

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ДИОКСИДОМ КРЕМНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Н.П. Сивцева-Гладкина

А.М. Спиридонов

С.Н. Данилова

Ю.В. Капитонова

П.Н. Тарасова

А.А. Охлопкова

lan41453@gmail.com

spalmik@mail.ru

dsn.sakhayana@mail.ru

kapitonova-kirillina@mail.ru

pn.tarasova@gmail.com

okhlopkova@yandex.ru

СВФУ, Якутск, Российская Федерация

Аннотация

Проведено комплексное исследование влияния модифицированного диоксида кремния на физико-механические и термодинамические свойства полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена в широком температурном диапазоне, включающем в себя криогенные условия, которые характерны для Арктического региона. Показано, что модифицирование поверхности наполнителя хлоридом алюминия улучшает межфазное взаимодействие с полимерной матрицей, способствует формированию более упорядоченной надмолекулярной структуры и повышению степени кристалличности композита. Методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии и дифференциальной сканирующей калориметрии установлено, что введение модифицированного наполнителя приводит к снижению коэффициента линейного теплового расширения и повышению энтальпии плавления. Механические испытания выявили увеличение прочности при растяжении и сжатии, модуля упругости при сжатии, а также стабильности свойств при отрицательных значениях температуры у композитов с модифицированным оксидом кремния по сравнению с чистым политетрафторэтиленом и композитом с немодифицированным наполнителем. Ключевой фактор улучшения характеристик — эффективное

Ключевые слова

Политетрафторэтилен, композит, диоксид кремния, климатические испытания, низкая температура, Арктика

армирование полимерной матрицы за счет равномерного распределения частиц наполнителя и усиления адгезии на границе раздела фаз благодаря адсорбированным катионам алюминия на поверхности диоксида кремния. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения модифицированного оксида кремния для создания полимерных композитов, устойчивых к экстремальным климатическим условиям Арктики

Поступила 07.10.2025

Принята 05.11.2025

© Автор(ы), 2026

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России «Фундаментальные основы создания новых полимерных материалов технического и медицинского назначений с управляемыми и самоорганизующимися свойствами» (FSRG-2024-0004)

Введение. Арктическая и Субарктическая зоны Российской Федерации обладают значительным экономическим потенциалом [1–3]. Для их социально-экономического развития разработаны ключевые государственные программы, среди которых главной является «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» («Стратегия «Арктика–2035»). Основные национальные проекты, направленные на освоение минеральных ресурсов и развитие транспортной инфраструктуры (включая Северный морской путь, а также сухопутный и воздушный транспорт) [4, 5], сталкиваются с такими проблемами, как недостаточный уровень развития транспортной системы, низкие показатели производительности, диспропорции в экономике приарктических территорий, отсутствие современной инфраструктуры связи и информационных технологий [6].

В связи с уникальными природно-климатическими особенностями указанных зон, для которых характерны холодная зима (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), жаркое лето (до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$), большое количество осадков и чрезмерная влажность [7], техника получает дополнительные нагрузки на рабочие узлы и агрегаты, что с течением времени может привести к выходу их из строя [8, 9]. Таким образом, одно из перспективных направлений заключается в разработке новых материалов на основе термопластов, которые могут работать в течение длительного времени без смазки в условиях криогенной и повышенной температуры, агрессивных сред, высоких нагрузок и скоростей. Этим требованиям полностью соответствует политетрафторэтилен (ПТФЭ), являющийся до настоящего времени единственным полимером, который способен сохранять механические свойства при низких значениях температуры, сравнительно низком и стабильном значении ко-

коэффициента трения (0,04–0,20) и обеспечивать плавное скольжение при низкой и криогенной температуре [10, 11]. Ввиду физико-химических свойств ПТФЭ рассматривается как функциональный полимерный материал для использования в различных отраслях промышленности. В основном из него изготавливают конструкционные изделия антифрикционного назначения, например, шарики подшипников, поршневые кольца, уплотнители [12–15]. Создание новых антифрикционных материалов на основе ПТФЭ — одна из важных задач современного машиностроения, задающего в последнее время более высокие требования к механическим и триботехническим свойствам полимеров [16]. Однако, кроме преимуществ, ПТФЭ обладает несколькими существенными недостатками: низкой износостойкостью при трении, высокими ползучестью и коэффициентом теплового расширения [17]. Для устранения перечисленных недостатков используют различные методы и технологии переработки. Наиболее дешевой и общедоступной технологией модифицирования полимера является введение наполнителей с различной морфологией и природой. Один из таких наполнителей — диоксид кремния SiO_2 — универсальный наполнитель для производства полимерных композиционных материалов (ПКМ) [18]. Перспективность использования диоксида кремния показана в [19–24], где установлено, что добавление SiO_2 приводит к повышению эксплуатационных свойств ПТФЭ. Диоксид кремния за счет наличия силанольных групп и силоксановых мостиков на его поверхности гидрофилен, а ПТФЭ, как и многие органические соединения [25], гидрофобен, поэтому межфазная связь между полимерной матрицей и частицами наполнителя будет слабой, что обуславливает низкие механические свойства материала. В связи с этим в [26–28] предложено решение указанной проблемы активацией поверхности SiO_2 такими способами, как ультразвуковое воздействие, измельчение в шаровой мельнице, прививание органических соединений по силанольным группам.

Существует много исследований, сосредоточенных на поведении трибологических характеристик композитов на основе ПТФЭ при нормальной температуре окружающей среды. Работ, описывающих механическое поведение композитов при низких значениях температуры, крайне мало.

Цель работы — анализ механизмов деформации и разрушения ПТФЭ и ПКМ на его основе в низкотемпературной среде.

