

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ / MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL TECHNOLOGIES

УДК 620.3

EDN: VZXHCE

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-314-322>



Оригинальная статья

Влияние режимов получения ПКМ на основе матрицы из политетрафторэтилена, модифицированного наноразмерным порошком ZrO_2 , на триботехнические свойства

Андрей Анатольевич Теплоухов^{✉,1}, Александр Романович Закранцов^{1,2},
Анастасия Евгеньевна Терехина¹, Денис Александрович Вебер¹

¹Омский государственный технический университет, пр. Мира, 11, г. Омск, 644050, Российская Федерация

²Омский научный центр СО РАН, пр. Карла Маркса, 15, г. Омск, 644024, Российская Федерация

✉ a.a.lektor@mail.ru

Аннотация

Существенным недостатком политетрафторэтилена является высокая скорость износа при трении, для устранения которого в матрицу из полимера добавляют различные модифицирующие наполнители. Исследуется влияние методов получения полимерного композиционного материала на основе матрицы из ПТФЭ, модифицированного наноразмерным порошком диоксида циркония, на его триботехнические свойства. Проведен сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований образцов, полученных разными методами. Первый метод изготовления полимерных композиционных материалов предусматривает режим сушки исходных компонентов в печи при температуре 120 °С и быстрое остывание композитов на воздухе. Альтернативный подход к получению композитов включает процесс дегидратации исходных порошков в вакуумном сушильном шкафу при температуре 150 °С в течение 4 ч с последующим спеканием и медленным контролируемым остыванием композита в печи (0,3 °С в минуту). Методом оптической микроскопии проведен анализ поверхностей трения образцов и контртел после испытаний на износ. Определены основные и второстепенные виды износа (абразивный, адгезионный и усталостный). Рассчитаны интенсивности и коэффициенты износа, свидетельствующие о повышении износостойкости образцов полимерных композитных материалов, изготовленных методом, предусматривающим процесс дегидратации и медленного контролируемого остывания после спекания. По результатам испытаний на разрыв рассчитаны механические характеристики образцов, такие как предел прочности, относительное удлинение и модуль упругости. Определен механизм повышения износостойкости образцов в зависимости от метода изготовления, заключающийся в удалении остаточных гидроксильных групп и формировании крупных упорядоченных ламеллярных структур. Разработанный полимерный композиционный материал может использоваться в металлополимерных узлах сухого трения.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, диоксид циркония, композиционный материал, триботехнические свойства, износостойкость

Финансирование. Исследование выполнено без финансирования.

Для цитирования: Теплоухов А.А., Закранцов А.Р., Терехина А.Е., Вебер Д.А. Влияние режимов получения ПКМ на основе матрицы из политетрафторэтилена, модифицированного наноразмерным порошком ZrO_2 , на триботехнические свойства. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(2):314–322. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-314-322> EDN: VZXHCE

Influence of fabrication regimes on the tribotechnical properties of PTFE-based composites modified with nanosized ZrO_2 powder

Andpei A. Teploukhov^{✉,1}, Aleksandr R. Zakrantsov^{1,2}, Anastasia E. Terekhina¹, Denis A. Weber¹

¹Omsk State Technical University, 11, Mira Ave., Omsk, Russian Federation, 644050

²Omsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 15, Karl Marx Ave., Omsk, Russian Federation, 644024

✉a.a.lektor@mail.ru

Abstract

A significant drawback of polytetrafluoroethylene (PTFE) is its high wear rate under friction, which is addressed by adding various modifying fillers to the polymer matrix. This study aimed to determine the effect of the fabrication method of a polymer composite material based on a PTFE matrix filled with nanoscale zirconium dioxide (ZrO_2) powder on its tribological properties. A comparative analysis was conducted on samples produced using two different methods. The first method involved drying the starting components in an oven at 120 °C, followed by rapid air cooling of the composites. The alternative approach consisted of dehydrating the starting powders in a vacuum oven at 150 °C for 4 hours, followed by sintering and slow, controlled cooling of the composite inside the furnace at a rate of 0.3 °C per minute. Optical microscopy was used to analyze the friction surfaces of the specimens and counterfaces after wear testing. Primary and secondary wear mechanisms (abrasive, adhesive, and fatigue) were identified. The wear intensities and coefficients were calculated, revealing increased wear resistance for the composites manufactured using the method that involved dehydration and slow, controlled cooling after sintering. From the tensile test results, mechanical properties such as tensile strength, relative elongation, and elastic modulus were determined. A mechanism for the increased wear resistance dependent on the fabrication method is proposed, consisting of the removal of residual hydroxyl groups and the formation of large, ordered lamellar structures. Thus, the developed polymer composite material is suitable for use in metal-polymer dry friction units.

Keywords: polytetrafluoroethylene, zirconium dioxide, composite material, tribotechnical properties, wear resistance
Funding. This research received no external funding.

