроскопе NTEGRA, растровом электронном микроскопе JSM-6480LV фирмы JEOL (Япония). Токопроводящую пленку на поверхность образцов наносили вакуумным напылением углерода. Изображения получали во вторичных электронах.

### ***Обсуждение результатов исследований.***

Исследованные полимерные композиционные материалы представляют собой гетерогенную систему, состоящую из непрерывной фазы (полимерная матрица) и армирующего волокна (наполнителя). Среди армированных волокнами

полимерных композитов особое место занимают углепластики, содержащие непрерывное углеродное волокно или полученное из него штапельное.

Ранее нами было показано [2,5], что введение в ПТФЭ активированных углеродных волокон (УВ) в сочетании с наносоединениями (наношпинель магния - НШ) положительно сказывается на его свойствах (рис.1). Установлено, что с увеличением концентрации УВ происходит снижение плотности и увеличение прочности ПКМ в 3,5 раза, износостойкости в 250-350 раз по сравнению с исходным ПТФЭ, что объяснялось участием волокон в ориентационных процессах при трении и трансформацией структуры поверхностей трения в зависимости от нагрузки.

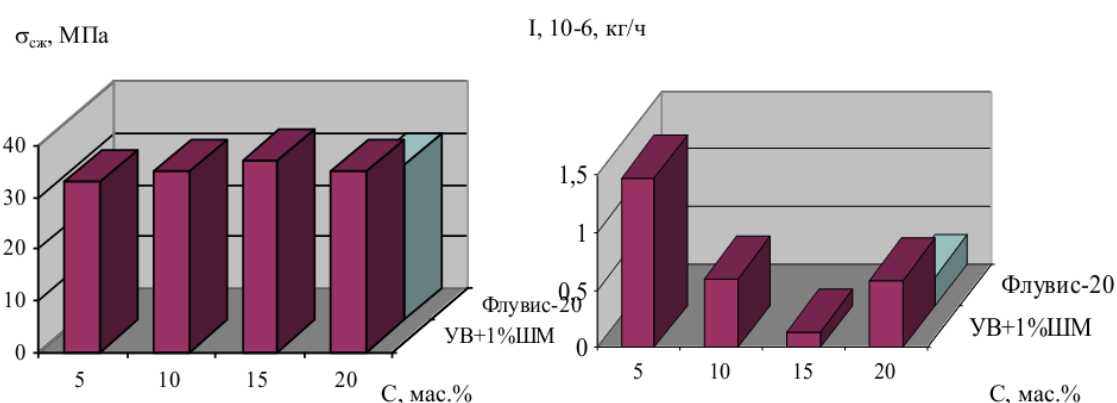


Рис. 1. Зависимость:  
а) прочности при сжатии;  
б) скорости массового изнашивания от содержания углеродного волокна

Применение базальтового волокна (БВ) может быть аналогичным применению УВ. В качестве критериев эффективности применения БВ, как армирующих компонентов композитов, нами приняты высокая прочность волокон и ее сохранение после термообработки в течение 1 ч при температуре 400 °С. Обеспечение заданного уровня прочностных свойств при длительной эксплуатации изделий из полимерных композитов в интервале температур 200 - 400 °С является актуальной задачей аэрокосмической, радиоэлектронной, электротехнической и других отраслей техники.

Анализ полученных результатов (табл. 1) свидетельствует, что введение в ПТФЭ БВ положительно сказывается на его прочностных свойствах.

Оптимальный комплекс свойств достигается при 5 масс. % содержании базальтового волокна. При этом износостойкость повышается до 500 раз по сравнению с ненаполненным ПТФЭ, прочность и эластичность остаются на уровне ненаполненного ПТФЭ. Это обусловлено эффектом армирования полимерной матрицы базальтовым волокном.

Таблица 1. Физико-механические и триботехнические характеристики базальтофторопластовых композитов

Состав ПКМ	$\epsilon_p$ , %	$\sigma_p$ , МПа	I, мг/ч
ПТФЭ	295-305	19-21	156
ПТФЭ+0,1 мас.% БВ	310 -320	20-22	8,9-9,0
ПТФЭ+0,5 мас.% БВ	305-315	21-23	6,5-9,9
ПТФЭ+1 мас.% БВ	375-385	19-21	4,0-4,1
ПТФЭ+2 мас.% БВ	315-325	20-22	1,7-2,8
ПТФЭ+5 мас.% БВ	290-300	20-22	0,28-0,38
ПТФЭ+5 мас.% УВ	95-105	12-14	1,4-1,5

Примечание:  $\epsilon_p$  – относительное удлинение при разрыве, %;  $\sigma_p$  – предел прочности при растяжении, МПа; I – скорость массового изнашивания при нагрузке 0,45 МПа, мг/ч

Показано, что композиты, содержащие БВ, характеризуются более высокими физико-механическими, триботехническими показателями по сравнению с фторопластами, модифицированными УВ: относительное удлинение возросло в 3 раза, прочность – в 1,5 раза, износостойкость – в 2 раза.

