

ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМНОЙ МОДИФИКАЦИИ НАНОРАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

А. В. Гулькин¹, А. А. Теплоухов², Н. А. Семенюк², А. П. Сазанков³,
А. Е. Карташова², Д. В. Скакун²

¹РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан»,
Республика Казахстан, 180010, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б

²Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

³Институт механики металлополимерных систем
имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Республика Беларусь, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32А

В данной работе рассмотрено влияние концентрации наноразмерных частиц диоксида циркония ZrO_2 , примененных в качестве объемного модификатора-наполнителя, на структуру и прочностные характеристики композита на основе политетрафторэтилена. Методом спекания в пресс-форме в условиях объемного ограничения теплового расширения были получены образцы композитов на основе политетрафторэтилена, имеющих в составе концентрации 0 %, 4 %, 8 % и 26 % наноразмерных частиц диоксида циркония ZrO_2 . Проведен анализ структурно-химического состояния и элементного состава образцов методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с использованием установки Surface Science Center (Riber) и растровой электронной микроскопией с применением энерго-дисперсионного анализа, твердость была определена на ТВР-АМ (дюрометр) Шора тип А, с аналоговым индикатором. Испытания на износ проведены на универсальной машине трения УМТ-2168 в режиме трения без смазочной жидкости при постоянной нагрузке 5 Н, периферийная скорость с абразивным листом 0,32 м/с. Результаты проведенных исследований были подтверждены в условиях натурных испытаний. Даны рекомендации по процентному составу наноразмерного наполнителя в политетрафторэтилене для уплотнений в узлах трения.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, структурно-фазовое состояние, диоксид циркония, объемная модификация, твердость, герметизация, износ.

Введение

Создание новых композитов с улучшенными механическими свойствами продолжает оставаться актуальной задачей в области технологии материалов. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) и композиты на его основе имеют высокие эксплуатационные свойства, связанные с особенностями молекулярной структуры данных материалов [1–5]. Авторами работ [6, 7] было показано, что метод механической активации является одним из наиболее производительных и эффективных при получении новых композитов на основе ПТФЭ. Одним из самых передовых направлений разработки полимерных композиционных материалов (ПКМ) авторы [8] считают метод структурной модификации полимерной матрицы структурно-активными наполнителями различной химической природы и формы наноразмерных частиц.

Перспективность названного направления обусловлена также тем, что в условиях фрикционного взаимодействия развиваются физико-химические процессы многоуровневого структурного модифицирования и самоорганизации, которые играют

главную роль в обеспечении повышенной твердости и износостойкости полимерного композита. Изучив ряд публикаций [9, 10], была выдвинута гипотеза о возможности использования в качестве материала-модификатора наноразмерных частиц диоксида циркония ZrO_2 . Предполагается, что этот материал способен повысить триботехнические характеристики композита на основе ПТФЭ, не ухудшая его эксплуатационных свойств в условиях повышенных температур и циклических нагрузок.

Целью работы является получение ПКМ на основе модифицированного наноразмерными частицами диоксида циркония ZrO_2 ПТФЭ, определение механических свойств: твердости и износостойкости.

Постановка задачи

Для исследования влияния наноразмерных частиц диоксида циркония на прочностные характеристики ПКМ необходимо:

1. Получить методом не свободного спекания ПКМ, на основе ПТФЭ объемно модифицированного наноразмерными частицами диоксида циркония ZrO_2 в концентрациях 0 %, 4 %, 8 % и 26 %.

2. Определить элементный состав полученных образцов.

3. Получить значения твердости и износостойкости.

Эксперимент

В качестве объёмного модификатора ПТФЭ использовали наноразмерные частицы диоксида циркония ZrO_2 [11, 12]. Взвешивание компонентов было произведено на электронных весах Pioneer. Процентное содержание наноразмерных частиц диоксида циркония ZrO_2 составляло 0 %, 4 %, 8 % и 26 % для образцов 1, 2, 3, 4 соответственно. Концентрация 26 % наноразмерных частиц ZrO_2 использована для гарантированного максимального проявления свойств наполнителя, исходя из литературных данных. Далее полученные смеси с различными концентрациями диоксида циркония перемешивались по очереди в механоактивирующей машине в течение 60 минут каждая [13].

Формование (холодное прессование) заготовок проводили на гидравлическом прессе ЛСД 700 в съёмных пресс-формах при давлении 40 МПа без нагревания, с фиксацией приложенной нагрузки 15 минут. Для формования заготовок была изготовлена пресс-форма, позволяющая сдерживать объёмное расширение.