Материалы и методы. В качестве полимерной матрицы использован ПТФЭ марки ПН-90 (ГОСТ 10007–80, АО «ГалоПолимер», Российская Федерация), в качестве наполнителя — диоксид кремния SiO_2

(ООО «ЭкспрессХим», Российская Федерация) со средним размером частиц 10 мкм. Для модифицирования поверхности SiO_2 выбран хлорид алюминия AlCl_3 ч.д.а. (ГОСТ 3759–75). Модифицирование наполнителя проведено по схеме, описанной в патенте RU 2792599 С1¹ с использованием 0,1 молярного раствора AlCl_3 . Образцы для исследований получены путем сухого смешения в лопастном смесителе с последующим холодным прессованием в форме лопаток, спеканием при температуре 375 ± 5 °С и дальнейшим охлаждением. Содержание наполнителя в композитах одинаковое — 2 % (масс.). Выполнены пять параллельных испытаний для каждого композита. Состав ПКМ на основе ПТФЭ приведен ниже:

Номер образца	1	2	3
Обозначение	ПТФЭ	ПТФЭ/ SiO_2	ПТФЭ/ Al-SiO_2

Физико-механические свойства образцов определены на универсальной испытательной машине МИУ МИМ.2-5-2.1-16.1.2-3.1.1 (ООО «ГОСТ», Российская Федерация), оснащенной камерой контроля температуры окружающей среды RN-150 по ГОСТ 56800–2015 при скорости движения подвижных захватов 50 мм/мин. Напряжение при сжатии с учетом установленной относительной деформации (ϵ , %) определено по ГОСТ 4651–2014, плотность образцов — методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139–69. Место разрыва и структура композита в объеме исследованы сканирующим электронным микроскопом (СЭМ) *JSM-7800F* (JEOL Ltd., Япония) и рентгеноструктурным анализом (РСА) на рентгеновском порошковом дифрактометре *ThermoFisher Scientific ARLX'Tra* (ARL, Швейцария) при излучении CuK_α $\lambda = 1,54056$ Å. Средний размер кристаллитов рассчитан по формуле Шеррера $D = k\lambda / (B \cos \theta)$, где k — постоянная Шеррера, $k = 0,94$; λ — длина волны рентгеновского излучения; B — ширина пика дифракции (рад); θ — угол Брегга.

Термодинамические свойства образцов определены на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) *DSC 204F1 Phoenix* (NETZSCH, Германия). Средний коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) установлен с использованием термохимического анализатора ТМА-60 (Shimadzu Corp., Япония) по ГОСТ 32618.2–2014.

¹ Гладкина Н.П., Слепцова С.А., Федосеева В.И. и др. Полимерный композиционный материал конструкционного и триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена и модифицированного диоксида кремния. Патент RU 2792599 С1. Заявл. 19.07.2022, опубл. 22.03.2023.

Результаты и их обсуждение. Для лучшего понимания поведения механических характеристик композитов исследованы низкотемпературные сколы, полученные в криогенных условиях в среде жидкого азота с помощью СЭМ (рис. 1).

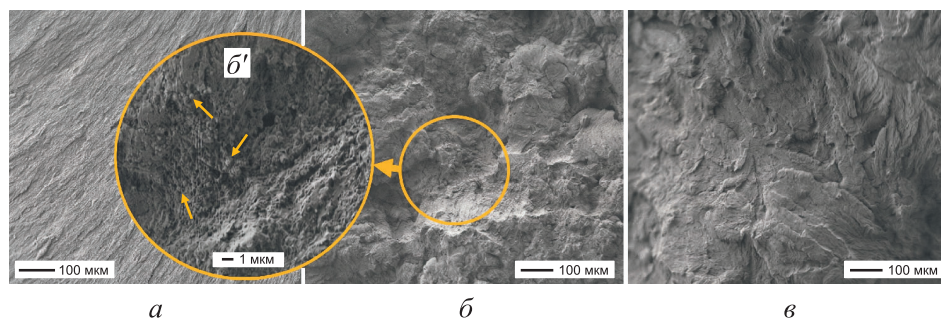


Рис. 1. Надмолекулярные структуры чистого ПТФЭ (а), ПТФЭ/SiO₂ (б), ПТФЭ/Al-SiO₂ (в) при увеличении $\times 150$ и ПТФЭ/SiO₂ (б') при увеличении $\times 500$

Результаты анализа (см. рис. 1) показали, что надмолекулярная структура у ненаполненного ПТФЭ (рис. 1, а) «лентообразная», сформированная протяженными ламеллярными образованиями кристаллической фазы. При введении наполнителя в полимерную матрицу ПТФЭ инициирует ее существенное изменение (рис. 1, б, в). На микрофотографии (см. рис. 1, б) заметно, что введение немодифицированного SiO₂ приводит к формированию неупорядоченной структуры с рыхлой и пористой плоскостью скола. Согласно установленным представлениям [29, 30], в случае активного межфазного взаимодействия наполнителя с полимерной матрицей полимера он может выступать агентом структурообразования, способствуя образованию сферолитоподобной надмолекулярной структуры. Морфологические характеристики сферолитов (размер, степень кристалличности, совершенство упаковки) находятся в прямой корреляции от природы, дисперсности, формы частиц наполнителя и их способности к адгезионному взаимодействию с полимерной матрицей. Следовательно, формирование более упорядоченной структуры в композитах с модифицированным SiO₂ (см. рис. 1, в) приводит к увеличению показателей физико-механических испытаний.

В целях изучения влияния наполнителей на характер изменения фазового состава и параметров надмолекулярной структуры полимерная матрица–ПТФЭ методом РСА получены дифракционные кривые (рис. 2). Результаты РСА ПТФЭ и композитов на его основе приведены ниже:

Номер образца	1	2	3
Межплоскостное расстояние d , нм	0,474	0,469	0,471
Степень кристалличности α , %	67,4	68,8	76,1
Средний размер кристаллитов по Шерреру D , нм	78,8	73,6	90,4

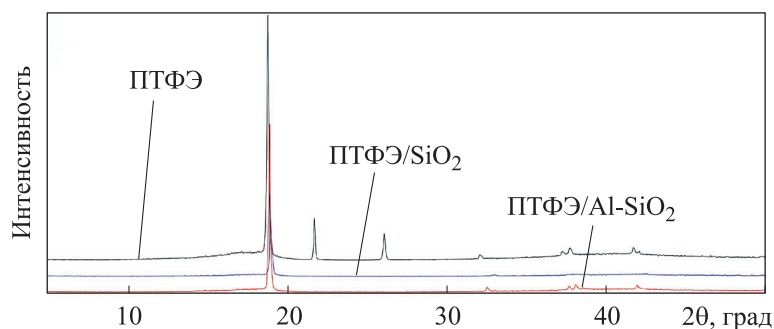


Рис. 2. Рентгенограммы ПТФЭ и композитов на его основе

Кривые дифрактограммы для всех образцов типичны для композитов на основе ПТФЭ с максимумом пика 100 при угле рассеяния $2\theta = 18^\circ 72'$, $18^\circ 91'$, $18^\circ 84'$ для исходного ПТФЭ и композитов с немодифицированным и модифицированным SiO_2 . Интенсивность остальных пиков, не показанных на рис. 2, по сравнению с ним пренебрежительно мала. У ПТФЭ кристаллическая фаза имеет гексагональную решетку с конформацией 15/7 для повторяющегося звена полимерной цепи [31]. Смещение пика 100 у образца 2 в сторону больших углов дифракции 2θ выше, чем у образца 3, что может быть связано с изменением межплоскостных расстояний в кристаллитах. Повышение интенсивности 2θ у ПКМ с модифицированным SiO_2 указывает на лучшее межфазное взаимодействие на границе полимер–наполнитель по сравнению с композитом с немодифицированным SiO_2 .

