

УДК 678.743.41:620.17:677.494
DOI 10.62595/1819-5245-2025-2-41-55

ОБЗОР КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ДИСПЕРСНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. Л. БАШЛАКОВА, Л. Ф. ИВАНОВ

*Государственное научное учреждение «Институт
механики металлополимерных систем имени В. А. Белого
НАН Беларуси», г. Гомель*

Представлены результаты исследования полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) с использованием модифицированных углеродных волокон. Отмечены преимущества и недостатки фторопластов, а также эффективные наполнители для создания антифрикционных композитов. Показана роль модифицированных углеродных волокнистых наполнителей в улучшении структуры и свойств фторопластовых композитов. Изучено влияние дисперсных наполнителей на формирование структуры композита в зависимости от их содержания. Раскрыто, что актуальной задачей является разработка материала, обладающего прочностью и коэффициентом трения, сопоставимыми с высоконаполненными композитами, но способного к высокоэластичной деформации, обеспечивающей герметичность уплотнительных элементов узлов трения. Указано, что такие материалы особенно востребованы в узлах, где ранее применялся чистый ПТФЭ, но его износостойкость оказывалась недостаточной.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, углеволокнистый наполнитель, композиционный материал, машиностроение, углеродные волокна, полимерная цепь, фторполимер.

Для цитирования. Башлакова, А. Л. Обзор композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и дисперсных волокнистых наполнителей для изделий машиностроительного назначения / А. Л. Башлакова, Л. Ф. Иванов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 2 (101). – С. 41–55. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-2-41-55

REVIEW OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYTETRAFLUOROETHYLENE AND DISPERSED FIBROUS FILLERS FOR ENGINEERING PRODUCTS

A. L. BASHLAKOVA, L. F. IVANOV

*V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute
of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel*

The article presents the results of a study of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) using modified carbon fibers. The advantages and disadvantages of fluoroplastics, as well as effective fillers for creating antifriction composites, are noted. The role of modified carbon fiber fillers in improving the structure and properties of fluoroplastic composites is shown. The influence of dispersed fillers on the formation of the composite structure depending on their content is studied. It is revealed that an urgent task is to develop a material with strength and friction coefficient comparable to highly filled composites, but capable of highly elastic deformation, ensuring the tightness of the sealing elements of friction units. It is indicated that such materials are especially in demand in units where pure PTFE was previously used, but its wear resistance was insufficient.

Keywords: polytetrafluoroethylene, carbon fiber filler, composite material, mechanical engineering, carbon fibers, polymer chain, fluoropolymer.

For citation. Bashlakova A. L., Ivanov L. F. Review of composite materials based on polytetrafluoroethylene and dispersed fibrous fillers for engineering products. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 2 (101), pp. 41–55 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-2-41-55

Введение

Для обеспечения эффективной работы узлов трения в условиях отсутствия смазки требуется применение материалов, которые отличаются оптимальным сочетанием антифрикционных и упруго-прочностных характеристик. Среди полимерных материалов политетрафторэтилен (ПТФЭ) обладает минимальным среди полимеров коэффициентом трения, что позволяет использовать его в ответственных узлах трения [1]. В то же время ПТФЭ характеризуется хладотекучестью и низкой износостойкостью [2]. Включение функциональных наполнителей [3] в состав фторполимерных композитов дает возможность существенно повысить их эксплуатационные характеристики [4–6]. Перспективным наполнителем для фторполимеров являются волокнистые материалы с линейным строением. Среди них обращают на себя внимание углеродные волокна [7, 8], обладающие высокими показателями прочности и модуля упругости, низким коэффициентом трения и термического расширения, а также химической и термической стабильностью, высокой теплопроводностью. Разветвленная поверхность углеродных волокон способствует образованию специфических структурно-организованных межфазных слоев на границе с полимером, что существенно влияет на свойства композиционных материалов [9–11].

В соответствии с современными тенденциями развития полимерных материалов первоочередной задачей становится поиск функциональных добавок [12, 13], модифицирующее воздействие которых на матрицу осуществляется на большой площади контакта и обладает комплексным характером, при этом не ухудшая технических и эксплуатационных свойств антифрикционного материала [14, 15]. В контексте политики импортозамещения также важно расширить ассортимент и снизить стоимость машиностроительных материалов.

Цель работы – обобщение информации о композиционных материалах, изготовленных на основе ПТФЭ и дисперсных углеволокнистых наполнителей, а также оценка применимости таких материалов при изготовлении изделий антифрикционного назначения для работы в узлах трения без смазки в подвижных соединениях.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе анализируются структурные, триботехнические и физико-механические изменения в фторполимерных композитах на основе ПТФЭ с малым содержанием волокнистых наполнителей [9, 16, 17], модифицированных в низкотемпературной плазме тлеющего разряда во фторорганической среде.

Фторопласты и их наполнители

Фторполимеры представляют собой уникальную категорию полимерных материалов, обладающих совокупностью важных для машиностроения характеристик [9–11]. Среди всех используемых в машиностроении материалов – полимеров, металлов, силикатов и других – ПТФЭ демонстрирует наивысшую устойчивость к воздействию климатических факторов и микроорганизмов. Его уникальные физико-химические [12, 13], механические и триботехнические характеристики выделяют ПТФЭ среди термопластов. Доля кристаллической фазы составляет 80–85 %, температура плавления кристаллической фазы равна 327 °С [14, 15]. Макромолекула ПТФЭ имеет спиралеобразную структуру, в которой карбоновая цепь выступает в качестве «остова», окруженного атомами фтора (рис. 1) [20].