Спекание образцов осуществлялось в электрической печи WiseTherm FHX-12 с воздушной циркуляцией для выравнивания температуры. Нагревание проводилось ступенчато. При температуре 342 °С происходит плавление кристаллической фазы ПТФЭ, а при 360–380 °С — сплавление отдельных частиц полимера при этом происходит сдерживаемое пресс-формой объёмное расширение композиции с последующей усадкой при остывании [14–16].

После спекания образцы охлаждали естественным образом непосредственно в печи до достижения температуры 70–80 °С, а далее при комнатной температуре на воздухе.

Полученный композит извлекали из пресс-формы (рис. 1). Методом визуального осмотра определили целостность полученной заготовки на предмет сколов трещин и прочих внешних дефектов.

Получено по 5 образцов с различной концентрацией модификатора (табл. 1).

Следующим шагом, полученные образцы подвергли механической обработке по эскизу, представленному на рис. 2 для получения заготовки для натурных испытаний на прочность и износ [17, 18].

Результаты исследований

Для изучения влияния модификаторов на структуру полимерной матрицы ПТФЭ использовался сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM-5700 [19]. На нем методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) были получены микрофотографии.

Увеличение составляло в 1000 крат, ускоряющее напряжение — 10 кВ, ток пучка — 1,0 нА. Глубина сканирования составляет ~1 мкм. Снимки представлены на рис. 3.

Анализ структурно-химического состояния образцов проводился с использованием метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с использованием установки Surface Science Center (Riber). Для возбуждения рентгеновского излучения использовался источник с алюминиевым анодом.

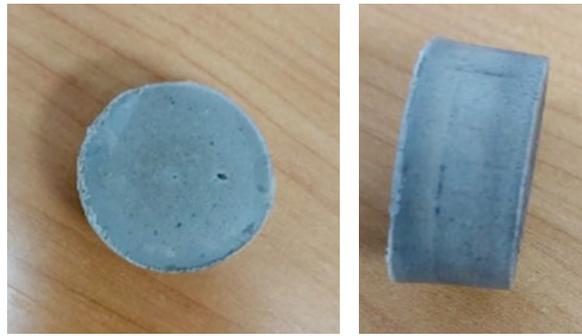


Рис. 1. Полученный композит (заготовка)
Fig. 1. Received composite (blank)

Таблица 1. Концентрация модификатора
Table 1. Concentration of modifier

Образец	№1	№2	№3	№4
Содержание диоксида циркония, масс. %	0	4	8	26

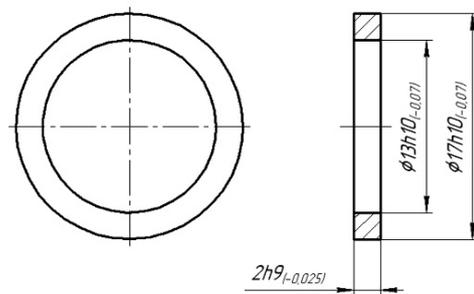


Рис. 2. Эскиз уплотнительного элемента
Fig. 2. Sketch of the sealing element

Спектры РФЭС были получены в условиях сверхвысокого вакуума (~10–9 Торр) с использованием анализатора MAC-2. Диаметр рентгеновского пучка составлял ~3 мм, мощность источника 240 Вт. Разрешение по энергии при регистрации спектров основных линий составляло ~0,2 эВ, обзорных спектров ~1,2 эВ [20–22]. Оценочная глубина сканирования образцов методом РФЭС составляет 1–5 нм. На рис. 4 представлены РФЭС спектры образцов исходного и модифицированного диоксидом циркония ПТФЭ.

В РФЭС спектре исходного ПТФЭ (рис. 1, кривая 1) наблюдаются линии фтора F 1s (энергия связи ~690 эВ) и линия углерода (энергия связи ~285 эВ). В спектре ПТФЭ, легированного оксидом циркония (II) (рис. 1, кривая 2), помимо линий фтора и углерода присутствуют также линия кислорода O 1s (энергия связи ~530 эВ) и линии циркония Zr 3р (~330 эВ) и Zr 3d (~180 эВ).

Результаты анализа химического состава, проведенного по обзорным РФЭС спектрам с применением метода коэффициентов элементной чувствительности, представлены в табл. 2.

Исследование твердости образцов производилось по методу Шора шкала А, по ГОСТу 12423 (ISO 291). Для большей точности величина твердости каждого образца измерялась 10 раз, в таблицу заносились усредненные значения (по ГОСТу — шесть раз). Разброс значений по абсолютной величине не превышал 7–8 %.