С использованием дифрактограмм по методу Руланда рассчитана степень кристалличности, по уравнению Дебая — Шеррера — средний размер кристаллитов. Согласно результатам, в образцах с модифицированным SiO_2 степень кристалличности и средний размер кристаллитов выше, чем у исходного ПТФЭ и ПКМ с немодифицированным SiO_2 , у которого эти параметры остаются на уровне ПТФЭ. Введение в полимер наполнителей несущественно влияет на температуру плавления: она остается на уровне исходного ПТФЭ и составляет примерно 605 К.

В композитах с немодифицированным SiO_2 значения энтальпии плавления ΔH и степени кристалличности α остаются на прежнем уровне (таблица), что и у ПТФЭ, по сравнению с композитами с модифицированным SiO_2 , где наблюдается их повышение. Вероятно, это связано с наличием катионов алюминия на поверхности SiO_2 , которые повышают межфазное взаимодействие наполнителя с полимерной матрицей. Следовательно, частицы SiO_2 могут выступать центрами кристаллитов, что приведет к ускорению процессов кристаллизации и повышению указанных параметров. Политетрафторэтилен характеризуется высоким значением КЛТР [32], что является его существенным недостатком. Введение SiO_2 в матрицу ПТФЭ, независимо от модифицирования, снижает значение КЛТР в 2 раза. Показано, что увеличение пористости материала уменьшает его плотность и повышает КЛТР [33–35]. Это и наблюдается в образце 2, где значение КЛТР выше, а плотность ниже, чем в образце 3 с модифицированным наполнителем.

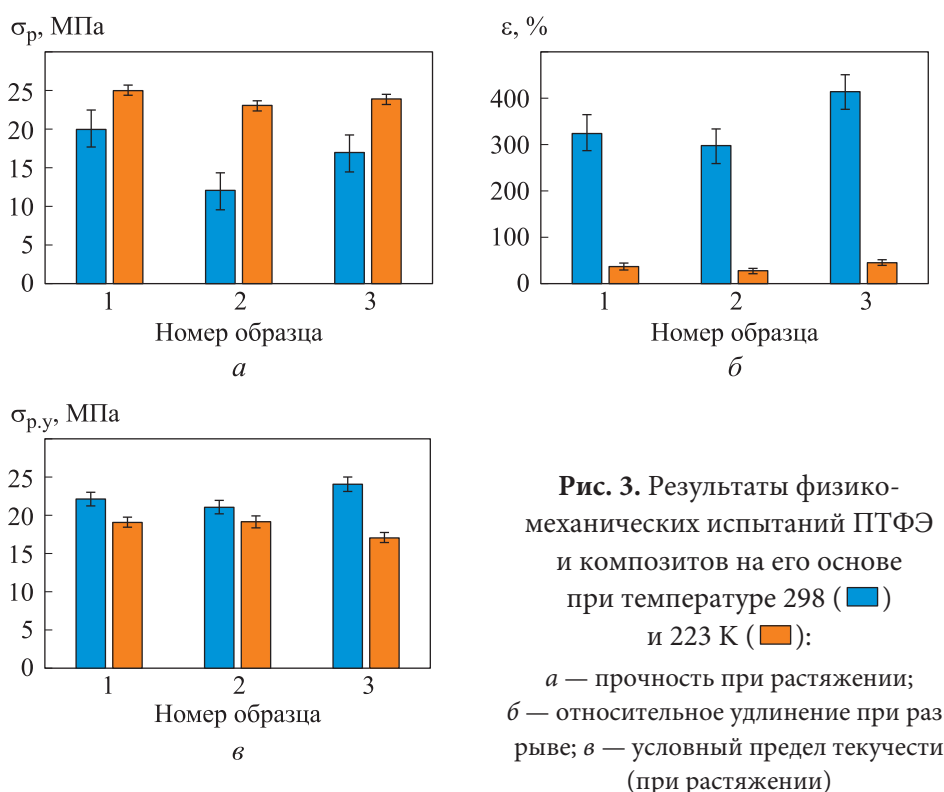
**Значения КЛТР, термодинамических параметров
и плотности исходного ПТФЭ и ПКМ
в зависимости от модифицирования SiO_2**

Параметр	Номер образца		
	1	2	3
КЛТР $\cdot 10^{-6}$, 1/К	229,9	113,2	101,6
$T_{\text{пл}}$, К	605,4	604,8	606,0
ΔH , Дж/г	28,5	29,1	35,6
α , %	34,8	35,5	43,4
ρ , г/см ³	2,2	2,1	2,2

Механические свойства композитов определены для двух температурных режимов (298 и 223 К), при которых зафиксированы изменения физико-механических параметров ПКМ (рис. 3), что позволяет установить особенности поведения макромолекул ПТФЭ.

Образцы с модифицированным диоксидом кремния характеризуются лучшими результатами механических испытаний, чем композиты с исходным наполнителем, независимо от температурного режима. При температуре 298 К образец 2 показал наиболее низкое значение прочности при растяжении (рис. 3, а), чем образец 3 с модифицированным SiO_2 , что обусловлено слабыми межфазными взаимодействиями между полимерной матрицей и наполнителем [35]. При температуре 223 К наблюдается

повышение прочности при растяжении у всех образцов относительно результатов, полученных при температуре 298 К. Такая закономерность обусловлена затормаживанием релаксационных эффектов макромолекул в полимере и повышением степени кристалличности при низкой температуре [36]. Установлено [37], что ПТФЭ склонен к хрупкому разрушению при температуре менее 254 К. Кроме того, немодифицированный SiO_2 может неравномерно распределяться в объеме полимера (см. рис. 1, б'), что предполагает формирование агломератов и дополнительных центров микронапряжения, приводящих к преждевременному разрыву ПКМ. Поведение исходного ПТФЭ и композитов при низкой температуре отличается от их поведения при комнатной температуре. Например, относительное удлинение при разрыве (рис. 3, б) при температуре 298 К с введением наполнителя меняется незначительно. В то же время при отрицательных значениях температуры наблюдается значительное изменение свойств, особенно зависящих от модифицирования наполнителя.