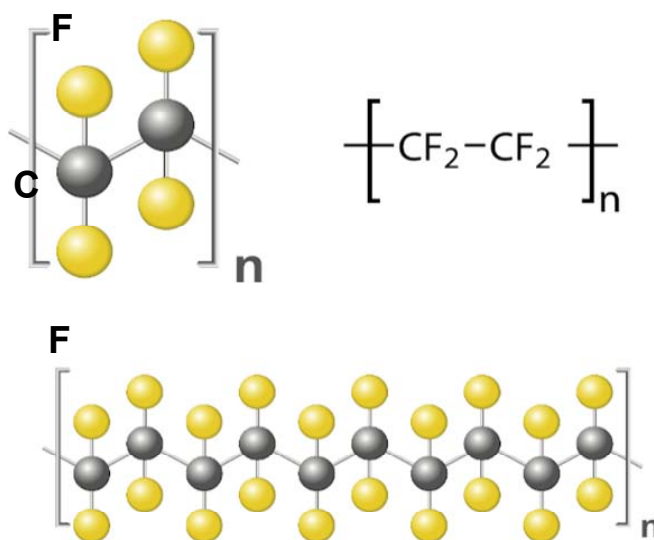


Рис. 1. Строение макромолекулы политетрафторэтилена [16]

Как уже подчеркивалось, к одним из существенных ограничений применения ПТФЭ и других фторопластов можно отнести их низкую стойкость к истиранию и хладотекучесть [17, 18]. Несмотря на высокую стабильность основных характеристик, а именно: широкого интервала рабочих температур, высоких антифрикционных свойств, гидрофобности, диэлектрических свойств, фторполимеры характеризуются малой эластичностью, что не позволяет эффективно использовать их в качестве уплотнительных элементов [14]. Один из наиболее очевидных способов придания композиционным материалам новых свойств, отсутствующих или недостаточно выраженных в исходном полимере, – это добавление наполнителей на стадии приготовления композиций [19–21]. Перспективным видом наполнителя для фторполимеров являются волокнистые материалы. Основное достоинство волокон как наполнителей – их линейная протяженность, что позволяет обеспечить рост площади контакта наполнителя с полимерной матрицей, ограничившись обычным измельчением волокон без необходимости тщательной диспергации [22, 23].

Наиболее распространенные волокнистые наполнители для ПТФЭ – углеродное волокно, стекловолокно и базальтовое волокно [24]. Эти наполнители полностью удовлетворяют требованиям термостойкости при спекании композита [25], способствуют образованию каркасной структуры из волокон, обеспечивающей армирующий эффект. Особый интерес вызывают углеродные волокна (УВ) [26]. Физико-механические характеристики и показатели поверхностных свойств УВ обуславлены как типом используемого сырья, так и особенностями технологического процесса, включая применяемые катализаторы и температурные режимы термообработки [3, 27].

В настоящее время УВ получают путем термообработки полиакрилонитрила (ПАН) и гидратцеллюлозы (ГЦ). Крупнейшее производство УВ из ГЦ находится в Беларуси (ОАО «СветлогорскХимволокно»). Основное различие между волокнами из ГЦ и ПАН заключается в присутствии атомов кислорода в основной цепи полимера ГЦ. Это усложняет формирование непрерывной ароматизированной структуры карбонизованного материала, что, в свою очередь, затрудняет последующую графитацию волокон ГЦ. В отличие от волокон ГЦ волокна ПАН характеризуются более совершенной структурой с меньшим количеством дефектов. Поэтому углеродные волокна из ПАН имеют более высокие значения прочности (2–7 ГПа) и модуля упругости (200–700 ГПа), чем УВ из ГЦ (прочность – 0,5–0,7 ГПа, модуль упру-

гости – 30–160 ГПа). Сферы применения УВ из ГЦ сосредоточены в областях, где не требуется достижения высоких физико-механических характеристик. К ним относятся высокотемпературная теплоизоляция, сорбенты, электропроводящие материалы, углерод-углеродные композиты, а также композиты на основе полиамидов, фторопластов и фторкаучуков [28–30].

Модифицирование углеродного волокна

При наполнении полимеров дисперсными частицами формируются межфазные слои, имеющие специфическое строение [31, 32]. Частицы любого дисперсного наполнителя обладают развитой поверхностью и, следовательно, поверхностной активностью того или иного уровня, что позволяет им реализовать межфазные физические взаимодействия с матрицей, формируя структуру композита.

В работе [25] описаны способы модифицирования УВ путем механоактивации смеси дробленных УВ с некоторым количеством фторполимера. В результате механически активированные компоненты с размером частиц в диапазоне 2–50 мкм за счет роста их поверхностной энергии соединяются, образуя промежуточный аддукт со специфическим строением межфазных слоев. Смещение данного аддукта с чистым ПТФЭ позволяет сформировать оптимально структурированный композит со стабильным уровнем основных физических и физико-механических свойств.

Также в качестве способов модифицирования применяют химическое окисление либо термоокисление УВ. Окисление волокон (т. е. создание полярных кислородсодержащих групп на их поверхности) повышает химическую составляющую их поверхностной активности по отношению к наполняемой ими матрице. В таком случае задача химической составляющей, по-видимому, сводится не к образованию новых прочных ковалентных связей между неполярным и инертным ПТФЭ и полярными кислородсодержащими группами, а к формированию слабых ван-дер-ваальсовых связей, что тем не менее способно влиять на структурообразование в значительно большей степени, чем вообще без химической составляющей межфазных взаимодействий. Для УВ может быть применен широкий спектр окислителей [33]. Согласно источникам [1, 8, 28], термоокисление УВ ведет к росту не только поверхностной активности, но и удельной поверхности, а также к своеобразной очистке поверхности от посторонних включений.

При криообработке УВ в среде жидкого азота удастся достичь некоторого улучшения условий структурирования ПТФЭ композитов, однако это нивелируется значительным ростом хрупкости волокон, что снижает возможности их использования в качестве эффективного армирующего наполнителя для фторполимеров.

При вакуумировании или термовакуумировании возможно повысить активность полимеров, добавок к ним и непосредственно смесей используемых компонентов [17]. В источнике [18] показано, что в результате термовакуумирования УВ при 150 °С прочность можно увеличить на 18–22 %, причем износостойкость возрастает на 20–25 %. Данный результат может быть объяснен обеспечиваемой вакуумом десорбцией газов из пор, имеющихся в УВ, с итоговым повышением площади их поверхности.

Несомненно, что многостадийные и энергозатратные технологии физического и тем более химического модифицирования УВ требуют их существенной оптимизации с целью добиться адекватного их сочетания и реализации возможности целенаправленно влиять на процессы структурирования в композите [34–36].

В Институте механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси разработан и запатентован метод повышения совместимости ПТФЭ с наполнителем. Суть метода заключается в формировании на поверхности наполнителя тонкого фторполимерного покрытия посредством воздействия плазмы электрического разряда в среде фторсодержащих газов [32, 37, 38].

По разработанному способу плазменного модифицирования выпускается углеродная лента с фторполимерным покрытием марки «Белум». Предложенный способ модифицирования углеродных волокон создает принципиально новые условия для межфазного взаимодействия [45, 51].

Таким образом, модифицирование по принципу увеличения технологической совместимости системы «матрица – наполнитель» приводит к достижению более высоких показателей свойств при меньших степенях наполнения, хотя механизмы этого явления пока изучены недостаточно.