For citation: Teploukhov A.A., Zakrantsov A.R., Terekhina A.E., Weber D.A. Influence of fabrication regimes on the tribotechnical properties of PTFE-based composites modified with nanosized ZrO_2 powder. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(2):314–322. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-314-322> EDN: VZXHCE

Введение

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) – синтетический фторполимер, характеризующийся уникальными физико-механическими и триботехническими свойствами, которые позволяют широко применять ПТФЭ в качестве твердого смазывающего материала для работы в вакууме и газовой среде в широком интервале температур [1]. ПТФЭ обладает высокой тепло- и морозостойкостью, сохраняет свои свойства в интервале температур от –70 до 270 °C. Данный материал характеризуется низким поверхностным натяжением, не смачивается водой, жирами и большинством органических растворителей. Особенности молекулярной структуры ПТФЭ обуславливают уникальное сочетание деформационно-прочностных, антикоррозионных, теплофизических и дру-

гих эксплуатационных характеристик изделий из рассматриваемого материала [2].

Политетрафторэтилен широко применяют в электро- и радиотехнике в качестве изоляционного материала для проводов, кабелей, конденсаторов, а также устройств, работающих в агрессивных средах при повышенных и пониженных температурах [3]. ПТФЭ рассматривают в качестве материала для изготовления подшипников, работающих без смазки в агрессивных средах. Данный полимер является абсолютным фаворитом среди множества фторсодержащих полимерных материалов по разнообразию областей применения, включающих атомную энергетику, химическую промышленность, авиацию, микроэлектронику, электротехнику, медицину и т. д. [4].

Однако в применении рассматриваемого фтор-полимера имеются существенные недостатки. В политетрафторэтилене развиваются необратимые пластические деформации при относительно низких нагрузках и температурах. Так, при температуре 25 °С и нагрузке в 10 МПа, что в 2 раза меньше разрывной прочности ПТФЭ, за 1 ч развиваются необратимые деформации, составляющие более 200 % относительно исходных геометрических размеров образца [5]. Несмотря на очень низкий коэффициент трения, интенсивность износа узлов и деталей из ПТФЭ оказывается недопустимо высокой [6].

Для устранения описанных недостатков применяются различные методы модификации рассматриваемого полимера. На протяжении десятилетий для повышения механических свойств ПТФЭ успешно используются наполнители при создании полимерных композиционных материалов (ПКМ) на его основе [7]. В матрицу из политетрафторэтилена вводятся наполнители, оказывающие влияние на механические и антифрикционные свойства получаемого ПКМ: стекловолокно [8], графит [9], оксиды металлов (Al_2O_3 и т. д.) [10], различные нанопорошки и наночастицы (углеродные нанотрубки, технический углерод, фуллерены, дисульфид молибдена, диоксид кремния и т. д.) [11]. Как правило, вводимые наполнители характеризуются размерами от нескольких нанометров до сотен микрометров. Процесс изготовления композитов включает прессование порошков матрицы и наполнителя с последующим спеканием в различных температурных режимах. Введение в состав ПТФЭ различных наполнителей позволяет значительно изменять эксплуатационные, физико-механические и другие свойства получаемых композитов. Данный метод модификации характеризуется существенными ограничениями. Неверный подбор концентрации наполнителя и/или режима приготовления композита способно привести к ухудшению свойств ПКМ, деградации физико-механических и эксплуатационных характеристик. Вводимые наполнители не должны препятствовать образованию жидкокристаллического состояния и вызывать ограничения в подвижности и ориентации молекулярных цепей полимера для задач, связанных с триботехническими свойствами композита.

В ходе литературного обзора определено, что перспективным наполнителем, повышающим механические и триботехнические свойства ПТФЭ,

является порошок диоксида циркония (ZrO_2) [12–14]. Добавление данного наполнителя в состав полимерной матрицы в концентрации до 12 % способно приводить к улучшению триботехнических свойств, не снижая других характеристик. При этом добавление в ПТФЭ более 12 % ZrO_2 приводит к хрупкому разрушению композита [15].

Целью работы является установление влияния метода получения ПКМ с матрицей из ПТФЭ и наполнителем в виде наноразмерного диоксида циркония на его триботехнические свойства.

Для исследования влияния режимов получения на триботехнические свойства рассматриваемого ПКМ были определены следующие задачи:

1. Получить образцы ПКМ двумя методами.
2. Провести триботехнические испытания для определения интенсивности и коэффициента износа.
3. Провести механические испытания на разрыв для определения предела прочности, относительного удлинения и модуля упругости.
4. Определить основные и второстепенные виды износа образцов.
5. Определить механизмы улучшения свойств ПТФЭ.

Материалы и методы

В качестве прекурсоров для матрицы исследуемого в работе композитного материала выбран порошок ПТФЭ марки RX015 с наполнителем в виде коммерческого наноразмерного порошка диоксида циркония. По результатам анализа ранее проведенных исследований определено, что оптимальное содержание наполнителя в полимерной матрице составляет 8 %. Данная концентрация ZrO_2 не приводит к излишнему повышению твердости и охрупчиванию композита, как при концентрациях 12 % и более [16].