Этот эффект, по-видимому, обусловлен улучшенным межфазным взаимодействием модифицированного SiO_2 с полимерной матрицей ПТФЭ и его равномерным распределением (рис. 4) в нем, что в совокупности

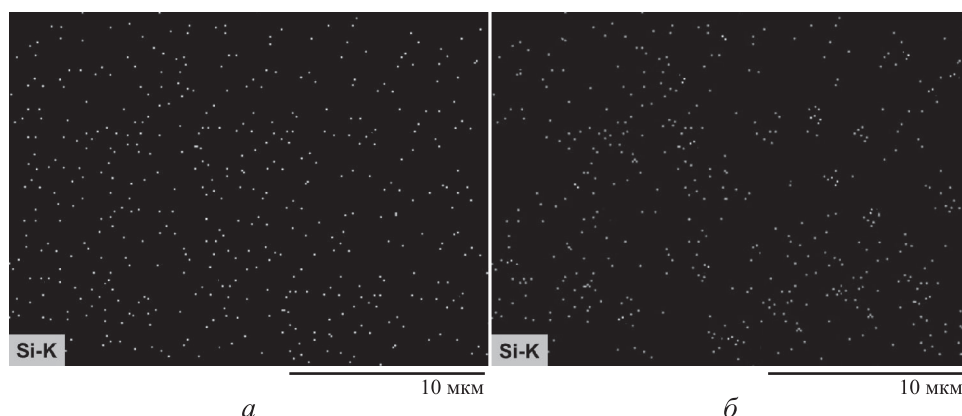


Рис. 4. Элементный анализ диоксида кремния в образцах 3 (а) и 2 (б)

предотвращает преждевременное разрушение материала. Так, частицы модифицированного SiO_2 эффективно заполняют объем аморфной фазы и тем самым упрочняют каркас полимерной матрицы. Это подтверждается повышением значений модуля упругости при сжатии (рис. 5) в образце 3 независимо от температурного режима по сравнению с образцом 2,

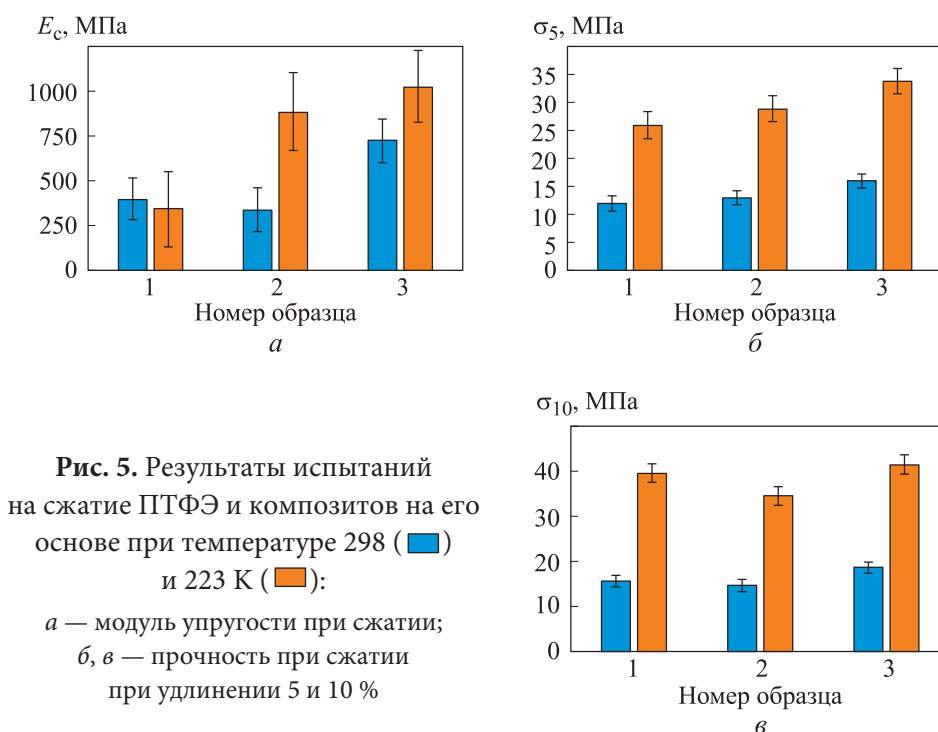


Рис. 5. Результаты испытаний на сжатие ПТФЭ и композитов на его основе при температуре 298 (■) и 223 К (■):
а — модуль упругости при сжатии;
б, в — прочность при сжатии при удлинении 5 и 10 %

где в качестве наполнителя выступал немодифицированный SiO_2 . С увеличением степени кристалличности полимера повышается его устойчивость к деформации [10, 38]. Условный предел текучести с повышением степени кристалличности не увеличивается, а остается постоянным при комнатной температуре. При более низких значениях температуры этот параметр с увеличением степени кристалличности снижается, что и наблюдается на рис. 3, в.

Механические параметры (модуль упругости при сжатии, напряжение при сжатии при заданной установленной деформации) могут быть получены в результате испытаний на сжатие и необходимы для полной характеристики механических свойств материалов.

Результаты сравнительного анализа (см. рис. 5) показывают, что композит с модифицированным SiO_2 демонстрирует повышенные модуль упругости и прочность при сжатии по сравнению с немодифицированным композитом, особенно при отрицательных значениях температуры. Это свидетельствует об увеличении жесткости материалов в связи с уменьшением теплового движения полимерных цепей, приводящего к снижению их гибкости, что согласуется с описанными выше результатами и подтверждается исследованиями [39, 40]. Улучшение механических характеристик связано с усилением взаимодействия на границе раздела фаз между наполнителем и полимерной матрицей, а также более равномерным и однородным распределением наночастиц в объеме полимера. Это способствует росту кристаллитов с формированием сферолитоподобных образований, а также структурированных и упорядоченных участков на надмолекулярной структуре ПКМ (см. рис. 1). В общем случае гетерогенные частицы выступают центрами нуклеации ПТФЭ, что приводит к росту правильных кристаллитов и степени кристалличности [41, 42]. В свою очередь степень кристалличности определяет уровень молекулярного порядка в системе и непосредственно влияет на жесткость и термостабильность композита [43]. Это согласуется с зафиксированными высокими значениями степени кристалличности (см. рис. 2) и температуры плавления композитов с модифицированным SiO_2 . Согласно [10], кристаллическая область прочнее аморфной во всем температурном интервале исследования при малой скорости деформации (как и в проведенном исследовании), т. е. увеличение степени кристалличности сопровождается повышением прочности. Кристаллические области также демонстрируют более высокую прочность по сравнению с аморфными во всем изученном температурном диапазоне [10], особенно при малой скорости деформации. Это полностью согласует-

