



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки).
УДК 544.16:691.175.2:620.172.2

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.040

EDN: XQCAA0

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Дмитрий Анатольевич Негров¹, Виталий Юрьевич Путинцев²,
Егор Владимирович Князев³, Алексей Игоревич Глотов⁴,
Денис Александрович Вебер⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Омский государственный технический университет, Омск, Россия

¹ negrov_d_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5713-5470>

² putintsev_vit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2003-0819>

³ knyazevyegor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6450-5364>

⁴ aiglotov@omgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4722-1278>

⁵ daveber@omgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9227-7493>

Аннотация. В данной работе представлены исследования влияния химической функционализации углеродных нанотрубок на механические и трибологические свойства полимерного композиционного материала.

С применением метода сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа изучены морфологические особенности и элементный состав углеродных нанотрубок до и после функционализации.

Представлены результаты экспериментальных исследований изменения механических характеристик, трибологических свойств и надмолекулярной структуры полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена, модифицированного углеродными нанотрубками. Установлено, что применение функционализированных нанотрубок позволяет повысить механические свойства композита: предел прочности при растяжении до 10 %, модуль упругости до 25 %, а также позволяет снизить интенсивность массового изнашивания материала более чем в 2 раза.

Установлено, что применение функционализации нанотрубок способствует их более равномерному распределению между сферолитными частицами политетрафторэтилена, что способствует увеличению предела прочности и износостойкости материала.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, углеродные нанотрубки, полимерный композиционный материал, функционализация, механические характеристики, трибологические свойства.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSGF-2024-0003.

Для цитирования: Влияние химической функционализации углеродных нанотрубок на структуру и механические свойства полимерного композиционного материала / Д. А. Негров [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 1. С. 250–256. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.040. EDN: <https://elibrary.ru/XQCAA0>.

Original article

INFLUENCE OF CHEMICAL FUNCTIONALIZATION OF CARBON NANOTUBES ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIAL

Dmitriy A. Negrov¹, Vitaliy Yu. Putintsev², Egor V. Knyazev³,
Alexey Ig. Glotov⁴, Denis A. Veber⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Omsk State Technical University, Omsk, Russia

¹ negrov_d_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5713-5470>

² putintsev_vit@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2003-0819>

³ knyazevyegor@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6450-5364>

⁴ aiglotov@omgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4722-1278>

⁵ daveber@omgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9227-7493>

Abstract. This research presents studies of the effect of chemical functionalization of carbon nanotubes on the mechanical and tribological properties of a polymer composite material.

The morphological features and elemental composition of carbon nanotubes before and after functionalization were studied by means of scanning electron microscopy and energy dispersive analysis.

© Негров Д. А., Путинцев В. Ю., Князев Е. В., Глотов А. И., Вебер Д. А., 2026

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

The research presents the results of experimental studies of changes in the mechanical characteristics, tribological properties and supramolecular structure of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene modified with carbon nanotubes. It has been established that the use of functionalized nanotubes allows increasing the mechanical properties of the composite: tensile strength up to 10%, elastic modulus up to 25%, and reduces the intensity of mass wear of the material by more than 2 times.

It has been found that the use of nanotube functionalization contributes to their more uniform distribution between the spherulitic particles of polytetrafluoroethylene, which contributes to an increase in the tensile strength and wear resistance of the material.

Keywords: polytetrafluoroethylene, carbon nanotubes, polymer composite material, functionalization, mechanical characteristics, tribological properties.

Acknowledgements: The study was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project No. FSGF-2024-0003.

For citation: Negrov, D. A., Putintsev, V. Yu., Knyazev, E. V., Glotov, A. Ig. & Veber, D. A. (2026). Influence of chemical functionalization of carbon nanotubes on the structure and mechanical properties of polymer composite material. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 250-256. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.040. EDN: <https://elibrary.ru/XQCAA0>.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной отечественной машиностроительной отрасли сопряжено с разработкой и созданием новых материалов триботехнического назначения, которые должны обеспечивать повышенную надежность и долговечность работы узлов трения механизмов. Одни из наиболее применяемых полимерных композиционных материалов (ПКМ) антифрикционного назначения изготавливаются на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ). Политетрафторэтилен обладает уникальным сочетанием химической инертности, триботехнических характеристик и других эксплуатационных свойств [1–3]. Наряду с комплексом уникальных свойств ПТФЭ обладает и рядом недостатков, таких как низкая износостойкость и повышенная ползучесть при длительном воздействии сжимающей нагрузки, что существенно снижает ресурс работы материала и ограничивает область его применения.