Образцы ПКМ № 1 получены методом холодного статического прессования с последующим спеканием. Перед прессованием образцов исходные компоненты смеси сушились в печи при температуре 120 °С и перемешивались в механоактивирующей машине 60 мин. Формирование заготовок проводилось на гидравлической установке ЛСД 700 под давлением 40 МПа и выдержке длительностью 10 мин. Спекание происходило в электрической печи WiseTherm FNХ-12, а нагревание осуществлялось в пресс-форме, ступенчато до температуры 380 °С, сдерживающей расширение композита. После спекания

образцы охлаждались в камере печи до 70 °С, а далее – на воздухе до комнатной температуры [14].

Образцы модифицированного ПТФЭ № 2 также получены методом холодного статического прессования с дальнейшим спеканием. На первом этапе изготовления проводилась дегидратация компонентов смеси композиционного материала (ПТФЭ и диоксида циркония) в вакуумном сушильном шкафу при температуре 150 °С, длительностью 4 ч. Далее проводилась механическая активация подготовленной смеси в лабораторной ножевой мельнице в течение 5 мин, со скоростью вращения ножей 2500 об./мин. После образцы подвергались холодному статическому прессованию при давлении 80 МПа и времени выдержки 60 с на установке ГМС-50 [17, 18]. Заключительным этапом изготовления композита являлось свободное спекание спрессованных заготовок в программируемой лабораторной печи СНОЛ7/10. Режим спекания образцов заключался в плавном нагреве до 380 °С со скоростью 2 °С/мин и последующей выдержке при температуре 380 °С. Далее проводилось ступенчатое регулируемое охлаждение со скоростью 0,3 °С/мин до 327 °С и выдержкой длительностью 30 мин. Охлаждение образцов до комнатной температуры проводилось в камере печи [19].

Для определения трибологических характеристик образцов проводились испытания на универсальной машине трения УМТ-2168. Методика испытаний предусматривала исследование износостойкости образцов в условиях сухого трения по схеме штифт–диск при комнатной температуре. В качестве контртела использовался диск из закаленной стали 45 (ГОСТ 11629–2017). При проведении испытаний к образцам прикладывалась нагрузка 470 Н, линейная скорость скольжения составляла 0,75 м/с при длительности испытаний около 180 мин. Согласно представленным данным, путь трения образцов составлял 8100 м. Исследуемые образцы штифтов имели диаметр $(5 \pm 0,5)$ мм и высоту (15 ± 3) мм.

До и после исследования трибологических характеристик образцы взвешивались на высокоточных аналитических весах IBRA-220HTR с точностью измерения до 0,0001 г для определения интенсивности массового износа. Исследование поверхности трения композитов и контртела проводились на инвертированном оптическом микроскопе SIAMS MT-45.

Определение механических свойств образцов при растяжении (предел прочности, относитель-

ное удлинение) проводилось согласно ГОСТу 11262–2017 на универсальной испытательной разрывной машине Zwick/Roell TH Z010. Разрыв образцов осуществлялся при постоянной скорости растяжения 10 мм/мин. Модуль упругости определялся на начальном участке деформации образца по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 25.601–80.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены микрофотографии поверхностей рассматриваемых образцов ПТФЭ и соответствующих им контртел после проведения испытаний на износ. По представленным изображениям определено, что поверхности трения после испытаний демонстрируют значительный износ. Одним из видов износа, вызванного трением, является адгезионный, приводящий к износу вторичных структур в виде пленок переноса, проявляющихся как отдельные многоцветные фрагменты на поверхности контртела [20]. Указанный тип износа, обусловленный адгезионным воздействием в системе металл–полимер, может иметь положительный характер. Формирующаяся на поверхности полимерная пленка

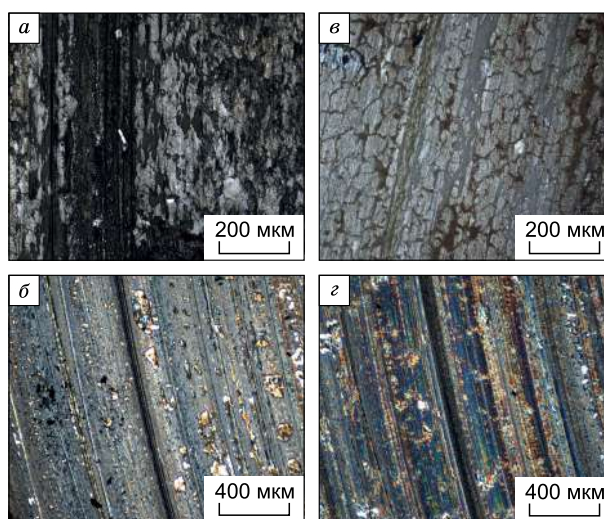


Рис. 1. Микрофотографии поверхностей трения образцов и контртел:

a – образец № 1; *б* – контртело, соответствующее образцу № 1; *в* – образец № 2; *г* – контртело, соответствующее образцу № 2

Fig. 1. Micrographs of the friction surfaces of the samples and counterbodies:

a – sample No. 1; *б* – counterbody corresponding to sample No. 1; *в* – sample No. 2; *г* – counterbody corresponding to sample No. 2

выполняет функцию твердой смазки, что способствует снижению коэффициента трения и, как следствие, уменьшению интенсивности изнашивания [20].