ся с наблюдаемой корреляцией: увеличение степени кристалличности в композитах с модифицированным SiO_2 напрямую способствует росту их жесткости и прочности, что влияет на поведение ПКМ при сжатии. В случае ПТФЭ с немодифицированным SiO_2 , вследствие затрудненности равномерного распределения и агломерации наночастиц, зафиксированы низкие показатели модуля упругости и прочности при сжатии относительно второго ПКМ, однако значение модуля упругости выше исходного ПТФЭ при низких значениях температуры. Это обусловлено агломерацией наночастиц и их неравномерным распределением в матрице, что приводит к формированию дефектной надмолекулярной структуры с повышенной рыхлостью (см. рис. 1). Эти особенности кристаллизации приводят к образованию дефектных кристаллитов, что снижает эффективность упрочнения композита. Повышение температуры увеличивает подвижность цепей в аморфных областях полимера, что облегчает ориентацию макромолекул и упругое перемещение кристаллитов под воздействием нагрузки [44]. Однако в присутствии агломерированных наночастиц этот эффект приводит к концентрации напряжений вокруг них, являясь дополнительными центрами микронапряжений, что способствует инициации разрушения материала. Несмотря на увеличение молекулярной подвижности при комнатной температуре, агломераты наночастиц остаются дефектами структуры ПКМ, снижающими его прочность при сжатии относительно исходного ПТФЭ. В то же время при снижении температуры общая жесткость ПТФЭ-матрицы возрастает, а наночастицы, заполняя полимерную сетку, дополнительно усиливают материал, что уравнивает негативный эффект агломератов.

Следовательно, введение модифицированного SiO_2 сопровождается эффективным армированием ПТФЭ. Композит сохраняет прочностные характеристики при растяжении на уровне исходного полимера независимо от температуры и показывает повышенное значение модуля упругости и прочности при сжатии.

Заключение. Введение модифицированного SiO_2 в ПТФЭ приводит к повышению деформационно-прочностных свойств при двух температурных режимах, что обеспечивает способность композита сохранять форму и физико-механические параметры как при кратковременных, так и при длительных механических нагрузках. Следовательно, модифицирование наполнителя представляет собой эффективный способ улучшения деформационно-прочностных и термодинамических свойств ПКМ, что делает их более перспективными для применения в условиях повышенных механи-

ческих и тепловых нагрузок. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию состава и методов модифицирования для достижения еще более высоких показателей прочности, износостойкости и термостабильности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пудовкина О.И., Редькина Т.М., Соломонова В.Н. Стратегия развития арктической зоны России. *Перспективы науки*, 2018, № 3, с. 70–73.
- [2] Погостинская Н.Н., Погостинский Ю.А., Власова М.С. Измерение стратегии социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации. *Арктика: экология и экономика*, 2019, № 33, с. 21–33.
DOI: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-1-21-33>
- [3] Крутиков А.В., Смирнова О.О., Бочарова Л.К. Стратегия развития российской Арктики. Итоги и перспективы. *Арктика и Север*, 2020, № 40, с. 254–269.
DOI: <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2020.40.254>
- [4] Кондратов Н.А. Особенности развития транспортной инфраструктуры в Арктической зоне России. *Географический вестник*, 2017, № 4, с. 68–80.
DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-4-68-80>
- [5] Ульченко М.В., Башмакова Е.П. Проблемы развития транспортной инфраструктуры в регионах Арктической зоны Российской Федерации. *Экономика и управление: проблемы, решения*, 2018, № 11, с. 45–52. EDN: YUVQQX
- [6] Алексеева М.Б., Богачев В.Ф., Горенбургов М.А. Системная диагностика стратегии развития промышленности Арктики. *Записки горного института*, 2019, т. 238, с. 450–458. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.450>
- [7] Жуков М.А. Об оптимальном наборе критериев отнесения территорий к Арктической зоне Российской Федерации. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*, 2024, № 3, с. 462–469.
DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-462-469>
- [8] Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Fomin V.M. Designing machinery for the Arctic: a problem of socioeconomic development of Russia's Eastern regions. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2015, vol. 1, pp. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1019331615010104>
- [9] Apsosimova E., Tarasov N. On the issue of application of mining machines in the arctic conditions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 272, no. 3, art. 032066.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032066>
- [10] Rae P.J., Dattelbaum D.M. The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression. *Polymer*, 2004, vol. 45, no. 22, pp. 7615–7625.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.08.064>
- [11] Speerschneider C.J., Li C.H. A correlation of mechanical properties and microstructure of polytetrafluoroethylene at various temperatures. *J. Appl. Phys.*, 1963, vol. 34, no. 10, pp. 3004–3007. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1729110>

- [12] Deshwal D., Belgamwar S.U., Bekinal S.I., et al. Role of reinforcement on the tribological properties of polytetrafluoroethylene composites: a comprehensive review. *Polym. Compos.*, 2024, vol. 45, no. 16, pp. 14475–14497. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.28802>
- [13] Madhan K., Padmanaban R., Venkatesh G. Formulation and numerical investigation of PTFE-based composites for piston rings of oil free air compressors. In: Rajkumar K., Jayamani E., Ramkumar P. (eds). *Recent Advances in Materials Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore, Springer, 2022, pp. 87–98. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-3895-5_7
- [14] Yin M.H., Zhang Y.C., Zhou R.M., et al. Friction mechanism and application of PTFE coating in finger seals. *Tribol. Trans.*, 2022, vol. 65, no. 2, pp. 260–269. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2021.1949512>
- [15] Dhanumalayan E., Joshi G.M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) — a review. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 247–268. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>
- [16] Guo Q., Huang Y., Xu M., et al. PTFE porous membrane technology: a comprehensive review. *J. Membr. Sci.*, 2022, vol. 664, art. 121115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121115>
- [17] Kornopoltsev V.N., Mogonov D.M., Ayurova O.Z., et al. New tribological composites based on polytetrafluoroethylene. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 108–111. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075113317010208>
- [18] Vishal K., Rajkumar K., Sabarinathan P. Effect of recovered silicon filler inclusion on mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) composite. *Silicon*, 2022, vol. 14, no. 9, pp. 4601–4610. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01250-w>
- [19] Qu M., Yao Y., He J., et al. Tribological study of polytetrafluoroethylene lubricant additives filled with Cu microparticles or SiO₂ nanoparticles. *Tribol. Int.*, 2017, vol. 110, pp. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.02.010>
- [20] Shi X., Wu C., Rong M., et al. Improvement of creep resistance of polytetrafluoroethylene films by nano-inclusions. *Chin. J. Polym. Sci.*, 2013, vol. 31, no. 3, pp. 377–387. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10118-013-1225-8>
- [21] Xie H., Jiang B., He J., et al. Lubrication performance of MoS₂ and SiO₂ nanoparticles as lubricant additives in magnesium alloy-steel contacts. *Tribol. Int.*, 2016, vol. 93-A, pp. 63–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.009>
- [22] Ge X., Xia Y., Cao Z. Tribological properties and insulation effect of nanometer TiO₂ and nanometer SiO₂ as additives in grease. *Tribol. Int.*, 2015, vol. 92, pp. 454–461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.031>
- [23] Shen J.T., Top M., Pei Y.T., et al. Wear and friction performance of PTFE filled epoxy composites with a high concentration of SiO₂ particles. *Wear*, 2015, vol. 322–323, pp. 171–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.11.015>