Для решения данной проблемы ПТФЭ применяют в качестве матричного материала для создания антифрикционных полимерных композиционных материалов. В процессе синтеза композитов используются различные методы модификации: введение в полимерную матрицу наполнителей-модификаторов, химическая модификация поверхности, а также применение внешнего энергетического воздействия в процессе синтеза композиционного материала [4–5].

Тематикой исследований влияния различных наполнителей на свойства ПКМ триботехнического назначения активно занимаются коллективы ученых под руководством Охлопковой А.А., Адаменко Н.А., Панина С.В. На основании проведенных ими исследований установлено, что положительное влияние наполнителей на триботехнические свойства композиционных материалов обусловлено несколькими факторами: формой и размером частиц наполнителей, равномерностью распределения в матрице и от вида их активации [6–8]. В частности, при добавлении наполнителей в политетрафторэтилен происходит изменение параметров и строения кристаллической структуры, что оказывает влияние на улучшение его свойств и устранение различных дефектов [9–10].

В настоящее время внимание уделяется наноструктурам и нанотехнологиям. Проведенные исследования установили, что эффект от применения наноразмерных наполнителей при низкой массовой доле наполнения соответствует или превосходит эффективность введения различных микрометровых частиц [11–12].

Среди применяемых наноразмерных наполнителей особый интерес для ПКМ триботехнического

назначения представляют углеродные нанотрубки (УНТ).

В ряде работ указывают, что УНТ обладают антифрикционными свойствами и термической стабильностью, что позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики полимерных композиционных материалов триботехнического назначения [13–14].

Свойства композитов, наполненных наноразмерными наполнителями, во многом определяются характером взаимодействия на границе раздела «полимер–поверхность наполнителя». Увеличение степени адгезионного взаимодействия между наполнителем и полимером может быть реализовано путем проведения функционализации поверхности наполнителя различными методами [15–16]. Наиболее удобным и контролируемым методом функционализации углеродных материалов является химическая обработка, которая позволяет целенаправленно высаживать необходимые функциональные группы на поверхности углеродных материалов, а степень модифицирования контролируется длительностью обработки. В процессе проведения химической обработки достигается эффект двойного действия, при котором на поверхности нанотрубок формируются дефекты в графеновых слоях, а затем на этих дефектах происходит закрепление кислородсодержащих функциональных групп. Модификация поверхности углеродных наполнителей позволяет повысить сродство к полимеру и смачиваемость поверхности наполнителя при полимеризации, что приводит к более однородной структуре композита и повышает эксплуатационные свойства изделий из ПКМ [17].

Целью данной работы является определение закономерностей влияния применения химически функционализированных углеродных нанотрубок на механические характеристики, триботехнические свойства и параметры структуры ПКМ на основе политетрафторэтилена.

МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись композиционные материалы системы ПТФЭ-УНТ. Основу материала составлял промышленно выпускаемый тонкомолотый суспензионный порошок политетрафторэтилена торговой марки RX015, производства АО «Гало Полимер», Кирово-Чепецк (средний размер частиц 14–24 мкм, плотность 2,16 г/см³).

В качестве наполнителя применялись УНТ марки МУНТ-2 производства Института катализа СО РАН, Новосибирск (средний диаметр 10 нм, количество стенок 7–9, длина 5–25 мкм, удельная поверхность 250 м²/г).

Для проведения химической функционализации

УНТ применялась смесь серной (H_2SO_4) и соляной кислот (HCl) в соотношении 1:3, длительность проводимой обработки составляла 120 часов. После обработки взвесь углеродных нанотрубок промывалась дистиллированной водой до нейтрального pH суспензии УНТ в воде. Далее нанотрубки высушивали при температуре 120 °C в течение суток.