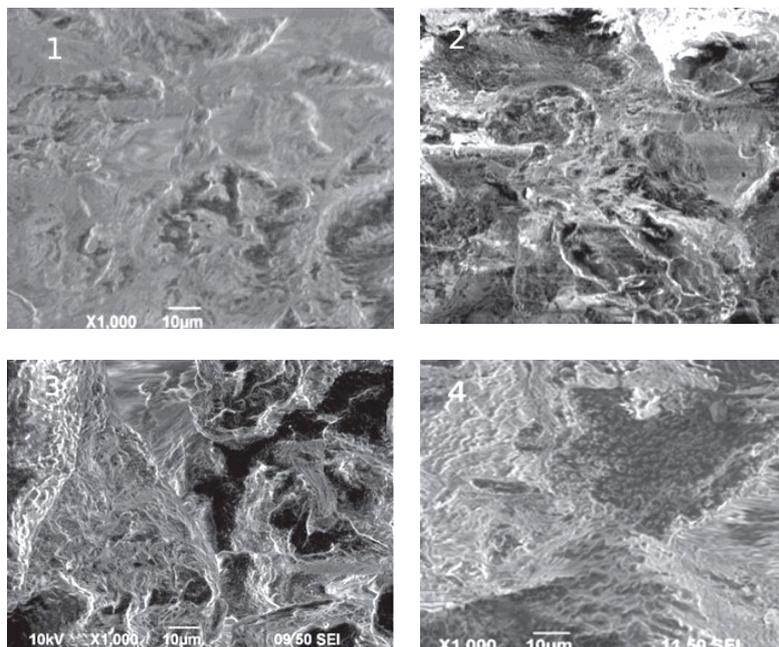


Рис. 3. Микрофотографии образцов
Fig. 3. Micrographs of samples

Усредненные значения твердости приведены в табл. 3.

На рис. 5 представлена зависимость твердости ПКМ по Шору от концентрации модификатора.

Испытания на износ проведены на универсальной машине трения УМТ-2168 в режиме трения без смазочной жидкости при постоянной нагрузке 5 Н, периферийная скорость с абразивным листом 0,32 м/с. Схема трения палец–диск. Износ оценивался по процентному отношению изменения массы образца к его исходной массе. Взвешивание проводилось на аналитических весах OHAUS Pioneer. Предел допустимого отклонения для данной установки составляет 4 %.

Результаты испытаний на износ представлены в табл. 4.

Испытание образцов на прочность проводилось на стенде под высоким давлением. Аппаратура стенда позволяет регулировать давление в соответствии с заданной циклограммой. Таким образом, изделие подвергается переменным циклические нагрузка до 50 МПа в течение 30 минут, что позволяет определить его работоспособность в различных ситуациях. Процесс испытаний требует тщательного контроля и регулирования, чтобы обеспечить точность измерений и получить достоверные результаты. В течение 30 минут отслеживается падение давления с помощью показаний соответствующих датчиков давления. Давление плавно повышается в ходе испытаний вплоть до максимально установленного для испытываемого образца. После завершения цикла испытания давление уменьшается до атмосферного. Образец, прошедший испытание, визуально осматривается и при отсутствии падения давления в процессе нагружения и внешних трещин и разрывов признается годным и готовым к использованию при заявленных нагрузках.

Обсуждение результатов

По микрофотографиям образцов № 1–4, полученных методом электронной микроскопии, с уве-

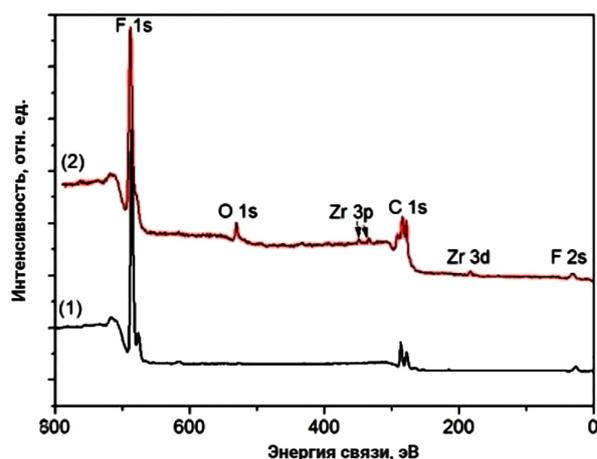


Рис. 4. Обзорные РФЭС спектры: (1) — исходный ПТФЭ; (2) — ПТФЭ, модифицированный 8 % диоксидом циркония ZrO_2 [15]