Другим видом износа ПТФЭ является абразивный, проявляющийся в виде множественных борозд на поверхностях образцов и контртел. Данный вид износа вызван воздействием твердых частиц диоксида циркония, используемого в качестве наполнителя ПТФЭ, на поверхности трения [21]. Еще существует усталостный износ, который проявляется в виде распространения усталостных трещин на поверхности композита с ПТФЭ, вследствие многократной повторяющейся нагрузки.

В ходе анализа представленных изображений (см. рис. 1) определено, что для образцов № 1 наиболее интенсивными являются адгезионный и абразивный виды износов, в то время как для образцов № 2 более выражен усталостный износ, проявляющийся в виде множественных трещин, которые распространяются по всей поверхности.

По полученным значениям потери массы после испытаний на износ определяем [20] среднее значение скорости износа

$$J = \Delta m / t, \quad (1)$$

где Δm – потеря массы; t – длительность испытаний на износ;

и коэффициент износа

$$K = \Delta m / (\rho N L), \quad (2)$$

где Δm – потеря массы; ρ – плотность образца; N – нагрузка; L – путь трения.

В табл. 1 приведены полученные средние значения износа и коэффициента износа.

При сравнении рассчитанных данных для образцов ПТФЭ, модифицированных диоксидом циркония (см. табл. 1), с литературными данными для исходного ПТФЭ определено, что добавление ZrO_2 позволяет значительно снизить интенсивность и коэффициент износа [22].

Предполагается, что улучшение триботехнических свойств рассматриваемых композитов связано с тем, что наночастицы диоксида циркония, диспергированные в матрице из ПТФЭ, подавляют межслойное скольжение, повышая устойчивость к сдвиговой деформации. Более того, в работе [23] определено, что добавление диоксида циркония в состав полимера приводит к повышению толщины пленки переноса, за счет чего наблюдается лучшее скольжение образцов из ПКМ при трении. При анализе рассчитанных данных также определено, что образцы ПТФЭ № 2 характеризуются меньшими значениями интенсивности износа и коэффициента износа (см. табл. 1).

Повышение стойкости образцов к трению может быть связано с применением процесса дегидратации исходных компонентов порошков матрицы и наполнителя при изготовлении образцов по методике № 2. Дегидратация при температуре 150 °С длительностью 4 ч позволяет удалить из порошков адсорбированную влагу и остаточные растворители, которые могут препятствовать формированию однородной структуры композита за счет образования водных и паровых прослоек в процессе спекания [24]. ПТФЭ спекается при температуре 370–380 °С, при этом происходит важный процесс коалесценции частиц, а наличие паровой или жидкой фазы может препятствовать формированию прочной межфазной связи [25]. Более плавное остывание ПКМ после спекания в методике № 2 также является причиной снижения интенсивности износа. При плавном остывании в дефектных областях макромолекул полимера образуются более крупные упорядоченные ламеллярные структуры, которые придают большую жесткость формируемому ПКМ [26]. О более прочной адгезии частиц компонентов образцов ПКМ № 2 свидетельствует характер разрушения поверхности композитов при трении. Микрофотографии, представленные на рис. 1, демонстрируют преобладание усталостного износа для образца № 2, при котором основное разрушение происходит через усталостные трещины, а не отслаивание материала [27]. При этом преобладание абразивного и адгезионного износа для образца № 1 указывает на более слабое межфазное взаимодействие между частицами ПКМ.

На рис. 2 представлены зависимости напряжение–относительная деформация. Деформаци-

Таблица 1

Интенсивность износа и коэффициент трения

Table 1

Wear rate and coefficient of friction

Образец № 1		Образец № 2
Интенсивность износа J , мг/ч	Коэффициент износа K , м ³ /(Н·м)	Интенсивность износа J , мг/ч
0,86	$2,91 \cdot 10^{-16}$	0,74

Механические характеристики образцов

Table 2

Mechanical features of the samples

Образец № 1			Образец № 2	
Предел прочности на разрыв σ_b , МПа	Относительное удлинение на разрыв ϵ_b , %	Модуль упругости на разрыв E , МПа	Предел прочности на разрыв σ_b , МПа	Относительное удлинение на разрыв ϵ_b , %
21,43	410,17	140,32	23,37	466,45