Предварительная подготовка политетрафторэтилена для изготовления композитов заключалась в проведении сушки при температуре 150 °C в течение 4 часов с дальнейшим механическим смешением с УНТ в лабораторном смесителе лопастного типа DM-6.

Образцы для проведения исследований изготавливались по технологии статического прессования на гидравлическом прессе ГМС-50: давление прессования 80 МПа, время выдержки 60 секунд [18].

После прессования образцов ПКМ производилось ступенчатое спекание в программируемой печи СНОЛ 7/10. Режим спекания ПКМ проводился по следующей схеме: плавный нагрев до температуры 360 °C со скоростью 2 °C/мин, выдержка при температуре 360 °C из расчета 20 мин на 1 мм толщины образца и последующее ступенчатое регулируемое охлаждение со скоростью 0,3 °C/мин до 327 °C с выдержкой при данной температуре в течение 30 минут. Охлаждение образцов до комнатной температуры проводилось в камере печи.

Механические характеристики (предел прочности и относительное удлинение на разрыв) материалов определялись согласно методике по ГОСТ 11262-2017 на машине для испытаний Zwick Roell TH 2010. Модуль упругости определялся на начальном участке деформации образца по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 25.601-80. Определение твердости проводилось по Шору (шкала D) согласно ГОСТ 24621-2015.

Испытания для определения показателей триботехнических характеристик (скорость массового изнашивания, коэффициент трения) изготовленных образцов проводились на машине трения УМТ-2168. Диаметр образцов для испытаний составил $5 \pm 0,5$ мм, длина 15 ± 3 мм, в качестве контртела применялся стальной закаленный диск с твердостью поверхности не менее 45HRC, шероховатостью R_a не более 0,32 мкм. При проведении испытаний к образцам прикладывалась нормальная нагрузка, равная 2 МПа, линейная скорость скольжения составляла 2,7 км/ч, время испытания – 3 часа. Перед испытаниями была проведена технологическая приработка образцов в течение 30 минут при заданных параметрах. Оценку скорости изнашивания материала проводили с помощью взвешивания на микроаналитических весах модели VIBRA-220HTR с погрешностью не более $\pm 0,0001$ г.

Морфология частиц функционализированного наполнителя и надмолекулярная структура холодного (после выдержки в жидком азоте) скола образцов ПКМ исследовалась на растровом электронном микроскопе Jeol JCM-5700. Энергодисперсионный анализ (ЭДА) проводился на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре JED-2300.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исходном состоянии УНТ представляют собой мелкодисперсный порошок, состоящий из крупных агломератов нанотрубок (рис. 1). С целью установления влияния функционализации на изменение количества поверхностных кислородосодержащих функциональных групп проводился количественный эле-

ментный анализ методом ЭДА агломератов УНТ до и после проведения химической функционализации.

На основании данных проведенного анализа агломератов УНТ до проведения модифицирования (таблица 1), установлена низкая степень окисления поверхности нанотрубок, что свидетельствует о химической инертности материала. Максимальное и минимальное значение концентрации кислорода, измеренные на различных участках поверхности, отличаются в 4 раза.

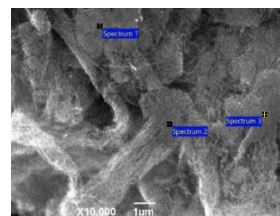


Рисунок 1 – СЭМ изображение исходных УНТ

Figure 1 – SEM image of the original CNT

Таблица 1 – Элементный состав УНТ по результатам ЭДА

Table 1 – Elemental composition of CNT according to EDA results

Область анализа	[C], масс. %	[O], масс. %
Spectrum 1	99,21	0,79
Spectrum 2	99,8	0,2
Spectrum 3	99,62	0,38

После обработки смесью кислот агломераты МУНТ становятся более рыхлыми и состоят из отдельных трубок, спутанных в «клубки» (рис. 2). Разрыхление агломератов МУНТ позволяет предположить, что подобная обработка будет способствовать более равномерному распределению МУНТ в композиционном материале и, соответственно, более эффективному армированию матрицы.