Fig. 4. Overview XPS spectra: (1) — PTFE original; (2) — PTFE modified with 8 % zirconium dioxide ZrO_2 [15]

Таблица 2. Химический состав поверхностного слоя, мол. %, данные РФЭС

Table 2. Chemical composition of the surface layer, mol. % X-ray photoelectron spectroscopy data

№ образца	Концентрация, мол. %			
	[F]	[C]	[O]	[Zr]
1	68,9	31,1	—	—
2	69,7	26,3	1,0	3,0
3	69,1	18,6	3,3	9,0
4	56,2	17,6	6,8	19,4

личением концентрации диоксида циркония наблюдается значительное уплотнение надмолекулярной структуры политетрафторэтилена (рис. 3). Уплотнение в нашем случае связано с технологическим медленным остыванием в печи, не свободным про-

Таблица 3. Параметры твёрдости
Table 3. Hardness parameters

Параметры	Образец			
	№1	№2	№3	№4
Твёрдость, ед. Шор(-а) А	39	61	67	92



Рис. 5. Зависимость твердости ПКМ по Шору А от концентрации диоксида циркония ZrO_2
Fig. 5. Dependence of Shore A hardness of PCM on the concentration of zirconium dioxide ZrO_2

Таблица 4. Результаты испытаний на износ
Table 4. Results of wear tests

Номер образца	№1	№2	№3	№4
Износ, %	3,67	4,84	5,32	24,41
Температура трущейся поверхности образца, К	510	569	605	665
Коэффициент трения	0,04	0,09-0,11	0,11-0,13	0,24

цессом спекания и изменением концентрации наночастиц, которые выступают в роли зародышей структуры образований. Происходит упорядочивание структуры и уменьшение неструктурированных участков.

По результатам количественного анализа образцов в исходном ПТФЭ наблюдаются наличие фтора и углерода. В образцах ПТФЭ, модифицированных диоксидом циркония, помимо фтора и углерода присутствуют также кислород и цирконий в различных концентрациях, что верифицирует состав образцов ПКМ на основе ПТФЭ с добавлением модификатора диоксида циркония ZrO_2 .

График зависимости на рис. 4 демонстрирует увеличение твердости композиционного материала при увеличении концентрации наноразмерного модификатора. Полученные результаты согласуются с исследованиями в области структурно активных наполнителей [23]. Небольшие концентрации наноразмерного модификатора проявляют наилучшие триботехнические свойства. С увеличением концентрации порошка диоксида циркония выше 20–22 % использование ПКМ затруднено в условиях динамических или вибрационных нагрузок. Твердость материала связана с механической прочностью. Поэтому закономерно считаем, что увеличение значений твердости ПКМ на основе ПТФЭ

модифицированного наноразмерными частицами диоксида циркония приведет к увеличению механической прочности.

Проведенные испытания на износ говорят о том, что с увеличением концентрации диоксида циркония в матрице износ образцов увеличивается. Так, при концентрации 4 % и 8 % износ составил около 4 % и 5 % соответственно, а при концентрации диоксида циркония 26 % износ увеличился значительно и составил порядка 25 % от массы исходного материала.

Выводы и заключение

Анализ образцов на основе ПТФЭ, модифицированных наноразмерными частицами диоксида с концентрацией 4–8 %, подтвердил гипотезу о линейном увеличении механических характеристик при сохранении низких значений коэффициента трения в условиях высоких давлений и повышенных температур.

Хорошо зарекомендовало себя применение механоактивирующей машины, медленное, с остановками, перемешивание создало эффект обволакивания частицами ПТФЭ более твердых частиц диоксида циркония. И, как следствие, возможно получение прогнозируемой и более однородной структуры ПКМ.

В рамках натурных испытаний установлено, что система «ПТФЭ матрица + 8 % наноразмерных частиц диоксида циркония ZrO_2 » способна выдерживать циклические нагрузки 50 МПа в течение 30 минут согласно требованиям РД 26-12-29-88 и методике испытаний по ГОСТ 24054-80.

Рекомендовано использование ПКМ на основе ПТФЭ, модифицированного 8 % порошка диоксида циркония в наноразмерном диапазоне 250–300 нм для уплотнительных устройств в узлах трения, работающих при повышенных температурах и давлениях до 40 МПа.