Классическим критерием оценки работоспособности подшипниковых материалов является PV фактор (произведение удельной нагрузки на скорость скольжения), характеризующий предельно допустимые нагрузочно-скоростные режимы эксплуатации изделий [3]. В связи с этим, в работе исследована нагрузочная способность разработанных композитов, и на их основе рассчитаны значения PV-фактора с целью определения их возможного применения в различных узлах трения машин и приборов (рис. 2).

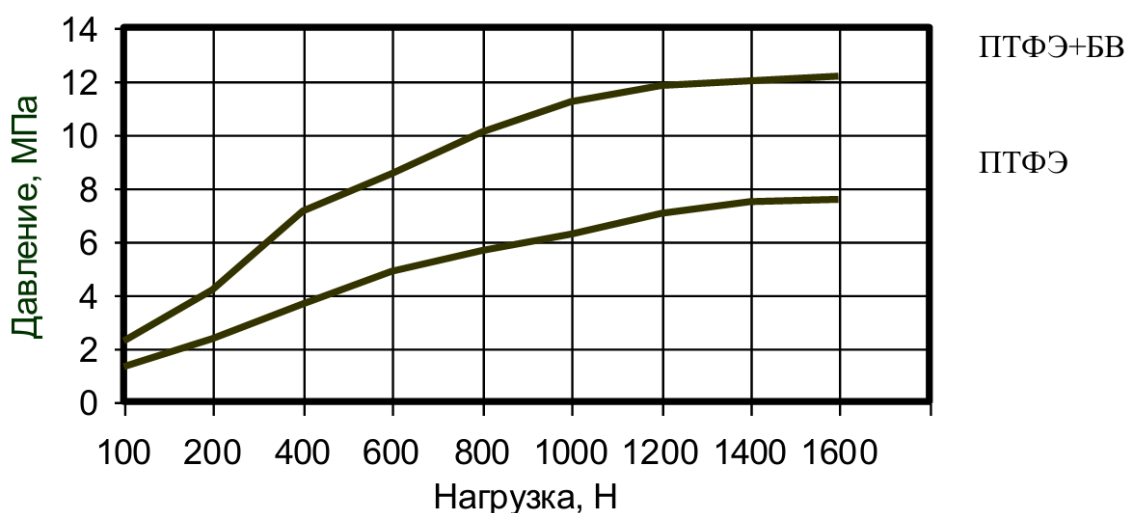


Рис. 2. Зависимости нагрузочной способности ПКМ от нагрузки

Установлено, что при повышении нагрузки сначала происходит увеличение нагрузочной способности ( $P_e$ ), затем при возрастании прилагаемой нагрузки от 1200 до 1600 Н наблюдается стабилизация  $P_e$  для ненаполненного ПТФЭ.

При модификации ПТФЭ базальтовым волокном повышаются допустимые значения нагрузки до ~12 МПа, что можно объяснить структурной модификацией ПТФЭ, наполненного БВ, не только в объеме материала, но и на поверхностях трения.

На основании результатов трибологических испытаний по нагрузочной способности при скоростях скольжения от 0,39 до 1 м/с и нагрузках от 0,1 до 14 МПа установлено, что разработанные полимерные композиты обладают достаточно стабильными трибологическими свойствами в условиях исследованных нагрузок, скоростей и температур, что объясняется в основном образованием на поверхностях трения пленок фрикционного переноса.

Таким образом, путем модификации ПТФЭ базальтовым волокном повысили значения фактора  $PV$  для полимерных композитов до 12 МПа\*м/с. Это приведет к повышению работоспособности деталей узлов трения из разработанных материалов в 1,5-2 раза.

Для установления влияния наполнителей на процессы структурообразования в ПТФЭ и, соответственно, на характер изменения свойств, методом электронной микроскопии проведены структурные исследования.

Структура в объеме материала исследована методом электронной микроскопии (рис.3). Видно, что БВ распределены в полимерной матрице хаотично, в основном в дефектных областях. Тем не менее, структура композита характеризуется формированием кристаллитов, не свойственных для исходного ПТФЭ. Это можно объяснить кристаллизацией полимера на поверхностях волокон.