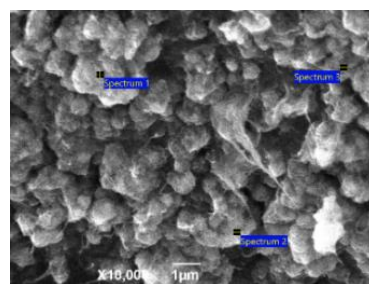


Рисунок 2 – СЭМ изображение УНТ после обработки в смеси кислот

Figure 2 – SEM image of CNT after treatment in a mixture of acids

На основании данных ЭДА функционализированных УНТ (таблица 2) установлено увеличение концентрации кислорода до 4,5 раз по сравнению с исходными, что свидетельствует о закреплении на поверхности кислородных групп. Максимальное и минимальное значения концентрации кислорода, измеренные на различных участках поверхности, отличаются в 1,2 раза, что свидетельствует об однородности окисления УНТ.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

С целью изучения распределения УНТ в объеме матричного материала после механического смешения методом СЭМ были изучены полученные композиционные смеси с исходным и функционализированным наполнителем (рис. 3).

Таблица 2 – Элементный состав УНТ после функционализации по результатам ЭДА

Table 2 – Elemental composition of activated CNT according to EDA results

Область анализа	[C], масс.%	[O], масс.%	[S], масс.%
Spectrum 1	96,45	2,69	0,87
Spectrum 2	95,4	2,17	2,43
Spectrum 3	95,68	2,54	1,78

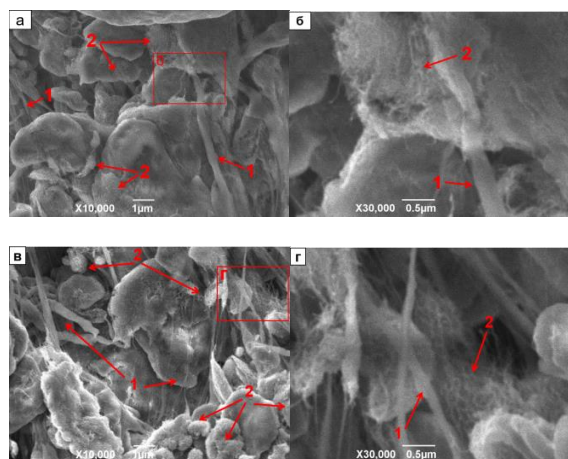


Рисунок 3 – СЭМ изображение смеси ПТФЭ+УНТ(а, б) и ПТФЭ+функционализированные УНТ (в, г):
1 – фибриллярные нити ПТФЭ;
2 – агломераты УНТ

Figure 3 – SEM image of a mixture of PTFE+UHT (a, б) and PTFE+functionalized CNT (в, г):
1 – PTFE fibrillar filaments; 2 – CNT agglomerates

Из рисунка 3 видно, что в смеси порошка ПТФЭ и углеродных нанотрубок агломераты УНТ располагаются преимущественно на крупных частицах ПТФЭ. При этом в агломератах углеродные нанотрубки распределены достаточно плотно друг к другу. После химической обработки агломераты УНТ становятся менее плотными, что позволяет им более однородно распределяться между частицами ПТФЭ в том числе и вдоль фибриллярных нитей ПТФЭ (рис. 3, е). Такое распределение наполнителя способствует образованию более упорядоченной структуры ПКМ в процессе спекания.

Для исследования влияния проведенной функционализации УНТ на механические и трибологические свойства ПКМ были изготовлены и испытаны комплекты образцов.

По результатам сравнительного анализа полученных данных экспериментальных исследований установлено положительное влияние применения химической функционализации наполнителя на предел прочности при разрыве ПКМ. Наибольшее влияние проведенной модификации наполнителя на увеличение прочности композита до 10 % (рис. 4, б), установлено в интервале наполнения ПКМ от 1 до 3 масс.% УНТ.

Однако применение предварительно химически активированных углеродных нанотрубок для изготовления ПКМ с концентрацией от 1 до 4 масс. % приво-

дит к снижению относительного удлинения при разрыве ПКМ на 15–31 % (рис. 5, б). Дальнейшее увеличение доли наполнения композита нивелирует данный эффект применения активированного наполнителя. Предположительно снижение удлинения материала может быть связано с увеличением адгезионного взаимодействия на границе «матрица–наполнитель», что, в свою очередь, сказывается на повышении жесткости композита.