Обозначения

- ZrO_2 — диоксид циркония;
- ПТФЭ — политетрафторэтилен, или фторопласт-4 ($-C_2F_4-$)_n;
- ПКМ — полимерные композиционные материалы;
- РФЭС — рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия;
- РЭМ — растровая электронная микроскопия.

Список источников

1. Бартенев Г. М., Зеленов Ю. В. Физика и механика полимеров. Москва: Высшая школа, 1983. 391 с.
2. Негров Д. А., Путинцев В. А., Глотов А. И. Влияние усовершенствованной технологии прессования на структурообразование политетрафторэтилена // Ползуновский вестник. 2024. № 1. С. 240–244. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.031. EDN: JCAATM.
3. Panin S. V., Kornienko L. A., Alexenko V. O. Influence of Nanoand Microfillers on the Mechanical and Tribotechnical Properties of «UHMWPE-PTFE» Composites // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 712. P. 161–165. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.161. EDN: XFMLKD.
4. Смелов А. В. Механические свойства и трибологические возможности модифицированного политетрафторэтилена // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. С. 73–81. EDN: RPIHLN.

5. Охлопкова А. А. Физико-химические принципы создания триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных керамик: дис. ... д-ра техн. наук. Якутск, 2000. 295 с.

6. Исакова Т. А., Петрова П. Н., Маркова М. А. Исследование полимерных композиционных материалов на основе механоактивированного политетрафторэтилена // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2023. Т. 16, № 8. С. 967–976. EDN: LGQCSUH.

7. Будник О. А., Свидацкий В. А., Берладир К. В. [и др.]. Влияние механической активации политетрафторэтиленовой матрицы на ее физико-химические и эксплуатационные свойства // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2014. № 5. С. 176–179. EDN: SXDKAZ.

8. Колосова А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А. [и др.] Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. № 10–3. С. 459–465. EDN: ZRRAMN.

9. Аммосова О. А. Модифицированные полимерные и композиционные материалы для северных условий: моногр. Новосибирск: Наука, 2017. 217 с. EDN: YPHOAT.

10. Машков Ю. К., Кропотин О. В., Чемисенко О. В. Разработка и исследование полимерного нанокompозита для металлополимерных узлов трения // Омский научный вестник. 2014. № 3. С. 64–66. EDN: TKDJUD.

11. Пат. 2269550 Российская Федерация, МПК С 08 L 27/18, С 08 К 3/04. Состав для получения композиционного герметизирующего материала / Струк В. А., Костюкович Г. А., Кравченко В. И., Овчинников Е. В., Горбачевич Г. Н. № 2004104434/04; заявл. 17.02.2004; опубл. 10.02.2006. Бюл. № 4. 6 с.

12. Пат. 2467034 Российская Федерация, МПК С 08 J 7/18, С 08 J 5/16, С 08 J 3/28, В 82 В 3/00, С 08 F 2/46, С 08 L 27/18. Нанокompозиционный антифрикционный и уплотнительный материал на основе политетрафторэтилена / Хатилов С. А., Селверстов Д. И., Жутаева Ю. Р. № 2011135280/04; заявл. 24.08.2011; опубл. 20.11.2012. Бюл. № 32. 8 с.

13. Панин В. Е., Панин С. В., Корниенко Л. А. [и др.]. Влияние механической активации сверхвысокомолекулярного полиэтилена на его механические и триботехнические свойства // Трение и износ. 2010. Т. 31, № 2. С. 168–176. EDN: MUWFHN.

14. Привалко В. П., Станиславский В. Б., Титов Г. В. Тепловое расширение высоконаполненных полистиролов // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 1988. Т. 30, № 7. С. 540–542.

15. Машков Ю. К., Полеценко К. Н., Еремин Е. Н., Теплоухов А. А. [и др.]. Получение слоисто-армированного нанокompозита на основе политетрафторэтилена методами лазерной абляции и ионно-плазменного модифицирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16, № 12. С. 531–538. DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-12-531-538. EDN: YICSTV.

16. Помогайло А. Д., Розенберг А. С., Уфлянд И. Е. Наночастицы металлов в полимерах. Москва: Химия, 2000. 672 с.

17. Веттегрень В. И., Башкарв А. Я., Суслов М. А. Влияние формы частиц наполнителя на прочность полимерного композита // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, № 6. С. 135–138. EDN: RCTVNR.

18. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Гоголева О. В. Разработка полимерных нанокompозитов триботехнического назначения для нефтегазового оборудования // Нефтегазовое дело. 2009. № 2. С. 23. EDN: MOTMKR.

19. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Москва: МИСИС, 1994. 328 с.

20. Шпанченко Р. В., Розова М. Г. Рентгенографический анализ. Москва: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 1998. 212 с.

21. Baer D. R., Thevuthasan S. Ch. 16. Characterization of Thin Films and Coatings // Deposition Technologies for Films and Coatings. Noyes Publications, William Andrew, 2010. P. 749–864. DOI: 10.1016/b978-0-8155-2031-3.00016-8.

22. Neville A., Mather R. R., Wilson J. I. B. 12 – Characterisation of plasma-treated textiles // Plasma Technologies for Textiles. Woodhead Publishing, 2007. P. 301–315. DOI: 10.1533/9781845692575.2.301.

23. Машков Ю. К., Кургузова О. А., Рубан А. С. Разработка и исследование износостойких полимерных нанокompозитов // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 1. С. 36–45. EDN: YTMCKY.

ГУЛЬКИН Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», г. Курчатов, Республика Казахстан.

AuthorID (РИНЦ): 305760

ТЕПЛОУХОВ Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 6836-1254

AuthorID (РИНЦ): 859681

ORCID: 0000-0002-5649-2871

AuthorID (SCOPUS): 57189517666

Адрес для переписки: a.a.lektor@mail.ru

СЕМЕНЮК Наталья Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4143-3715

AuthorID (РИНЦ): 684680

ORCID: 0000-0003-0103-7684

AuthorID (SCOPUS): 57191041061

САЗАНКОВ Алексей Павлович, младший научный сотрудник Института механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь.

КАРТАШОВА Анастасия Евгеньевна, аспирант кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9439-5669

AuthorID (РИНЦ): 1216883

СКАКУН Дмитрий Викторович, аспирант кафедры «Технология машиностроения» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3992-7339

AuthorID (РИНЦ): 1263623

ORCID: 0009-0008-9768-6227

Для цитирования

Гулькин А. В., Теплоухов А. А., Семенюк Н. А., Сазанков А. П., Карташова А. Е., Скакун Д. В. Влияние объемной модификации наноразмерными частицами диоксида циркония на структуру и механические свойства композиционного материала на основе политетрафторэтилена // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 4. С. 100–106. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-100-106.

Статья поступила в редакцию 05.10.2024 г.

© А. В. Гулькин, А. А. Теплоухов, Н. А. Семенюк, А. П. Сазанков, А. Е. Карташова, Д. В. Скакун

EFFECT OF VOLUMETRIC MODIFICATION WITH NANOSIZED ZIRCONIUM DIOXIDE PARTICLES ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIAL BASED ON POLYTETRAFLUOROETHYLENE

A. V. Gulkin, A. A. Teploukhov, N. A. Semenyuk, A. P. Sazankov,
A. E. Kartashova, D. V. Skakun

¹National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,
Kazakhstan, Kurchatov, Beibit atom Ave., 2B, 180010

²Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

³V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of
National Academy of Sciences of Belarus,
Belarus, Gomel, Kirova Ave., 32A, 246050

The article demonstrates the influence of the concentration of nanosized particles of zirconium dioxide ZrO_2 , applied as a bulk modifier-filler on the structure and strength characteristics of polytetrafluoroethylene-based composite. Samples with concentrations of 0 %, 4 %, 8 % and 26 % of ZrO_2 nanosized zirconium dioxide particles were obtained by the sintering method in a mould in conditions of volumetric limitation of thermal expansion. The authors analyzed the structural-chemical state and elemental composition of the samples by X-ray photoelectron spectroscopy using Surface Science Center (Riber) and scanning electron microscopy with application of energy-dispersive analysis. Moreover, the hardness was determined on a Shore type A TWR-AM (durometer) with an analogue indicator. Wear tests were carried out on the UMT-2168 universal friction machine by the mode without lubricating fluid at the 5 N constant load, peripheral speed with the 0,32 m/s abrasive sheet. The results of the conducted research were confirmed under full-scale test conditions. As a result, the authors present recommendations on the percentage composition of nanosize filler in polytetrafluoroethylene for seals in friction units.

Keywords: polytetrafluoroethylene, structural and phase state, zirconium dioxide, volume modification, hardness, sealing, wear.