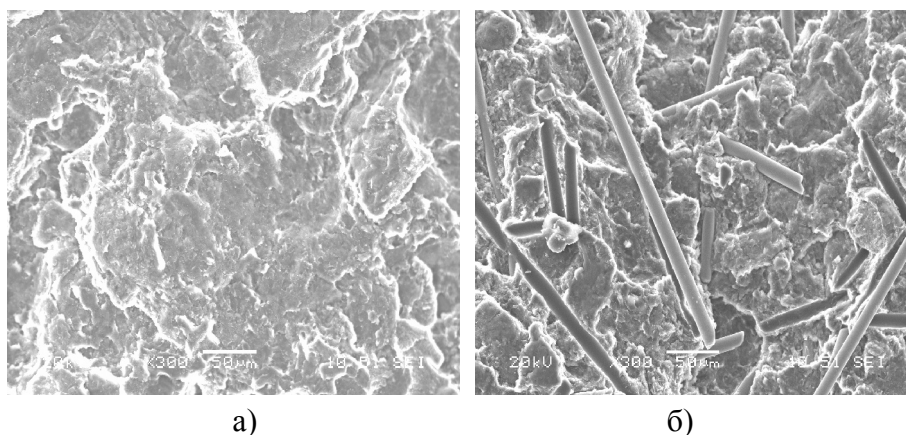


Рис. 3. Структура ПКМ в объеме материала:  
а) ПТФЭ б) ПТФЭ+5% БВ (x300 раз)

Методом атомно-силовой микроскопии исследованы микрорельеф и морфология поверхностей трения (рис. 4). Видно, что микрогеометрическая развитость поверхности полимерного композита возрастает при введении в ПТФЭ БВ.

Волокна, распределенные в матрице хаотично, при трении локализуются на поверхности трения, формируя выступы и рельефность поверхности.

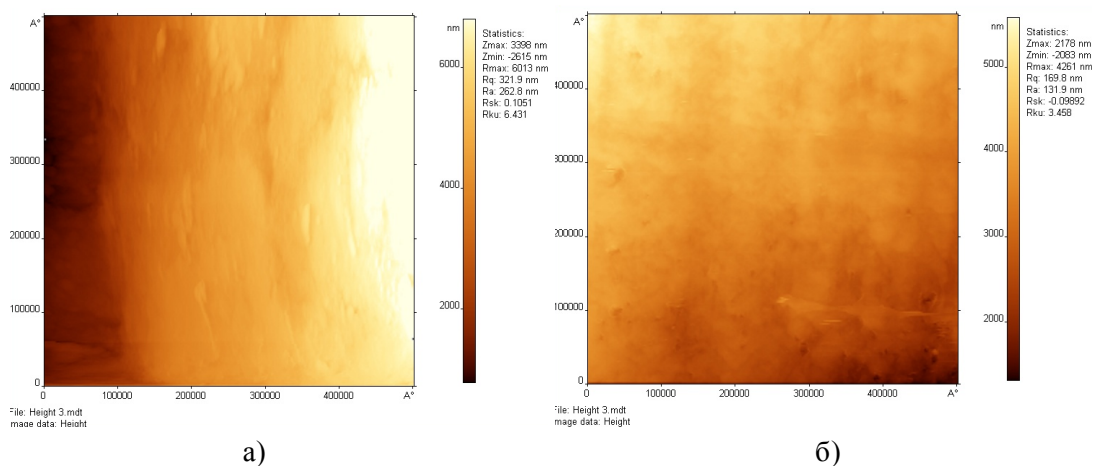


Рис. 4. Рельеф поверхности трения ПКМ, полученный методом АСМ:  
а) до трения; б) после трения

Зарегистрировано снижение коэффициента трения композита до 1,5 раз, что, вероятно, можно объяснить уменьшением площади контакта с металлической поверхностью контртела за счет выступающих из полимерной матрицы волокон.

При увеличении концентрации БВ до 5 мас. % наблюдается существенное сглаживание микрорельефа поверхности композита. Среднеквадратичная и средняя шероховатость поверхности трения ПТФЭ при модифицировании БВ уменьшилась в 2-3 раза. Это, видимо, один из важных вкладов в общее снижение коэффициента трения, т.к. при уменьшении шероховатости удельные давления в областях контакта уменьшаются. В случае использования в качестве наполнителя полимера базальтового волокна дополнительный эффект снижения сил трения обеспечивает упругая деформация базальтовых волокон, выступающих на поверхности трения, и реализующих эффект трения «волосяной щетки» [4].

### Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований показано, что использование базальтовых волокон в качестве наполнителей ПТФЭ способствует повышению деформационно-прочностных показателей, снижению скорости массового изнашивания. Разработанные материалы характеризуются стабильными и низкими значениями коэффициента трения и интенсивности изнашивания, высокой несущей способностью. Использование подобных материалов позволит многократно повысить ресурс узлов трения, а также решить проблему импортозамещения штатных уплотнений и подшипников.