- [24] Peng D.X., Kang Y., Hwang R.M., et al. Tribological properties of diamond and SiO₂ nanoparticles added in paraffin. *Tribol. Int.*, 2009, vol. 42, no. 6, pp. 911–917. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.12.015>
- [25] Liu F., Jin Y., Jiang W., et al. Improved coefficient thermal expansion and mechanical properties of PTFE composites for high-frequency communication. *Compos. Sci. Technol.*, 2023, vol. 241, art. 110142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110142>
- [26] Lin J., Chen H., Yao L. Surface tailoring of SiO₂ nanoparticles by mechanochemical method based on simple milling. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, vol. 256, no. 20, pp. 5978–5984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.03.105>
- [27] Hua D., Tang J., Jiang J., et al. Controlled grafting modification of silica gel via RAFT polymerization under ultrasonic irradiation. *Mater. Chem. Phys.*, 2009, vol. 114, no. 1, pp. 402–406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.09.046>
- [28] Thissen P., Seitz O., Chabal Y.J. Wet chemical surface functionalization of oxide-free silicon. *Prog. Surf. Sci.*, 2012, vol. 87, no. 9–12, pp. 272–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2012.10.003>
- [29] Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М., Химия, 1977.
- [30] Соломко В.П. Наполненные кристаллизующиеся полимеры. Киев, Наукова думка, 1980.
- [31] Smolyanskii A.S., Arsentyev M.A., Rashkovskii A.Y., et al. Radiation-induced changes in the degree of crystallinity of powdered polytetrafluoroethylene. *Crystallogr. Rep.*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 553–558. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063774519040205>
- [32] Логинов Б.А. Удивительный мир фторполимеров. М., Девятый элемент, 2009.
- [33] Шелестова В.А., Коваль И.В., Башлакова А.Л. Влияние анизотропии фторопластовых композитов и концентрации наполнителя на коэффициент линейного теплового расширения. *Полимерные материалы и технологии*, 2019, №. 3, с. 64–68. EDN: IWBQDA
- [34] Jiang Z., Yuan Y. Effects of particle size distribution of silica on properties of PTFE/SiO₂ composites. *Mater. Res. Express*, 2018, vol. 5, no. 6, art. 066306. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aac99f>
- [35] Chen Y.C., Lin H.C., Lee Y.D. The effects of filler content and size on the properties of PTFE/SiO₂ composites. *J. Polym. Res.*, 2003, vol. 10, no. 4, pp. 247–258. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JPOL.0000004620.71900.16>
- [36] Rae P.J., Brown E.N. The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in tension. *Polymer*, 2005, vol. 46, no. 19, pp. 8128–8140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.06.120>
- [37] Brown E.N., Rae P.J., Orlor E.B., et al. The effect of crystallinity on the fracture of polytetrafluoroethylene (PTFE). *Mater. Sci. Eng. C*, 2006, vol. 26, no. 8, pp. 1338–1343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2005.08.009>

- [38] Машков Ю.К. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. М., Машиностроение, 2005.
- [39] Brown E.N., Rae P.J., Gray G.T. The influence of temperature and strain rate on the tensile and compressive constitutive response of four fluoropolymers. *J. Phys. IV*, 2006, vol. 134, pp. 935–940. DOI: <https://doi.org/10.1051/jp4:2006134143>
- [40] Chen C., Guo Z., Tang E. Determination of elastic modulus, stress relaxation time and thermal softening index in ZWT constitutive model for reinforced Al/PTFE. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 3, art. 702. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15030702>
- [41] Negrov D.A., Eremin E.N. The influence of ultrasonic exposure on polytetrafluoroethylene structure modified with boron nitride. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 858, art. 012021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/858/1/012021>
- [42] Bosq N., Guigo N., Persello J., et al. Crystallization of polytetrafluoroethylene in a wide range of cooling rates: nucleation and diffusion in the presence of nanosilica clusters. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 9, art. 1797. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24091797>
- [43] Orman S., Dogu M., Ozbek B. Optimization of the *filament* winding process for glass fiber-reinforced PPS and PP composites using Box — Behnken design. *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 24, art. 3488. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16243488>
- [44] Feng B., Fang X., Wang H.X., et al. The effect of crystallinity on compressive properties of Al–PTFE. *Polymers*, 2016, vol. 8, no. 10, art. 356. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym8100356>

Сивцева-Гладкина Наталия Павловна — младший научный сотрудник Института естественных наук СВФУ (Российская Федерация, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58).

Спирidonov Александр Михайлович — канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией Института естественных наук СВФУ (Российская Федерация, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58).

Данилова Сахаяна Николаевна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института естественных наук СВФУ (Российская Федерация, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58).

Капитонова Юлия Валерьевна — канд. хим. наук, старший научный сотрудник Института естественных наук СВФУ (Российская Федерация, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58).

Тарасова Прасковья Николаевна — младший научный сотрудник Института естественных наук СВФУ (Российская Федерация, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58).