Формирование структуры ПТФЭ в присутствии наполнителей

Влияние наполнителей на структуру аморфных и кристаллических полимеров различно. В случае кристаллизующихся полимеров, таких как ПТФЭ, взаимодействие полимерных цепей с поверхностью наполнителя ограничивает их подвижность и изменяет кинетику кристаллизации. Поверхность наполнителя может служить центром нуклеации для процесса кристаллизации [33], что приводит к модификации надмолекулярной структуры прилегающих микрообъемов матрицы [34–36]. При низких концентрациях наполнителя (до 2 мас. %) наблюдается ускорение процесса кристаллизации. При дальнейшем увеличении концентрации скорость кристаллизации снижается в результате координационного взаимодействия частиц наполнителя, что вызывает уменьшение поверхностной активности. Координационным взаимодействием формируются кластеры – скопления дискретной фазы в объеме непрерывной фазы матрицы и, кроме того, новые структурные образования в самом полимере [14, 35].

Прибавление содержания наполнителя свыше 5 % способствует образованию агломератов его частиц (и соответственно кластеров) по всему объему матрицы, включая граничные области. Данные атомно-силовой микроскопии подтверждают изменение механизма кристаллизации ПТФЭ под влиянием ультрадисперсных наполнителей. Согласно этим данным, с ростом концентрации наполнителя повышается микрогеометрическая развитость поверхности композиционных материалов за счет увеличения размеров кристаллов [38]. Однако при дальнейшем усилении концентрации УВ происходит избыточная активация микрообъемов полимера вблизи волокон, что ведет к частичному разрушению кристаллической структуры. Чем больше объем, занимаемый УВ, тем ниже макромолекулярная подвижность в матрице ПТФЭ и соответственно ниже склонность к кристаллизации.

В научной литературе изучалось влияние ультрадисперсных соединений (УДС) на структурообразование ПТФЭ [3, 16]. Как показано, даже незначительное добавление УДС может существенно улучшить ряд свойств композиционных материалов. Некоторые источники связывают этот скачок характеристик с так называемыми «размерными эффектами», проявляющимися у УДС. Эти эффекты обусловлены специфическим структурно-морфологическим и термодинамическим состоянием поверхности частиц УДС, а также их высокой способностью к координации с макромолекулами полимера. Кроме того, отмечается влияние естественного поляризационного заряда частиц УДС на структуру граничных слоев «связующее – наполнитель».

В большинстве работ, связанных с разработкой и изучением композитов на основе ПТФЭ, разделяют возможные концентрации наполнения на три условные группы:

- 1) до 10 мас. %;
- 2) 10–20 мас. %;
- 3) свыше 20 мас. %.

В ряде источников первую группу называют малонаполненными композитами, вторую – средненаполненными, третью – высоконаполненными [16, 38, 57]. По мнению авторов, такое разделение вызвано различным характером структурообразования композитов с наполнением до 10 мас. % УВ и композитов с наполнением

более 10 мас. % УВ. В научной школе Ю. К. Машкова считают, что при наполнении 10 мас. % УВ наступает «насыщение» материала наполнителем. Это проявляется в ограничении молекулярной подвижности и уменьшении скорости кристаллизации [38]. Кроме того, концентрацию в 10 % указывают как предельную и для ультрадисперсных наполнителей, например, скрытокристаллического графита, так как при такой степени наполнения износостойкость и механические свойства композита имеют максимальные значения [26]. В литературе о композитах на основе ПТФЭ концентрации ультрадисперсных наполнителей (например, СКГ) в размере 3 мас. % называют «малыми» [57]. В работе [16] авторы также выделяют две области критических концентраций для ПТФЭ, модифицированного ультрадисперсными керамиками, которые изменяют структуру ПТФЭ и физико-механические показатели. Первая группа соответствует 2 мас. % наполнения и характеризуется одинаковыми размерами сферолитов и максимальной степенью кристалличности. Второй группе (свыше 10 мас. % наполнения) свойственно снижение степени кристалличности, что влечет за собой изменение механических характеристик материалов, и при достижении определенного максимума концентраций изменение свойств приводит к катастрофическому износу композита.

В связи с этим устоявшимся в научной литературе мнением, которое подразумевает условное разделение концентраций наполнителя по максимальному значению степени кристалличности, автор считает возможным применить такую же терминологию и к композиционным материалам на основе ПТФЭ, наполненным модифицированными УВ: концентрацию наполнителя до 10 мас. % УВ в дальнейшем называть малонаполненными композитами, концентрацию свыше 10 мас. % УВ – средненаполненными, а свыше 20 мас. % УВ – высоконаполненными.

Таким образом, наполнение является одним из приемов модифицирования ПТФЭ с целью создания новых композиционных материалов и расширения номенклатуры уже имеющихся согласно текущим задачам современного машиностроения. При этом введение в ПТФЭ даже малых количеств наполнителей приводит к изменению надмолекулярной структуры, придавая композиционному материалу требуемые эксплуатационные характеристики.

Проблемы применения и недостатки известных ПТФЭ-композитов

Фторполимеры в настоящее время остаются незаменимыми материалами для изготовления ответственных деталей уплотняющей техники, поскольку не существует альтернативных полимеров с сопоставимым сочетанием свойств и доступной ценой [37]. Это создает стимул для разработки новых материалов для уплотняющей техники, в первую очередь, на основе модифицированных композиций с ПТФЭ. В настоящее время на рынке уплотнений уже используется ряд таких композитов [22, 38, 39]. В таблице представлены сравнительные характеристики ПТФЭ (обозначен как Ф-4) и основных композитных материалов на его основе.