References

1. Bartenev G. M., Zelenev Yu. V. Fizika i mekhanika polimerov [Polymer physics and mechanics]. Moscow, 1983. 391 p. (In Russ.).
2. Negrov D. A., Putintsev V. A., Glotov A. I. Vliyaniye usovershenstvovannoy tekhnologii pressovaniya na strukturo-obrazovaniye politetraforetilena [Impact of improved technology on structure formation polytetrafluoroethylene] // Polzunovskiy vestnik. *Polzunovskiy Vestnik*. 2024. No. 1. P. 240–244. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.031. EDN: JCAATM. (In Russ.).
3. Panin S. V., Kornienko L. A., Alexenko V. O. Influence of Nanoand Microfillers on the Mechanical and Tribotechnical Properties of «UHMWPE-PTFE» Composites // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 712. P. 161–165. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.712.161. EDN: XFMLKD. (In Engl.).
4. Smelov A. V. Mekhanicheskiye svoystva i tribologicheskiye vozmozhnosti modifitsirovannogo politetraforetilena [Mechanical properties and tribological possibilities of modified polytetrafluoroethylene] // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. *Modern Problems of Science and Education*. 2012. No. 6. P. 73–81. EDN: RPIHLN. (In Russ.).
5. Okhlopokova A. A. Fiziko-khimicheskiye printsipy sozdaniya tribotekhnicheskikh materialov na osnove politetraforetilena i ul'tradispersnykh keramik [Physico-chemical principles of

creating tribotechnical materials based on polytetrafluoroethylene and ultradisperse ceramics]. Yakutsk, 2000. 295 p. (In Russ.).

6. Isakova T. A., Petrova P. N., Markova M. A. Issledovaniye polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove mekhanoaktivirovannogo politetraforetilena [Investigation of polymer composite materials based on mechanically activated polytetrafluoroethylene] // Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2023. Vol. 16, no. 8. P. 967–976. EDN: LGQCUH. (In Russ.).
7. Budnik O. A., Sviderskiy V. A., Berladir K. V. [et al.]. Vliyaniye mekhanicheskoy aktivatsii politetraforetilenovoy matritsy na eye fiziko-khimicheskiye i ekspluatatsionnyye svoystva [Effect of mechanical activation of matrix polytetrafluoroethylene on its physicochemical and operational properties] // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2014. No. 5. P. 176–179. EDN: SXDKAZ. (In Russ.).
8. Kolosova A. S., Sokol'skaya M. K., Vitkalova I. A. [et al.]. Napolniteli dlya modifikatsii sovremennykh polimernykh kompozitsionnykh materialov [Fillers to modify the modern polymer composite materials] // Fundamental'nyye issledovaniya. *Fundamental Research*. 2017. No. 10–3. P. 459–465. EDN: ZRRAMN. (In Russ.).
9. Ammosova O. A. Modifitsirovannyye polimernyye i kompozitsionnyye materialy dlya severnykh usloviy [Modified

polymer and composite materials for northern conditions]. Novosibirsk, 2017. 217 p. EDN: YPHAOT. (In Russ.).

10. Mashkov Yu. K., Kropotin O. V., Chemisenko O. V. Razrabotka i issledovaniye polimernogo nanokompozita dlya metallopolimernykh uzlov treniya [Development and study of polymer nanocomposite for metalpolymer friction units] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2014. No. 3. P. 64–66. EDN: TKDJUD. (In Russ.).

11. Patent 2269550 Russian Federation, IPC C 08 L 27/18, C 08 K 3/04. Sostav dlya polucheniya kompozitsionnogo germetiziruyushchego materiala [Composition for preparing composite sealing material] / Struk V. A., Kostyukovich G. A., Kravchenko V. I., Ovchinnikov E. V., Gorbatshevich G. N. No. 2004104434/04. (In Russ.).

12. Patent 2467034 Russian Federation, IPC C 08 J 7/18, C 08 J 5/16, C 08 J 3/28, B 82 B 3/00, C 08 F 2/46, C 08 L 27/18. Nanokompozitsionnyy antifriktsionnyy i uplotnitel'nyy material na osnove politetraforetilena [Accumulative antifriction and sealing material based on polytetrafluoroethylene] / Khatipov S. A., Seliverstov D. I., Zhutayeva Yu. R. No. 2011135280/04. (In Russ.).

13. Panin V. E., Panin S. V., Korniyenko L. A. [et al.]. Vliyaniye mekhanicheskoy aktivatsii sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena na ego mekhanicheskiye i tribotekhnicheskiye svoystva [Effect of mechanical activation of ultra-high-molecular-weight polyethylene on its mechanical and triboengineering properties] // Treniye i iznos. *Treniye i Iznos*. 2010. Vol. 31, no. 2. P. 168–176. EDN: MUWFHN. (In Russ.).