На основании проведенных лабораторных и опытных исследований с применением стандартизированных методик и оборудований при различных режимах трения, разработанные полимерные композиты на основе ПТФЭ можно рекомендовать для изготовления подшипников скольжения (втулок, вкладышей), мелкокомодульных зубчатых колес и направляющих скольжения, в качестве уплотнительных элементов транспортной техники при максимально допустимом значении фактора  $PV \leq 12 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$ .

### Литература

1. Охлопкова А.А., Виноградов А.В., Пинчук Л.С. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями. Гомель: ИММС НАНБ. 1999. 164 с.
2. Стручкова (Ючюгяева) Т.С. Триботехнические материалы на основе ПТФЭ и углеродных наполнителей // Тр. XIII межд. научной конф. студентов, аспирантов и мол. ученых "Ломоносов". Москва. 2006. С. 482 - 483
3. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А.. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. 262 с.
4. Охлопкова А.А., Петрова П.Н., Парникова А.Г. Влияние структуры нанокompозитов на основе политетрафторэтилена на триботехнические характеристики // Трение и износ. 2009. Том 30. № 6. С. 580 - 586.
5. Охлопкова А.А., Стручкова Т.С. Триботехнические материалы на основе политетрафторэтилена, модифицированного углеродными волокнами и шпинелями магния // Поликомтриб - 2009: Тезисы докладов междунар. научно-технической конференции. Гомель, 2009. 220 с.

## DEVELOPMENT OF FLUOROPLAST COMPOSITES CONTAINING BAZALT FIBER

A.A. Okhlopkova<sup>1,2</sup>, S.V. Vasilev<sup>1</sup>, O.V. Gogoleva<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Oil and Gas Problems  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia*

<sup>2</sup> *North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia  
e-mail: \*oli-gogoleva@yandex.ru*

**Abstract.** *In the given work results of researches on development of wear resistant polymeric composite materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) are resulted. Tribotechnical properties of PTFE containing basalt fiber are investigated. Rising of wear resistance of composites in comparison with fluoroplast materials containing carbon fiber is shown. New materials with high mechanical and tribotechnical characteristics for knots of friction for various applications are developed.*

**Keywords:** *polytetrafluoroethylene (PTFE), polymer composite material (PCM), friction, basalt fiber, polymer, wear resistance*

### References

1. Okhlopkova A.A., Vinogradov A.V., Pinchuk L.S. Plastiki, napolnennye ul'tradispersnymi neorganicheskimi soedineniyami (Plastics filled with ultradisperse inorganic compounds). Gomel': IMMS NANB. 1999. 164 p.
2. Struchkova (Yuchyugyaeva) T.S. Tribotekhnicheskie materialy na osnove PTFE i uglerodnykh napolnitelei (Tribological materials based on PTFE and carbon fillers), *Tr. XIII mezhd. nauchnoi konf. studentov, aspirantov i mol. uchenykh "Lomonosov"* (Proceedings of XIII International conference for undergraduate and postgraduate students and young scientists "Lomonosov-2006"). Moscow, 2006. PP. 482 - 483
3. Mashkov Yu.K., Ovchar Yu.K., Baibaratskaya M.Yu., Mamaev O.A. Polimernye kompozitsionnye materialy v tribotekhnike (Polymer composite materials in tribotechnology). Moscow: Nedra-Biznestsentr Ltd., 2004. 262 p.
4. Okhlopkova A.A., Petrova P.N., Parnikova A.G. Influence of the structure of polytetrafluoroethylene-based nanocomposites on their tribotechnical characteristics, *Journal of Friction and Wear*, Vol. 30, Number 6, pp. 425-430, doi: 10.3103/S1068366609060099 (Transl. from Okhlopkova A.A., Petrova P.N., Parnikova A.G. Vliyanie struktury nanokompozitov na osnove politetraftoretilena na tribotekhnicheskie kharakteristiki, *Trenie i Iznos*, 2009, Vol. 30, No. 6, pp. 580 - 586.).
5. Okhlopkova A.A., Struchkova T.S. Tribotekhnicheskie materialy na osnove politetraftoretilena, modifitsirovannogo uglerodnymi voloknami i shpinelyami magniy (Tribological materials based on polytetrafluoroethylene modified with carbon fiber and magnesium spinels), *Polikomtrib - 2009: Tezisy dokladov mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Abstracts of the intern. sci.-tech. conf. "Polikomtrib - 2009")*. Gomel, 2009. 220 p.