Характеристики Ф-4 и композиций на его основе [2, 15]

Наименование показателей	Ф-4	Ф4К20	Ф4К15М5	Ф4УВ17 Суперфлувис	Ф4С15
Плотность, кг/м ³	2120–2200	2050–2170	2100–2180	1900–2000	2170–2210
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	19,6	12,7	15,2	15–18	13,7
Относительное удлинение при разрыве, %	350	120	150	60	300

Окончание

Наименование показателей	Ф-4	Ф4К20	Ф4К15М5	Ф4УВ17 Суперфлувис	Ф4С15
Модуль упругости, МПа: при сжатии	686,5	805	800	–	520
при растяжении	410	1500	–	–	480
Твердость по Бринеллю, МПа	37,2	39,2	59,08	–	49,0
Деформация под нагрузкой 10 МПа через 24 ч при 22 °С, %	6,6	2,9–3,0	3,6	–	3,5
Напряжение при 10 % деформации, МПа	–	21,5	20	–	19,5–20,5
Коэффициент теплопроводности, Вт/(МК)	0,25	0,23	0,29	–	0,25
Удельная теплоемкость, Дж/(кг · К)	1,04	0,71	–	–	0,9
Коэффициент линейного расширения, 10^{-5} , °С ⁻¹ , от –60 до +20 °С	18–25	8–11	–	–	4,5–12,5
Теплостойкость по Вика, °С	110	145–160	–	–	130–140
Водопоглощение через 24 ч, %	0,00	0,03	–	0,01	0,04
Допустимое РV (износ – 0,127 мм за 1000 ч), Па · м/с	0,75–1,00	325	500	–	130
Коэффициент износа, см ³ · с/кгс : см · ч · 10 ⁸	1800–2500	4	2,5	–	10
Относительная износостойкость	1	625	1000	2000	250
Интенсивность износа × 10 ⁶ , кг/ч	62,5	2,0	0,8	1,5	–
Коэффициент трения по стали	0,04	0,14–0,30	0,1–0,39	0,2	0,15–0,3
Интервал рабочих температур, °С	От 269 до +260	От 60 до +260	От 60 до +260	От 60 до +260	От 60 до +260

Фторопластовые композиционные материалы, несмотря на свои ценные свойства, обладают серьезным недостатком – высоким коэффициентом линейного теплового расширения (КЛТР). Характерной особенностью КЛТР этих материалов является его сложная зависимость от температуры с резким увеличением в области фазовых переходов, связанных со структурными изменениями кристаллической решетки [25, 55–57]. В существующей научной литературе недостаточно данных о поведении фторопластовых композитов при тепловом расширении. Один из существенных минусов применения данных материалов в высокоподвижных узлах трения, к примеру, в уплотнениях седел шаровых кранов [31], – низкая эластичность уплотняющих элементов. При воз-

действию температур изделия из таких материалов подвергаются деформации, которая оказывается необратимой [55–57]. Жесткость уплотнительных материалов, характерная для высоконаполненных композитов [22], таких как «Флубон» и «Флувис», не позволяет обеспечить должный уровень герметичности уплотнений, эксплуатируемых в условиях повышенной подвижности.

Изложенный выше анализ указывает на необходимость создания материала, который совмещал бы в себе необходимую прочность и низкий коэффициент трения, свойственные высоконаполненным материалам, с возможностью значительной вязкоупругой деформации. Это свойство критически важно для обеспечения герметичности уплотнительных элементов в узлах трения. Разработка такого материала особенно актуальна для узлов, где ранее использовался чистый ПТФЭ, но его износостойкость оказывалась недостаточной [36].

Влияние содержания модифицированных углеродных волокон на вязкоупругие свойства ПТФЭ-композитов

Полимерам, в том числе ПТФЭ, свойственна вязкоупругость, которая проявляется в виде релаксации напряжения. Вследствие деформации в теле детали возникает напряжение, которое в случае высокоэластических материалов со временем постепенно уменьшается, если величина деформации остается постоянной. Изучение релаксационных свойств материалов имеет важное значение для разработки уплотнительных и герметизирующих элементов [58].

В режиме релаксации напряжений в ходе принудительного деформирования образца возникают избыточные напряжения, обусловленные сопротивлением кристаллической решетки материала. После достижения заданной деформации начинается выдержка до стабилизации напряжений – собственно, релаксация. Критерием стабилизации (окончания релаксации) является постоянная скорость снижения напряжений, соответствующая окончанию упругой релаксации и переходу к релаксации ползучести.

На рис. 2 представлены кривые релаксации напряжения образцов ПТФЭ с разным содержанием УВ, деформированных на 5 %. Кривые релаксации в координатах «напряжение – время» разбиваются на два участка, соответствующих периодам релаксации. Первый период, длительностью до 3 мин, характеризуется резким падением напряжения. Второй период релаксации, длительность которого намного больше первого (3 ч), напротив, отличается умеренной скоростью падения напряжения: релаксационная кривая на этом участке при большой длительности испытания приближается к оси абсцисс.

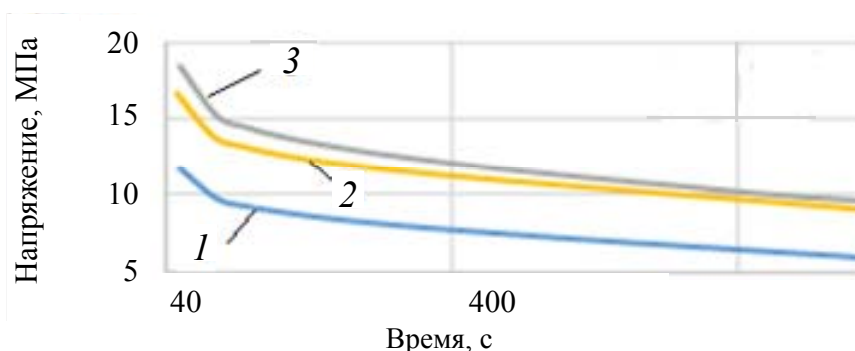


Рис. 2. Зависимость напряжения при сжатии, при постоянной деформации до 5 % от времени для образцов с различным содержанием УВ:

1 – ПТФЭ; 2 – ПТФЭ + 7 мас. % УВ; 3 – ПТФЭ + 10 мас. % УВ

Скорость падения напряжений в образцах неодинакова на двух участках кривых релаксации напряжения. Для композитов до 5 мас. % наполнения УВ скорость падения напряжения на первом участке составляет 1,74 МПа/мин., на втором участке – 0,13 МПа/мин. При дальнейшем увеличении содержания УВ до 7 мас. % УВ скорость падения напряжения на первом участке повышается до 2,51 МПа/мин, а с увеличением наполнения до 10 мас. % скорость падения напряжения растет уже и на втором участке релаксации и становится равной 0,22 МПа/мин.

Таким образом, вязкопластические свойства ПТФЭ-композита начинают проявляться сильнее при содержании 7 мас. % УВ на первом участке релаксации напряжений, а при 10 мас. % УВ – на всей релаксационной кривой.