14. Privalko V. P., Stanislavskiy V. B., Titov G. V. Teplovoye rasshireniye vysokonapolnennykh polistirolov [Thermal expansion of highly filled polystyrenes] // Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya B. *Polymer Science. Series B*. 1988. Vol. 30, no. 7. P. 540–542. (In Russ.).

15. Mashkov Yu. K., Poleshchenko K. N., Eremin E. N., Teploukhov A. A. [et al.]. Polucheniye sloisto-armirovannogo nanokompozita na osnove politetraforetilena metodami lazernoy ablyatsii i ionno-plazmennogo modifitsirovaniya [Preparation of layer-reinforced nanocomposite based on polytetrafluoroethylene by laser ablation and ion-plasma modification] // Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2020. Vol. 16, no. 12. P. 531–538. DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-12-531-538. EDN: YICCTV. (In Russ.).

16. Pomogaylo A. D., Rozenberg A. S., Uflyand I. E. Nanochastitsy metallov v polimerakh [Metal nanoparticles in polymers]. Moscow, 2000. 672 p. (In Russ.).

17. Vettegren' V. I., Bashkarv A. Ya., Suslov M. A. Vliyaniye formy chastits napolnitelya na prochnost' polimernogo kompozita [Effect of the shape of filler particles on the strength of a polymer composite] // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*. 2007. Vol. 77, no. 6. P. 135–138. EDN: RCTBNR. (In Russ.).

18. Okhlopkova A. A., Petrova P. N., Gogoleva O. V. Razrabotka polimernykh nanokompozitov tribotekhnicheskogo naznacheniya dlya neftegazovogo oborudovaniya [Working out polymeric nanocomposites the tribotechnical appointments for the oil and gas equipment] // Neftegazovoye delo. *Oil and Gas Business*. 2009. No. 2. P. 23. EDN: MOTMKR. (In Russ.).

19. Gorelik S. S., Skakov Yu. A., Rastorguyev L. N. Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz [X-ray and electron optical analysis]. Moscow, 1994. 328 p. (In Russ.).

20. Shpanchenko R. V., Rozova M. G. Rentgenograficheskiy analiz [X-ray analysis]. Moscow, 1998. 212 p. (In Russ.).

21. Baer D. R., Thevuthasan S. Ch. 16. Characterization of Thin Films and Coatings // *Deposition Technologies for Films*

and Coatings. Noyes Publications, William Andrew, 2010. P. 749–864. DOI: 10.1016/b978-0-8155-2031-3.00016-8. (In Engl.).

22. Neville A., Mather R. R., Wilson J. I. B. 12 — Characterisation of plasma-treated textiles // *Plasma Technologies for Textiles*. Woodhead Publishing, 2007. P. 301–315. DOI: 10.1533/9781845692575.2.301. (In Russ.).

23. Mashkov Yu. K., Kurguzova O. A., Ruban A. S. Razrabotka i issledovaniye iznosostoykikh polimernykh nanokompozitov [Resistant polymer nanocomposites' development and investigation] // Vestnik SibADI. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018. Vol. 15, no. 1. P. 36–45. EDN: YTMCKY. (In Russ.).

GULKIN Aleksandr Vladimirovich, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan.

AuthorID (RSCI): 305760

TEPLOUKHOV Andrey Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Physics Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 6836-1254

AuthorID (RSCI): 859681

ORCID: 0000-0002-5649-2871

AuthorID (SCOPUS): 57189517666

Correspondence address: a.a.lektor@mail.ru

SEMENYUK Natalya Andreyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Physics Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 4143-3715

AuthorID (RSCI): 684680

ORCID: 0000-0003-0103-7684

AuthorID (SCOPUS): 57191041061

SAZANKOV Aleksey Pavlovich, Researcher, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences, Gomel, Belarus.

KARTASHOVA Anastasiya Evgenyevna, Graduate Student of Mechanical Engineering Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9439-5669

AuthorID (RSCI): 1216883

SKAKUN Dmitriy Viktorovich, Graduate Student of Mechanical Engineering Technology Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3992-7339

AuthorID (RSCI): 1263623

ORCID: 0009-0008-9768-6227

For citations

Gulkin A. V., Teploukhov A. A., Semenyuk N. A., Sazanov A. P., Kartashova A. E., Skakun D. V. 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. Vol. 8, no. 4. P. 100–106. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-100-106.

Received October 05, 2024.

© A. V. Gulkin, A. A. Teploukhov, N. A. Semenyuk, A. P. Sazanov, A. E. Kartashova, D. V. Skakun