Охлопкова Айталиа Алексеевна — д-р техн. наук, профессор Института естественных наук СВФУ (Российская Федерация, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Сивцева-Гладкина Н.П., Спиридонов А.М., Данилова С.Н., и др. Механические свойства композитов на основе политетрафторэтилена с модифицированным диоксидом кремния в зависимости от температуры. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2026, № 4 (127), с. 97–117. EDN: QWEVFX

MECHANICAL PROPERTIES OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE-BASED COMPOSITES WITH MODIFIED SILICON DIOXIDE: A TEMPERATURE-DEPENDENT STUDY

N.P. Sivtseva-Gladkina

A.M. Spiridonov

S.N. Danilova

Yu.V. Kapitonova

P.N. Tarasova

A.A. Okhlopkova

lan41453@gmail.com

spalmik@mail.ru

dsn.sakhayana@mail.ru

kapitonova-kirillina@mail.ru

pn.tarasova@gmail.com

okhlopkova@yandex.ru

NEFU, Yakutsk, Russian Federation

Abstract

The article provides a comprehensive study of the effect of modified silicon dioxide on the physical, mechanical, and thermodynamic properties of polytetrafluoroethylene-based polymer composites on in a wide range of temperatures, including cryogenic conditions typical of the Arctic. It was demonstrated that modifying the filler surface with aluminum chloride improves interfacial interaction with the polymer matrix, promotes the formation of a more ordered supramolecular structure, and increases the degree of crystallinity of the composite. X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy, and differential scanning calorimetry revealed that the introduction of the modified filler leads to a decrease in the coefficient of linear thermal expansion and an increase in the enthalpy of fusion. Mechanical testing revealed increased tensile and compressive strength, compressive modulus, and stability of properties at subzero temperatures for composites with modified silica compared to pure polytetrafluoroethylene and a composite with an unmodified filler. It was established that the key factor in improving performance is effective reinforcement of the polymer matrix through uniform distribution of filler particles and enhanced

Keywords

Polytetrafluoroethylene, composite, silicon dioxide, climate testing, low temperature, Arctic

adhesion at the phase interface due to aluminum cations adsorbed on the SiO₂ surface. The obtained results demonstrate the potential of using modified silicon oxide to create polymer composites resistant to extreme Arctic climatic conditions

Received 07.10.2025

Accepted 05.11.2025

© Author(s), 2026

The work was carried out as part of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation "Fundamental Principles of Creating New Polymer Materials for Technical and Medical Applications with Controlled and Self-Organizing Properties" (FSRG-2024-0004)

REFERENCES

- [1] Pudovkina O.I., Redkina T.M., Solomonova V.N. The development strategy of the Arctic zone of Russia. *Perspektivy nauki* [Science Prospects], 2018, no. 3, pp. 70–73 (in Russ.).
- [2] Pogostinskaya N.N., Pogostinskiy Yu.A., Vlasova M.S. Measuring the strategy for socio-economic development of the Russian Arctic zone. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economy], 2019, no. 33, pp. 21–33 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-1-21-33>
- [3] Krutikov A.V., Smirnova O.O., Bocharova L.K. Strategy for the development of the Russian Arctic. Results and prospects. *Arktika i Sever* [Arctic and North], 2020, no. 40, pp. 254–269 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2020.40.254>
- [4] Kondratov N.A. Development of transport infrastructure in the Arctic zone of Russia. *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin], 2017, no. 4, pp. 68–80 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-4-68-80>
- [5] Ulchenko M.V., Bashmakova E.P. Problems of development of transport infrastructure in regions of the Arctic zone of the Russian Federation. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*, 2018, no. 11, pp. 45–52 (in Russ.). EDN: YUVQQX
- [6] Alekseeva M.B., Bogachev V.F., Gorenburgov M.A. Systemic diagnostics of the arctic industry development strategy. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2019, vol. 238, pp. 450–458 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.4.450>
- [7] Zhukov M.A. An optimal set of criteria for the allocation of territories within the Arctic zone of the Russian Federation. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki* [Arctic and Subarctic Natural Resources], 2024, no. 3, pp. 462–469 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-462-469>
- [8] Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Fomin V.M. Designing machinery for the Arctic: a problem of socioeconomic development of Russia's Eastern regions. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2015, vol. 1, pp. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1019331615010104>
- [9] Apsosimova E., Tarasov N. On the issue of application of mining machines in the Arctic conditions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 272, no. 3, art. 032066. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032066>

- [10] Rae P.J., Dattelbaum D.M. The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in compression. *Polymer*, 2004, vol. 45, no. 22, pp. 7615–7625.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.08.064>
- [11] Speersschneider C.J., Li C.H. A correlation of mechanical properties and microstructure of polytetrafluoroethylene at various temperatures. *J. Appl. Phys.*, 1963, vol. 34, no. 10, pp. 3004–3007. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1729110>
- [12] Deshwal D., Belgamwar S.U., Bekinal S.I., et al. Role of reinforcement on the tribological properties of polytetrafluoroethylene composites: a comprehensive review. *Polym. Compos.*, 2024, vol. 45, no. 16, pp. 14475–14497.
DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.28802>
- [13] Madhan K., Padmanaban R., Venkatesh G. Formulation and numerical investigation of PTFE-based composites for piston rings of oil free air compressors. In: Rajkumar K., Jayamani E., Ramkumar P. (eds). *Recent Advances in Materials Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore, Springer, 2022, pp. 87–98.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-3895-5_7
- [14] Yin M.H., Zhang Y.C., Zhou R.M., et al. Friction mechanism and application of PTFE coating in finger seals. *Tribol. Trans.*, 2022, vol. 65, no. 2, pp. 260–269.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2021.1949512>
- [15] Dhanumalayan E., Joshi G.M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) — a review. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 247–268. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>
- [16] Guo Q., Huang Y., Xu M., et al. PTFE porous membrane technology: a comprehensive review. *J. Membr. Sci.*, 2022, vol. 664, art. 121115.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121115>
- [17] Kornopoltsev V.N., Mogonov D.M., Ayurova O.Z., et al. New tribological composites based on polytetrafluoroethylene. *Inorg. Mater. Appl. Res.*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 108–111. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075113317010208>
- [18] Vishal K., Rajkumar K., Sabarinathan P. Effect of recovered silicon filler inclusion on mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) composite. *Silicon*, 2022, vol. 14, no. 9, pp. 4601–4610.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01250-w>
- [19] Qu M., Yao Y., He J., et al. Tribological study of polytetrafluoroethylene lubricant additives filled with Cu microparticles or SiO₂ nanoparticles. *Tribol. Int.*, 2017, vol. 110, pp. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.02.010>
- [20] Shi X., Wu C., Rong M., et al. Improvement of creep resistance of polytetrafluoroethylene films by nano-inclusions. *Chin. J. Polym. Sci.*, 2013, vol. 31, no. 3, pp. 377–387. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10118-013-1225-8>
- [21] Xie H., Jiang B., He J., et al. Lubrication performance of MoS₂ and SiO₂ nanoparticles as lubricant additives in magnesium alloy-steel contacts. *Tribol. Int.*, 2016, vol. 93-A, pp. 63–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.009>