Заключение

Исходя из вышеизложенного материала можно отметить, что проведенный анализ позволяет определить актуальные направления дальнейших исследований в области антифрикционных фторопластовых композитов с углеродистыми наполнителями. Требуется системный подход к изучению модифицирования поверхности УВ и ее влияния на формирование кристаллической структуры матрицы ПТФЭ. Кроме того, важнейшей проблемой является разработка малонаполненных композитов ПТФЭ + УВ с улучшенным комплексом свойств, сочетающим достаточную для герметизирующих подвижных уплотнений деформируемость и высокоэластичность с высокими износостойкостью, прочностью, теплофизическими характеристиками. Актуальным направлением становится изучение влияния особенностей типа углеродистых наполнителей на формирование оптимального комплекса свойств композитов для различных условий эксплуатации.

Литература

1. Маркова, М. А. Исследование трибологических свойств полимерных композитов на основе ПТФЭ в режиме сухого трения и в среде жидких смазок / М. А. Маркова, П. Н. Петрова, А. Л. Федоров // Журнал Сибирского федерального университета. – 2022. – № 15 (5). – С. 569–582.
2. Влияние межфазного слоя на теплоемкость и износостойкость наполненного политетрафторэтилена / Ю. К. Машков, В. И. Суриков, В. И. Суриков, И. А. Кузнецов // Трение и износ. – 1998. – Т. 19, № 4. – С. 487–492.
3. Исследование влияния комплексных наполнителей на трибологические свойства и структуру политетрафторэтилена / А. А. Охлопкова, А. П. Васильев, Т. С. Стручкова [и др.] // Трение и износ. – 2018. – Т. 39, № 5. – С. 543–550.
4. Адери́ха, В. Н. Прочностные свойства, структура и износостойкость композитов ПТФЭ – технический углерод / В. Н. Адери́ха, В. А. Шаповалов, Ю. М. Плескачевский // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 2. – С. 160–168.
5. Будник, О. А. Физико-химические и технологические аспекты подготовки углеродистого наполнителя для композита на основе политетрафторэтилена / О. А. Будник // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова. – 2014. – № 2. – С. 116–122.
6. Истомин, Н. П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров / Н. П. Истомин, А. П. Семенов. – М. : Наука, 1981. – 146 с.
7. Молчанов, Б. И. Углепластики / Б. И. Молчанов, П. А. Чукаловский, В. Я. Варшавский. – М. : Химия, 1985. – 207 с.
8. Углеродные волокна / под ред. С. Симамуры ; пер. с яп. Ю. М. Товмасына. – М. : Мир, 1987. – 304 с.
9. Башлакова, А. Л. Влияние малых концентраций углеродного наполнителя на свойства композитов на основе фторопласта-4 / А. Л. Башлакова // Новые функциональные мате-

- риалы, современные технологии и методы исследования : тез. докл. V Респ. науч.-техн. конф. молодых ученых, г. Гомель, 12–14 нояб. 2018 г. / Ин-т механики металлополимер. систем им. В. А. Белого НАН Беларуси. – Гомель, 2018. – С. 6–7.
10. Кристаллизация политетрафторэтилена под действием γ -излучения / Ю. В. Зеленев, А. А. Коптелова, Д. Н. Садовничий // Пластические массы. – 2002. – № 1. – С. 19–22.
 11. Martin, J. M. Superlubricity of molybdenum disulphide / J. M. Martin, C. Donnet, T. Le Monte // The American Physical Society, Physical Review B. – 1993. – Vol. 48, N 14. – P. 10583–10586.
 12. Машков, Ю. К. Трибофизика и свойства наполненного фторопласта / Ю. К. Машков. – Омск : ОмГТУ, 1997. – 192 с.
 13. Fluoroplastic-multi-walled carbon nanotube composites: structural, mechanical, and tribotechnical characteristics / Yu. M. Solonin, A. V. Menakhov, A. G. Kectornov [et al.] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2014. – Vol. 52, N 11-12. – P. 620–631.
 14. Башлакова, А. Л. Влияние плазмохимического модифицирования углеродных волокон на коэффициент трения армированного ими поливинилиденфторида / А. Л. Башлакова, В. П. Селькин, С. В. Копылов // Машиноведение и инновации : сб. ст. XXIX конф. молодых ученых и студентов (МИКМУС–2017), г. Москва, 6–8 дек. 2017 г. / Ин-т машиноведения им. А. А. Благонравова Рос. акад. наук. – М., 2017. – С. 148–151.
 15. Вязкоупругие и теплофизические свойства политетрафторэтилена с наполнителями / Н. В. Чигвинцев, Вал. И. Суриков, Вад. И. Суриков // Проблемы машиностроения и металлообработки : сб. тр. / Ом. политехн. ин-т ; под ред. В. А. Наумова и А. В. Евстифеева. – Омск, 1992. – С. 31–33.
 16. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация : монография / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, В. И. Суриков, Л. Ф. Калистратова. – М. : Машиностроение, 2005. – 240 с.
 17. Фторопластовые технологии. – URL: <https://ftoroplast.com.ru/> (дата обращения: 09.11.2024).
 18. Фторопласты : каталог. – Черкассы : НИИТЭХИМ, 1983. – 209 с.
 19. Основные тенденции создания полимерных композиционных антифрикционных материалов / И. А. Грибова, А. П. Краснов, А. Н. Чумаевская, Н. М. Тимофеева // Обзор аналитической информации / Ин-т элементоорган. соединений Рос. акад. наук им. А. Н. Несмеянова. – М., 1996. – 46 с.
 20. Перепечко, И. И. Введение в физику полимеров / И. И. Перепечко. – М. : Химия, 1978. – 312 с.
 21. Промышленные полимерные композиционные материалы / под ред. М. Ричардсона ; пер. с англ. под ред. П. Г. Бабаевского. – М. : Химия, 1980. – 471 с.
 22. Мотавкин, А. В. Формирование кластеров в структуре полимерных композитов / А. В. Мотавкин, Е. М. Покровский // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 1997. – Т. 39, № 12. – С. 2017–2030.
 23. Моделирование структурообразующих процессов в наполненных полимерах / А. В. Горяга, И. А. Кузнецов, Вал. И. Суриков // Физические основы материаловедения. – 1999. – № 5. – С. 8–12.
 24. Калистратова, Л. Ф. Сравнительный анализ толщины деформированного поверхностного слоя композитов двойных систем ПТФЭ с волокнистым и дисперсным наполнителями / Л. Ф. Калистратова, Л. В. Зайнуллина // Актуальные проблемы современной науки : материалы VIII Регион. науч.-практ. конф. с междунар. участием, г. Омск, 26 апр. 2019 г. / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск, 2019. – С. 27–32.
 25. Суриков, В. И. Повышение эксплуатационных свойств композитов на основе политетрафторэтилена путем структурной многоуровневой модификации : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 / Суриков Валерий Иванович ; Ом. гос. техн. ун-т. – Омск, 2001. – 363 с.