онные кривые для всех образцов подобны в области малых деформаций, при этом зависимость участка линейна (т. е. подчиняется закону Гука и соответствует упругой деформации), а его ориентация близка к вертикальной. Данный фактор свидетельствует о высоком модуле упругости образцов [28]. Далее, на кривых в области усилий от 125 до 175 Н (рис. 3) наблюдается участок неустойчивого течения, что может свидетельствовать о вынужденных высокоэластичных деформациях в образцах ПКМ после достижения предела текучести [29]. В процессе растяжения образцов вслед за развитием упругой деформации осуществляется переход к пластической деформации. Данный участок для образца № 2 характеризуется более высокими значениями стандартного усилия, что может свидетельствовать об увеличении степени адгезии частиц ПКМ и формировании более прочных ламеллярных структур [30]. Образцы ПКМ вытягиваются по всей длине рабочей части лопатки, что объясняется пространственно-однородным сдвигом полимерных цепей. При растяжении выше предела текучести происходит деформационное упрочнение, в результате чего образцы тянутся до высоких деформаций. Образец № 2 демонстрирует более высокие значения предела прочности, что свидетельствует о более высокой адгезии частиц матрицы и наполнителя полимерного композиционного материала.

В табл. 2 приведены механические характеристики исследуемых образцов, рассчитанные по диаграмме напряжение–относительная деформация (см. рис. 2).

Полученные данные свидетельствуют о возрастающем пределе прочности, относительном удлинении и модуле упругости при испытаниях на разрыв, что может быть связано с повышением адгезии компонентов в системе полимерного образца № 2 в результате дегидратации и более плавного и регулируемого процесса остывания ПКМ.

Заключение

Представлены данные об исследовании влияния метода изготовления образцов полимерных композиционных материалов с матрицей из политетрафторэтилена и наполнителем из диоксида циркония на их триботехнические свойства.

По результатам анализа установлено, что интенсивность износа образцов полимерных композитов № 2 ниже (на ~ 13 %), чем у образцов ПКМ № 1, и значительно ниже, чем у исходного ПТФЭ. Кроме того, определено, что образцы № 2 характеризуются более высокими значениями механических характеристик, таких как предел прочности, относительное удлинение и модуль упругости при испытаниях на разрыв. Указанная разница результатов объясняется использованием метода дегидратации при подготовке образцов № 2 к спеканию, из-за чего с поверхности удаляются остаточные гидроксильные группы, которые могут препятствовать формированию однородной и прочной структуры композита.

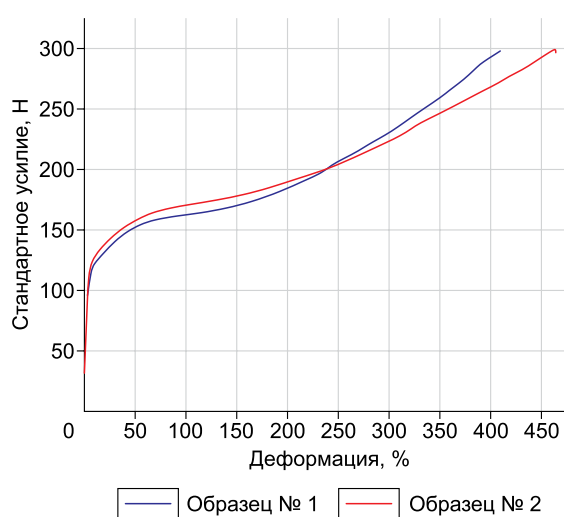


Рис. 2. Деформационные кривые для исследуемых образцов

Fig. 2. Deformation curves for the studied samples

Более того, снижению интенсивности износа способствует плавное остывание ПКМ № 2, из-за чего композиционный материал приобретает большую жесткость, за счет формирования более крупных упорядоченных ламеллярных структур, что подтверждается механическими испытаниями.

Образцы ПКМ № 2 с матрицей из ПТФЭ и наполнителем из диоксида циркония, обладающие наименьшей интенсивностью износа, рекомендуются к использованию в металлополимерных узлах сухого трения.