- [22] Ge X., Xia Y., Cao Z. Tribological properties and insulation effect of nanometer TiO_2 and nanometer SiO_2 as additives in grease. *Tribol. Int.*, 2015, vol. 92, pp. 454–461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.031>
- [23] Shen J.T., Top M., Pei Y.T., et al. Wear and friction performance of PTFE filled epoxy composites with a high concentration of SiO_2 particles. *Wear*, 2015, vol. 322–323, pp. 171–180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.11.015>
- [24] Peng D.X., Kang Y., Hwang R.M., et al. Tribological properties of diamond and SiO_2 nanoparticles added in paraffin. *Tribol. Int.*, 2009, vol. 42, no. 6, pp. 911–917. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.12.015>
- [25] Liu F., Jin Y., Jiang W., et al. Improved coefficient thermal expansion and mechanical properties of PTFE composites for high-frequency communication. *Compos. Sci. Technol.*, 2023, vol. 241, art. 110142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110142>
- [26] Lin J., Chen H., Yao L. Surface tailoring of SiO_2 nanoparticles by mechanochemical method based on simple milling. *Appl. Surf. Sci.*, 2010, vol. 256, no. 20, pp. 5978–5984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.03.105>
- [27] Hua D., Tang J., Jiang J., et al. Controlled grafting modification of silica gel via RAFT polymerization under ultrasonic irradiation. *Mater. Chem. Phys.*, 2009, vol. 114, no. 1, pp. 402–406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.09.046>
- [28] Thissen P., Seitz O., Chabal Y.J. Wet chemical surface functionalization of oxide-free silicon. *Prog. Surf. Sci.*, 2012, vol. 87, no. 9–12, pp. 272–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2012.10.003>
- [29] Lipatov Yu.S. Fizicheskaya khimiya napolnennykh polimerov [Physical chemistry of filled polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1977.
- [30] Solomko V.P. Napolnennyye kristallizuyushchiesya polimery [Filled crystallizable polymers]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1980.
- [31] Smolyanskii A.S., Arsenyev M.A., Rashkovskii A.Y., et al. Radiation-induced changes in the degree of crystallinity of powdered polytetrafluoroethylene. *Crystallogr. Rep.*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 553–558. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063774519040205>
- [32] Loginov B.A. Udivitelnyy mir ftorpolimerov [Amazing world of fluoropolymers]. Moscow, Devyatyy element Publ., 2009.
- [33] Shelestova V.A., Koval I.V., Bashlakova A.L. Effect of the anisotropy of fluoroplastic composites and the filler concentration on the coefficient of linear thermal expansion. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2019, no. 3, pp. 64–68. EDN: IWBQDA
- [34] Jiang Z., Yuan Y. Effects of particle size distribution of silica on properties of PTFE/ SiO_2 composites. *Mater. Res. Express*, 2018, vol. 5, no. 6, art. 066306. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aac99f>

- [35] Chen Y.C., Lin H.C., Lee Y.D. The effects of filler content and size on the properties of PTFE/SiO₂ composites. *J. Polym. Res.*, 2003, vol. 10, no. 4, pp. 247–258.
DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JPOL.0000004620.71900.16>
- [36] Rae P.J., Brown E.N. The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in tension. *Polymer*, 2005, vol. 46, no. 19, pp. 8128–8140.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.06.120>
- [37] Brown E.N., Rae P.J., Orlor E.B., et al. The effect of crystallinity on the fracture of polytetrafluoroethylene (PTFE). *Mater. Sci. Eng. C*, 2006, vol. 26, no. 8, pp. 1338–1343.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2005.08.009>
- [38] Mashkov Yu.K. Kompozitsionnye materialy na osnove politetraftoretilena. Strukturnaya modifikatsiya [Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005.
- [39] Brown E.N., Rae P.J., Gray G.T. The influence of temperature and strain rate on the tensile and compressive constitutive response of four fluoropolymers. *J. Phys. IV*, 2006, vol. 134, pp. 935–940. DOI: <https://doi.org/10.1051/jp4:2006134143>
- [40] Chen C., Guo Z., Tang E. Determination of elastic modulus, stress relaxation time and thermal softening index in ZWT constitutive model for reinforced Al/PTFE. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 3, art. 702. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15030702>
- [41] Negrov D.A., Eremin E.N. The influence of ultrasonic exposure on polytetrafluoroethylene structure modified with boron nitride. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 858, art. 012021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/858/1/012021>
- [42] Bosq N., Guigo N., Persello J., et al. Crystallization of polytetrafluoroethylene in a wide range of cooling rates: nucleation and diffusion in the presence of nanosilica clusters. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 9, art. 1797.
DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24091797>
- [43] Orman S., Dogu M., Ozbek B. Optimization of the *filament* winding process for glass fiber-reinforced PPS and PP composites using Box — Behnken design. *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 24, art. 3488. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16243488>
- [44] Feng B., Fang X., Wang H.X., et al. The effect of crystallinity on compressive properties of Al-PTFE. *Polymers*, 2016, vol. 8, no. 10, art. 356.
DOI: <https://doi.org/10.3390/polym8100356>

Sivtseva-Gladkina N.P. — Junior Researcher, Institute of Natural Sciences, NEFU (Belinskogo ul. 58, Yakutsk, 677000 Russian Federation).

Spiridonov A.M. — Cand. Sc. (Chem.), Leading Researcher, Head of the Laboratory, Institute of Natural Sciences, NEFU (Belinskogo ul. 58, Yakutsk, 677000 Russian Federation).

Danilova S.N. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Natural Sciences, NEFU (Belinskogo ul. 58, Yakutsk, 677000 Russian Federation).

Kapitonova Yu.V. — Cand. Sc. (Chem.), Senior Researcher, Institute of Natural Sciences, NEFU (Belinskogo ul. 58, Yakutsk, 677000 Russian Federation).

Tarasova P.N. — Junior Researcher, Institute of Natural Sciences, NEFU (Belinskogo ul. 58, Yakutsk, 677000 Russian Federation).

Okhlopko A.A. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Institute of Natural Sciences, NEFU (Belinskogo ul. 58, Yakutsk, 677000 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Sivtseva-Gladkina N.P., Spiridonov A.M., Danilova S.N., et al. Mechanical properties of polytetrafluoroethylene-based composites with modified silicon dioxide: a temperature-dependent study. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2026, no. 4 (127), pp. 97–117 (in Russ.). EDN: QWEVFX