26. Егоров, А. С. Разработка технологии новых композиционных материалов, модифицированных карбидом кремния и углеродными нанотрубками : дис. ... канд. хим. наук : 05.17.01 / Егоров Александр Сергеевич ; Моск. мед. акад. им. И. М. Сеченова. – М., 2018. – 200 с.
27. Лагунов, В. С. Улучшение антифрикционных свойств металлофторопластов / В. С. Лагунов // Технология и организация производства. – 1991. – № 4. – С. 49–51.
28. Материаловедение : учебник / В. А. Струк, Л. С. Пинчук, Н. К. Мышкин [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2008. – 519 с.
29. Паншин, Ю. А. Фторопласты / Ю. А. Паншин, С. Г. Малкевич, У. С. Дунаевская. – Л. : Химия, 1978. – 232 с.
30. Пугачев, А. К. Переработка фторопластов в изделия. Технология и оборудование / А. К. Пугачев, О. А. Росляков. – Л. : Химия, 1987. – 168 с.
31. Рязанов, А. А. Исследование диапазона применения «мягких» уплотнений седел шаровых кранов / А. А. Рязанов, С. К. Королев, А. В. Чернышев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 5. – URL: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/machin/vacuum/758.html> (дата обращения: 09.11.2024).
32. Степанов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М. Н. Степанов. – М. : Машиностроение, 1985. – 21 с.
33. Соломко, В. П. Наполненные кристаллизующиеся полимеры / В. П. Соломко. – Киев : Наук. думка, 1980. – 264 с.
34. Чижик, С. А. Трибомеханика прецизионного контакта (сканирующий зондовый анализ и компьютерное моделирование) : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.04 / Чижик Сергей Антонович ; Ин-т механики металлополимер. систем им. В. А. Белого НАН Беларуси. – Гомель, 1998. – 319 с.
35. Чемисенко, О. В. Структура и свойства нанокompозита на основе политетрафторэтилена, модифицированного диоксидом кремния и скрыто-кристаллическим графитом : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / Чемисенко Олег Владимирович ; Ом. гос. техн. ун-т. – Омск, 2018. – 145 с.
36. Черский, И. Н. Полимерные материалы в современной уплотнительной технике / И. Н. Черский. – Якутск : ЯНЦ СО АН СССР, 1975. – 112 с.
37. Электрические характеристики политетрафторэтилена, наполненного модифицированными углеродными волокнами / А. Л. Башлакова, Е. М. Толстомятов, В. А. Шелестова, Л. Ф. Иванов // Полимерные материалы и технологии. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 39–45.
38. Машков, Ю. К. Развитие методов формирования эффективных структурно-фазовых состояний полимерных композитов на основе ПТФЭ / Ю. К. Машков, Л. Ф. Калистратова, О. В. Кропотин // Пластические массы. – 2017. – № 3-4. – С. 12–14.
39. Машиностроительные фторкомпозиты: структура, технология, применение / С. В. Авдейчик, В. В. Воропаева, А. А. Скаскевич, В. А. Струк ; под ред. В. А. Струка. – Гродно : ГрГУ, 2012. – 339 с.
40. Обеспечение износостойкости изделий. Методика оценки триботехнических свойств материалов на основе полимеров : МР 74-82 / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т по нормализации в машиностроении, Ин-т механики металлополимер. систем АН БССР. – М. : ВНИИНмаш, 1982. – 18 с.
41. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : в 5 т. / Д. В. Сивухин. – М. : Физматлит, 2006. – Т. 1. Механика. – 520 с.
42. Зайдель, А. Н. Ошибки измерений физических величин : учеб. пособие / А. Н. Зайдель. – СПб. : Лань, 2005. – 112 с.
43. Беграмбеков, Л. Б. Модификация поверхности твердых тел при ионном и плазменном воздействии : учеб. пособие / Л. Б. Беграмбеков. – М. : МИФИ, 2001. – 34 с.
44. Сиренко, Г. А. Антифрикционные карбопластики / Г. А. Сиренко. – Киев : Техника, 1985. – 195 с.

45. Гракович, П. Н. Применение фторопластового композита Флувис в поршневых компрессорах / П. Н. Гракович, В. А. Шелестова, В. В. Серафимович // Компрессорная техника и пневматика. – 2005. – № 3. – С. 33–35.
46. Углеродные волокна и углекомпози́ты / под ред. Э. Фитцера ; пер. с англ. С. Л. Баженова. – М. : Мир, 1988. – 336 с.
47. Конкин, А. А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы / А. А. Конкин. – М. : Химия, 1974. – 376 с.
48. Пугачев, А. К. Переработка фторопластов в изделия: технология и оборудование / А. К. Пугачев, О. А. Росляков. – Л. : Химия, 1987. – 167 с.
49. Новые антифрикционные материалы группы Флувис на основе модифицированных углеродных волокон / В. А. Шелестова, П. Н. Гракович, С. Г. Данченко [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 11. – 39–41.
50. Кропотин, О. В. Влияние армирующего углеволокна на структуру и вязкоупругие свойства политетрафторэтилена / О. В. Кропотин, В. И. Суриков, Л. Ф. Калистратова // Вестник Омского университета. – 1997. – Вып. 3. – С. 33–34.
51. Перепечко, И. И. Акустические методы исследования полимеров / И. И. Перепечко. – М. : Химия, 1973. – 295 с.
52. Никифоров, А. Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе / А. Ф. Никифоров. – Л. : Химия, 1964. – 784 с.
53. Исследование полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и углеродных волокон / А. А. Ушканов, Н. И. Лазарева, А. А. Охлопкова, А. П. Васильев // Ползуновский вестник. – 2023. – № 4. – С. 223–229. – URL: <https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest/article/view/676> (дата обращения: 16.11.2024).
54. Федоров, А. Л. Износостойкие композиты на основе ПТФЭ, полученные модифицированием моторными маслами / А. Л. Федоров, П. Н. Петрова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 1. – С. 404–406. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iznosostoykie-kompozity-na-osnove-ptfe-poluchennye-modifitsirovaniem-motornymi-maslami> (дата обращения: 16.11.2024).
55. Охлопкова, А. А. Физико-химические принципы создания триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперстных керамик : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 ; 05.02.04 ; 30.05.00 ; 13.10.00 / Охлопкова Айталиа Алексеевна ; Якут. гос. ун-т им. М. К. Аммосова, Рос. акад. наук, Ин-т неметалл. материалов. – Якутск, 2000. – 293 с.
56. Пинчук, Л. С. Герметология / Л. С. Пинчук. – Минск : Наука и техника, 2002. – 215 с.