Список литературы / References

1. Коробов М.С., Юрков Г.Ю., Кознинкин А.В. и др. Новый наноматериал: металлосодержащий политетрафторэтилен. *Неорганические материалы*. 2004;40(1):26–34. <https://doi.org/10.1023/B:INMA.0000012175.13996.d7> EDN: OWGUWF.
2. Korobov M.S., Yurkov G.Yu., Kozninkin A.V., et al. Metal-containing poly (tetrafluoroethylene): a novel material. *Inorganic Materials*. 2004;40(1):26–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.1023/B:INMA.0000012175.13996.d7> EDN: OWGUWF.
3. Josmin J.P., Kuruvilla J. Advances in polymer composites: macro- and microcomposites—state of the art, new challenges, and opportunities. In: Prof. Dr. Sabu Thomas, et al. (eds.) *Polymer composites*. Wiley; 2012, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1002/9783527645213>.
4. Шишонков М.В. *Высокомолекулярные соединения*. Минск: Вышэйшая школа; 2012. 535 с. EDN: RYSBUJ
5. Shishonok M. V. *High-molecular compounds*. Minsk: Higher School; 2012. 535 p. (In Russ.). EDN: RYSBUJ
6. Anderson G.M., Iobal L., Sharp D.H., et al. Redox reaction in involving molybdenum, tungsten and uranium hexafluorides in acetonitril. *Journal of Fluorine Chemistry*. 1984; 24(3):303–317. [https://doi.org/10.1016/S0022-1139\(00\)85296-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1139(00)85296-3) EDN: XPEGPC
7. Хати́пов С.А., Цвелев В.М., Алексеев С.В. Материалы нового поколения на основе радиационно-модифицированного политетрафторэтилена. В кн.: *Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов: сборник научных трудов*. Вып. 6. М.: Блок-Информ-Экспресс; 2005. С. 53. EDN: YUAIWI
8. Khatipov S.A., Tsvelev V.M., Alekseev S.V. New generation materials based on radiation-modified polytetrafluoroethylene. In: *Current issues in the design of space systems and complexes: Collection of scientific papers. Issue 6*. Moscow: Blok-Inform-Express; 200. P. 53. (In Russ.). EDN: YUAIWI
9. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В.И., Калистратова Л.Ф. *Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация*. М.: Машиностроение; 2005. 239 с. EDN: QNDZQL
10. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Surikov V.I., Kalistratova L.F. *Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2005. 239 p. (In Russ.). EDN: QNDZQL.
11. Panda A., Dyadyura K., Valicek K., et al. Manufacturing technology of composite materials—principles of modification of polymer composite materials technology based on polytetrafluoroethylene. *Materials*. 2017;10(4):377. <https://doi.org/10.3390/ma10040377>.
12. Bandaru A.K., Kadiyala A.K., Weaver P.M., et al. Mechanical and abrasive wear response of PTFE coated glass fabric composites. *Wear*. 2020;450:203267. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203267> EDN: FSQRBZ
13. Li Y., Chen Y., Guo Y., et al. Tribological behavior of PEEK/PTFE composites reinforced with carbon fibers and graphite. *Materials*. 2022;15(20):7078. <https://doi.org/10.3390/ma15207078> EDN: ZFJIJZ
14. Vasilev A.P., Lazareva N.N., Struchkova T.S., et al. Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene modified with combined fillers: Carbon fibers, zirconium dioxide, silicon dioxide and boron nitride. *Polymers*. 2023;15(2):313. <https://doi.org/10.3390/polym15020313> EDN: QVWZXW
15. Alam K.I., Bragaw P., Burris D.L. Isolating the tribochemical and mechanical effects of nanofillers on PTFE wear. *Wear*. 2022;494:204–256. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204256> EDN: VICQOI
16. Аммосова О.А., Аргунова А.Г., Ботвин Г.В. и др. *Модифицированные полимерные и композиционные материалы для северных условий*. Новосибирск: Наука; 2017. 217 с. EDN: YPHAOT
17. Ammosova O.A., Argunova A.G., Botvin G.V., et al. *Modified polymer and composite materials for northern conditions*. Novosibirsk: Nauka; 2017. 217 p. (In Russ.). EDN: YPHAOT
18. Машков Ю.К., Кропотин О.В., Чемисенко О.В. Разработка и исследование полимерного нанокompозита для металлополимерных узлов трения. *Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии»*. 2014;133(3): 64–66. EDN: TKDJUD
19. Mashkov Yu.K., Kropotin O.V., Chemisenko O.V. Development and study of polymer nanocomposite for metalpolymer friction units. *Omsk Scientific Bulletin. Series “Instruments, Machines and Technologies”*. 2014;133(3):64–66. (In Russ.). EDN: TKDJUD
20. Гулькин А.В., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А. и др. Влияние объемной модификации наноразмерными частицами диоксида циркония на структуру и механические свойства композиционного материала на основе политетрафторэтилена. *Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение»*. 2024;8(4):100–106. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2024-8-4-100-106> EDN: CEWQNK
21. Gulkin A.V., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A., et al. Effect of volumetric modification with nanosized zirconium dioxide particles on structure and mechanical properties of composite material based on polytetrafluoroethylene. *Omsk Scientific Bulletin. Series “Aviation-Rocket and Power Engineering”*. 2024;8(4):100–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2024-8-4-100-106> EDN: CEWQNK
22. Закранцов А.Р., Мишин И.В., Матюков А.В. и др. Компьютерное моделирование влияния концентрации наноразмерного диоксида циркония и углерода на механические свойства композита на основе политетрафторэтилена. В кн.: Егорова В.А., Сухарева О.М. (ред.) *Нанотехнологии. Информатика. Радиотехника (НИИР-22): Материалы региональной молодежной научно-практической конференции, г. Омск, 21 апреля 2022 г.* Омск: Омский государственный технический университет; 2022 С. 165–170. EDN: VAMBMZ
23. Zakrantsov A.R., Mishin I.V., Matyukov A.V., et al. Computer modeling of the influence of the concentration of nanosized zirconium dioxide and carbon on the mechanical properties of a composite based on polytetrafluoroethylene. In: Egorova V.A., Sukhareva O.M. (eds.) *Nanotechnology. Inform-*

tion. *Radio Engineering (NIR-22): Proceedings of the Regional Youth Scientific and Practical Conference*. Omsk, April 21, 2022. Omsk: Omsk State Technical University; 2022, pp. 165–170. (In Russ.). EDN: VAMBMZ