References

1. Markova M. A., Petrova P. N., Fedorov A. L. Investigation of tribological properties of PTFE-based polymer composites in dry friction mode and in liquid lubricants. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta = Journal of Siberian Federal University*, 2022, no. 15 (5), pp. 569–582 (in Russian).
2. Mashkov Yu. K., Surikov V. I., Surikov V. I., Kuznetsov I. A. The effect of the interfacial layer on the heat capacity and wear resistance of filled polytetrafluoroethylene. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 1998, vol. 19, no. 4, pp. 487–492 (in Russian).
3. Okhlopko A. A., Vasil'ev A. P., Struchkova T. S., Grakovich P. N., Bashlakova A. L. An investigation of the effects of complex aposematic properties of tribological properties and structure of polytetrafluor. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 2018, vol. 39, no. 5, pp. 543–550 (in Russian).
4. Aderikha V. N., Shapovalov V. A., Pleskachevskii Yu. M. Strength properties, structure and wear resistance of PTFE – carbon black composites. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 2008, vol. 29, no. 2, pp. 160–168 (in Russian).

5. Budnik O. A. Physico-chemical and technological aspects of the preparation of carbon fiber filler for a composite based on polytetrafluoroethylene. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta imeni V. G. Shukhova* = *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2014, no. 2, pp. 116–122 (in Russian).
6. Istomin N. P., Semenov A. P. *Antifriction properties of composite materials based on fluoropolymers*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 146 p. (in Russian).
7. Molchanov B. I., Chukalovskii P. A., Varshavskii V. Ya. *Carbon plastics*. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 207 p. (in Russian).
8. Ed. Simamury S. *Carbon fibers*. Moscow, Mir Publ., 1987. 304 p. (in Russian).
9. Bashlakova A. L. The effect of low concentrations of carbon filler on the properties of composites based on fluoroplast-4. *Novye funktsional'nye materialy, sovremennye tekhnologii i metody issledovaniya: tezisy dokladov V Respublikanskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh, Gomel', 12–14 noyab. 2018 g.* [New functional materials, modern technologies and research methods: abstracts of the V Republican scientific and technical conference of young scientists, Gomel, November 12–14, 2018]. Gomel', In-t mekhaniki metallopolimer. sistem im. V. A. Belogo NAN Belarusi, 2018, pp. 6–7 (in Russian).
10. Zelenev Yu. V., Koptelov A. A., Sadovnichii D. N., Shlenskii O. F., Valgin D. D. Crystallization of polytetrafluoroethylene under the action of gamma radiation. *Plasticheskie massy*, 2002, no. 1, pp. 19–22 (in Russian).
11. Martin J. M., Le Monte T. Superlubricity of molybdenum disulphide. *The American Physical Society, Physical Review B*, 1993, vol. 48, no. 14, pp. 10583–10586.
12. Mashkov Y. K. *Tribophysics and properties of filled fluoroplast*. Omsk, Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1997. 192 p. (in Russian).
13. Solonin Y. M., Nenakhov A. V., Kostornov A. G., Danilenko N. I., Gorban' V. F., Karpets M. V. Fluoroplastic-multi-walled carbon nanotube composites: structural, mechanical, and tribotechnical characteristics. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2014, vol. 52, no. 11–12, pp. 620–631.
14. Bashlakova A. L., Sel'kin V. P., Kopylov S. V. The effect of plasmochemical modification of carbon fibers on the coefficient of friction of polyvinylidene fluoride reinforced with them. *Mashinovedenie i innovatsii: sbornik statei XXIX konferentsii molodykh uchenykh i studentov, Moscow, 6–8 dek. 2017 g.* [Machine Science and innovations: collection of articles of the XXIX conference of young scientists and students, Moscow, December 6–8, 2017]. Moscow, In-t mashinovedeniya im. A. A. Blagonravova Ros. akad. Nauk, 2017, pp. 148–151 (in Russian).
15. Chigvintsev N. V., Surikov V. I., Surikov V. I. Viscoelastic and thermophysical properties of polytetrafluoroethylene with fillers. *Problemy mashinostroeniya i metalloobrabotki: sb. tr.* Omsk, Omskii politekhnicheskii institut, 1992, pp. 31–33 (in Russian).
16. Mashkov Y. K., Ovchar Z. N., Surikov V. I., Kalistratova L. F. *Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 240 p. (in Russian).
17. *Fluoroplastic technologies*. URL: <https://ftoroplast.com.ru/> (accessed 09.11.2024) (in Russian).
18. *Fluoroplastics*. Cherkassy, Nauchno-issledovatel'skii institut tekhniko-ehkonomicheskikh issledovaniy v khimicheskoy komplekse, 1983. 209 p. (in Russian).
19. Gribova I. A., Krasnov A. P., Chumaevskaya A. N., Timofeeva N. M. *The main trends in the creation of polymer composite antifriction materials*. Moscow, Institut ehlementoorganicheskikh soedineniy imeni A. N. Nesmeyanova, 1996. 46 p. (in Russian).
20. Perepechko I. I. *Introduction to polymer physics*. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 312 p. (in Russian).
21. Ed. M. Richardsona. *Industrial polymer composite materials*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 471 p. (in Russian).