16. Теплоухов А.А., Шабанова П.А., Сирилья А.А. и др. Влияние легирования диоксидом циркония на физико-механические свойства ПТФЭ. В кн.: *Ученые Омска – региону: Материалы VII Регион. науч.-техн. конф., г. Омск, 1–2 июня 2022 г.* Омск: Омский государственный технический университет; 2022. С. 92–95. EDN: HRDOOK

Teploukhov A.A., Shabanova P.A., Sirivlya A.A., et al. The influence of alloying with zirconium dioxide on the physical and mechanical properties of PTFE. In: *Scientists of Omsk to the Region: Proceedings of the 7th Regional Scientific Technical Conference, Omsk, June 1–2, 2022*. Omsk: Omsk State Technical University; 2022, pp. 92–95. (In Russ.). EDN: HRDOOK

17. Негров Д.А., Путинцев В.Ю. Усовершенствование технологии прессования изделий из политетрафторэтилена. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2021;14(5):564–571. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0333>. EDN: ZUIHLZ

Negrov D.A., Putintsev V.Yu. Improvement of pressing technology of products from polytetrafluoroethylene. *Journal of Siberian Federal University. Series: Engineering & Technologies*. 2021;14(5):564–571. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0333>. (In Russ.). EDN: ZUIHLZ

18. Негров Д.А., Путинцев В.Ю., Глотов А.И. Влияние усовершенствованной технологии прессования на структурообразование политетрафторэтилена. *Ползуновский вестник*. 2024;1(1):240–244. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.031> EDN: JCAATM

Negrov D. A., Putintsev V. Yu., Glotov A. I. The impact of improved technology pressing on structure formation polytetrafluoroethylene. *Polzunovskiy Vestnik*. 2024;1(1):240–244. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.031>. (In Russ.). EDN: JCAATM

19. Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Васильев А.П. и др. Влияние термической обработки на надмолекулярную структуру порошка политетрафторэтилена. *Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова*. 2016;54(4):48–57. EDN: WJBIMR

Okhlopova A.A., Struchkova T.S., Vasiliev A.P., et al. Study of the effects of heat treatment on the supramolecular structure powder polytetrafluoroethylene. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2016;54(4):48–57. (In Russ.). EDN: WJBIMR

20. Седакова Е.Б., Козырев Ю.П. Механизмы износа политетрафторэтилена при трении по сталям различных марок. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2016;2(2):80–84. EDN: VJVRJW

Sedakova E.B., Kozyrev Yu.P. Wear mechanisms of polytetrafluoroethylene during its friction against various grades of steel. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016;2(2):163–167. <https://doi.org/10.3103/S1052618816020126> EDN: WUAFJX

21. Корнопольцев В.Н., Аюрова О.Ж., Могнонов Д.М. О термодинамике трения политетрафторэтилена и его композиций. *Вестник ВГУТУ*. 2023;2(89):114–118. https://doi.org/10.53980/24131997_2023_2_114 EDN: WJWAMN

Kornopol'tsev V.N., Ayurova O.Zh., Mogonov D.M. On thermodynamics of polytetrafluoroethylene friction and its compositions. *ESSUTM Bulletin*. 2023;2(89):114–118. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/24131997_2023_2_114 EDN: WJWAMN

22. Седакова Е.Б., Козырев Ю.П. Влияние наполнения политетрафторэтилена на изменение границ действия механизмов изнашивания. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2017;3(3):46–51. EDN: YRLKWP

Sedakova E.B., Kozyrev Yu.P. Effect of material state on the wear of filled polytetrafluoroethylene composite F4K20 on its basis. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2017;46(3):259–264. <https://doi.org/10.3103/S105261881703013X> EDN: UXFASD

23. Qi Y., Sun B., Zhang Y. Gao G., et al. Study of Tribological properties and evolution of morphological characteristics of transfer films in PTFE composites synergistically reinforced with Nano-ZrO₂ and PEEK particles. *Polymers*. 2023;15(17):3626. <https://doi.org/10.3390/polym15173626> EDN: SABIBM

24. Wang Y., Jiang C., Wang Z. Effect of sintering factors on properties of Al-rich PTFE/Al/TiH₂ active materials. *Polymers*. 2021;13(11):1705. <https://doi.org/10.3390/polym13111705>.

25. Katoueziaheh E., Rajabinejad H., Rafferty A., Morris M.A. Impact of sintering temperature and compression load on the crystallinity and structural ordering of polytetrafluoroethylene. *RSC Advances*. 2025;15(39):32746–32757. <https://doi.org/10.1039/D5RA03395K> EDN: VSOTJV

26. Козлов В.Н., Акимов А.И., Фатыхов М.А. Зависимость механических свойств композиционных материалов от температурного режима полимеризации. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2009;1(149):83–89. EDN: KZPUSL

Kozlov V.N., Akimov A.I., Fatykhov M.A. Dependence of mechanical characteristics of composite materials from temperature mode of polymerization. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2009;1(149):83–89. (In Russ.). EDN: KZPUSL

27. Панин С.В., Корниенко Л.А., Нгуен Суан Т. и др. Износостойкость композитов на гибридной матрице СВМПЭ-ПТФЭ: механические и триботехнические свойства. *Трение и износ*. 2015;36(3):325–333. EDN: UACCYV

Panin S.V., Kornienko L.A., Ivanova L.R., et al. Wear resistance of composites based on hybrid UHMWPE-PTFE matrix: mechanical and tribological properties. *Journal of Friction and Wear*. 2015;36(3):249–256. (In Russ.). <https://doi.org/10.3103/S1068366615030113> EDN: UEYQJL

28. Хатипов С.А., Артамонов Н.А. Создание нового антифрикционного и уплотнительного материала на основе радиационно-модифицированного политетрафторэтилена. *Российский химический журнал*. 2008;52(3):89–96. EDN: LMAAFL

Khatipov S. A., Artamonov N. A. Creation of a new anti-friction and sealing material based on radiation-modified polytetrafluoroethylene. *Ros. Khim. Zh.* 2008;52(3):89–96. (In Russ.). EDN: LMAAFL

29. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В.И., Калистратова Л.Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. *Структурная модификация*. М.: Машиностроение; 2005. 240 с. EDN: QNDZQL

Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Surikov V.I., Kalistratova L.F. Composite materials based on polytetrafluoroethylene. *Structural modification*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2005. 240 p. (In Russ.). EDN: QNDZQL

30. Хатипов С.А., Коиова Е.М., Артамонов Н.А. Радиационно-модифицированный политетрафторэтилен: структура и свойства. *Российский химический журнал*. 2008;52(5):64–72. EDN: JWDTHH

Khatipov S.A., Koiova E.M., Artamonov N.A. Radiation modified polytetrafluoroethylene: structure and properties. *Ros. Khim. Zh.* 2008;52(5):64–72. (In Russ.). EDN: JWDTHH

Об авторах

ТЕПЛОУХОВ Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика», Омский государственный технический университет, <http://orcid.org/0000-0002-5649-2871>, SPIN: 6836-1254, e-mail: a.a.lektor@mail.ru

ЗАКРАНЦОВ Александр Романович, ассистент кафедры «Физика», Омский государственный технический университет, <https://orcid.org/0009-0007-2653-2637>, SPIN: 6740-3422, e-mail: zakrantsovar@mail.ru

ТЕРЕХИНА Анастасия Евгеньевна, аспирант, Омский государственный технический университет, <https://orcid.org/0009-0001-9246-5811>, SPIN: 9439-5669, e-mail: terexina28081999@gmail.com

ВЕБЕР Денис Александрович, ассистент кафедры «Материаловедение и технологии материалов», Омский государственный технический университет, <https://orcid.org/0009-0000-9227-7493>, SPIN: 9455-4101, e-mail: a.a.lektor@mail.ru

Вклад авторов

Теплоухов А.А. – разработка концепции, редактирование рукописи, руководство исследованием; **Закранцов А.Р.** – верификация данных, создание черновика рукописи; **Терехина А.Е.** – методология, проведение исследования, администрирование данных; **Вебер Д.А.** – проведение исследования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

TEPLOUKHOV, Andrei Anatolyevich, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Physics, Omsk State Technical University, <https://orcid.org/0000-0002-5649-2871>, SPIN: 6836-1254, e-mail: a.a.lektor@mail.ru

ZAKRANTSOV, Alexander Romanovich, Assistant, Department of Physics, Omsk State Technical University, <https://orcid.org/0009-0007-2653-2637>, SPIN: 6740-3422, e-mail: zakrantsovar@mail.ru

TEREKHINA, Anastasia Evgenievna, Postgraduate Student, Omsk State Technical University, <https://orcid.org/0009-0001-9246-5811>, SPIN: 9439-5669, e-mail: terexina28081999@gmail.com

WEBER, Denis Alexandrovich, Assistant, Department of Materials Science and Technology, Omsk State Technical University, <https://orcid.org/0009-0000-9227-7493>, SPIN: 9455-4101, e-mail: a.a.lektor@mail.ru

Authors' contribution

Teploukhov A.A. – conceptualization, writing – review & editing, supervision; **Zakrantsov A.R.** – validation, writing – original draft; **Terekhina A.E.** – methodology, investigation, data curation; **Weber D.A.** – investigation

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 04.02.2026

Поступила после рецензирования / Revised 07.04.2026

Принята к публикации / Accepted 27.04.2026