22. Motavkin A. V., Pokrovskii E. M. Formation of clusters in the structure of polymer composites. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A = Polymer Science. Series A*, 1997, vol. 39, no. 12, pp. 2017–2030 (in Russian).
23. Goryaga A. V., Kuznetsov I. A., Surikov V. I. Modeling of structure-forming processes in filled polymers. *Fizicheskie osnovy materialovedeniya*, 1998, no. 6, pp. 8–12 (in Russian).
24. Kalistratova L. F., Zainullina L. V. Comparative analysis of the thickness of the deformed confidential layer of composite double PTFE systems with fibrous and dispersed fillers. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki: materialy VIII Regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Omsk, 26 apr. 2019 g.* [Actual problem of modern sciences: material of the VIII Regional scientific and practical conference with international participate, Omsk, April 26, 2019]. Omsk, Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2019, pp. 27–32 (in Russian).
25. Surikov V. I. *Improving the operational properties of polytetrafluoroethylene-based composites through structural multilevel modification*. Omsk, 2001. 363 p. (in Russian).
26. Egorov A. S. *Development of technology for new composite materials modified with silicon carbide and carbon nanotubes*. Moscow, 2018. 200 p. (in Russian).
27. Lagunov V. S. Improvement of antifriction properties of metallofluoroplastics. *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva*, 1991, no. 4, pp. 49–51 (in Russian).
28. Struk V. A., Pinchuk L. S., Myshkin N. K. *Materials science*. Minsk, Informatsionno-vychislitel'nyi tsentr Ministerstva finansov Respubliki Belarus' Publ., 2008. 519 p. (in Russian).
29. Panshin Yu. A., Malkevich S. G., Dunaevskaya U. C. *Fluoroplastics*. Leningrad, Khimiya Publ., 1978. 232 p. (in Russian).
30. Pugachev A. K., Roslyakov O. A. *Processing of fluoroplastics into products. Technology and equipment*. Leningrad, Khimiya Publ., 1987. 168 p. (in Russian).
31. Ryazanov A. A., Korolev S. K., Chernyshev A. V. Investigation of the range of application of "soft" seals for ball valve seats. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 5. URL: <https://engjournal.bmstu.ru/catalog/machin/vacuum/758.html> (accessed 09.11.2024) (in Russian).
32. Stepanov M. N. *Statistical methods of processing the results of mechanical tests*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 21 p. (in Russian).
33. Solomko V. P. *Filled crystallizing polymers*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980. 264 p. (in Russian).
34. Chizhik S. A. *Tribomechanics of precision contact (scanning probe analysis and computer modeling)*. Gomel', 1998. 319 p. (in Russian).
35. Chemisenko O. V. *Structure and properties of a nanocomposite based on polytetrafluoroethylene modified with silicon dioxide and latent-crystalline graphite*. Omsk, 2018. 145 p. (in Russian).
36. Cherskii I. N. *Polymer materials in modern sealing technology*. Yakutsk, Yakutskii nauchnyi tsentr Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk Publ., 1975. 112 p. (in Russian).
37. Bashlakova A. L., Tolstopyatov E. M., Shelestova V. A., Ivanov L. F. Electrical characteristics of polytetrafluoroethylene filled with modified carbon fibers. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer Materials and Technologies*, 2023, vol. 9, no. 1, pp. 39–45 (in Russian).
38. Mashkov Yu. K., Kalistratova L. F., Kropotin O. V. The development of methods for the formation of effective structural and phase states of polymer composites based on PTFE. *Plasticheskie massy*, 2017, no. 3–4, pp. 12–14 (in Russian).
39. Avdeichik S. V., Voropaeva V. V., Skaskevich A. A., Struk V. A. *Mechanical engineering fluorocomposites: structure, technology, application*. Ed. V. A. Struka. Grodno, Grodnenskiy gosudarstvennyi universitet imeni Ya. Kupaly, 2012. 339 p. (in Russian).

40. *Ensuring the wear resistance of products. Method for evaluating the tribotechnical properties of polymer-based materials.* Moscow, Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut normalizatsii v mashinostroenii, 1982. 18 p. (in Russian).
41. Sivukhin D. V. *General course of physics.* Vol. 1. Mechanics. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 520 p. (in Russian).
42. Zaidel' A. N. *Measurement errors of physical quantities.* St. Petersburg, Lan' Publ., 2005, 112 p. (in Russian).
43. Begrambekov L. B. *Modification of the surface of solids under ion and plasma exposure.* Moscow, Moskovskii inzhenerno-fizicheskii institut, 2001. 34 p. (in Russian).
44. Sirenko G. A. *Antifriction carboplastics.* Kiev, Tekhnika Publ., 1985. 195 p. (in Russian).
45. Grakovich P. N., Shelestova V. A., Serafimovich V. V. Application of fluoroplastic composite Fluvis in reciprocating compressors. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika = Compressors & Pneumatics*, 2005, no. 3, pp. 33–35 (in Russian).
46. Ed. Fittsera Eh. *Carbon fibers and carbon composites.* Moscow, Mir Publ., 1988. 336 p. (in Russian).
47. Konkin A. A. *Carbon and other heat-resistant fibrous materials.* Moscow, Khimiya Publ., 1974. 376 p. (in Russian).
48. Pugachev A. K., Roslyakov O. A. *Processing of fluoroplastics into products. Technology and equipment.* Leningrad, Khimiya Publ., 1987. 167 p. (in Russian).
49. Shelestova V. A., Grakovich P. N., Danchenko S. G., Smirnov A. V. New antifriction materials of the Fluvis group based on modified carbon fibers. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroyeniye = Chemical and petroleum engineering*, 2006, no. 11, pp. 39–41 (in Russian).
50. Kropotin O. V., Surikov V. I., Kalistratova L. F. The influence of reinforcing carbon fiber on the structure and viscoelastic properties of polytetrafluoroethylene. *Vestnik Omskogo universiteta = Herald of Omsk university*, 1997, iss. 3, pp. 33–34 (in Russian).
51. Perepechko I. I. *Acoustic methods of polymer research.* Moscow, Khimiya Publ., 1973. 295 p. (in Russian).
52. Nikiforov A. F. *Synthetic polymers and plastics based on them.* Leningrad, Khimiya Publ., 1964. 784 p. (in Russian).
53. Ushkanov A. A., Lazareva N. N., Okhlopko A. A., Vasil'ev A. P. Research of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene and carbon fibers. *Polzunovskii vestnik*, 2023, no. 4, pp. 223–229. URL: <https://ojs.altstu.ru/index.php/PolzVest/article/view/676> (accessed 16.11.2024) (in Russian).
54. Fedorov A. L., Petrova P. N. PTFE-based wear-resistant composites obtained by modification with engine oils. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 1, pp. 404–406. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iznosostoykie-kompozity-na-osnove-ptfe-poluchennye-modifitsirovaniem-motornymi-maslami> (accessed 16.11.2024) (in Russian).
55. Okhlopko A. A. *Physico-chemical principles of creating tribotechnical materials based on polytetrafluoroethylene and ultrafine ceramics.* Yakutsk, 2000. 293 p. (in Russian).
56. Pinchuk L. S. *Hermeology.* Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 2002. 215 p. (in Russian).

Поступила 03.03.2025 г.