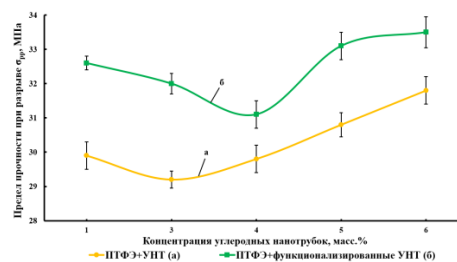


Рисунок 4 – Зависимость предела прочности при разрыве от концентрации наполнителя

Figure 4 – Dependence of the tensile strength on the filler concentration

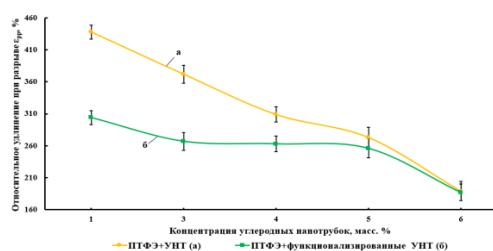


Рисунок 5 – Зависимость относительного удлинения при разрыве от концентрации наполнителя

Figure 5 – Dependence of elongation at break on filler concentration

Предварительная химическая активация наполнителя способствует улучшению упругих свойств ПКМ, что позволяет повысить модуль упругости до 25 % (рис. 6, а).

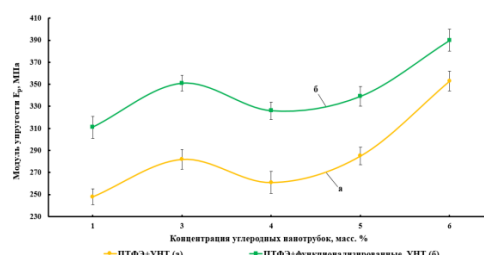


Рисунок 6 – Зависимость модуля упругости от концентрации наполнителя

Figure 6 – Dependence of the modulus of elasticity on the filler concentration

При исследовании значений твердости образцов ПКМ (рис. 7) установлено, что применение предварительно активированных нанотрубок в области концентраций от 1 до 3 масс.%, увеличивает твердость ПКМ до 5 %.

На основании анализа триботехнических свойств образцов установлено, что наибольшая эффективность применения активированных УНТ достигается при наполнении в 1 масс.%, что снижает интенсивность массового изнашивания ПКМ до 2 раз (рис. 8).

При этом наименьшая скорость изнашивания в $3,9 \cdot 10^{-4}$ г/ч достигается при применении 4 масс.% функционализированных нанотрубок. Данный показатель на 7 % меньше, чем у образцов, изготовленных с не активированными УНТ. Дальнейшее увеличение концентрации наполнения приводит к повышению скорости износа ПКМ.

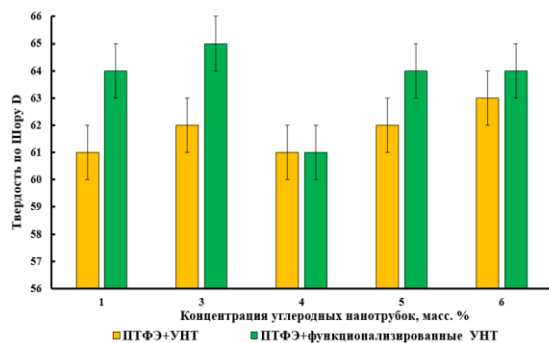


Рисунок 7 – Зависимость твердости по Шору (D) от концентрации наполнителя

Figure 7 – Dependence of Shore hardness (D) on filler concentration

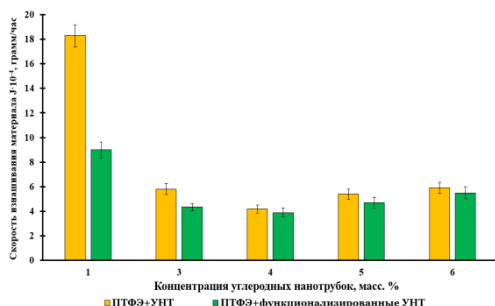


Рисунок 8 – Зависимость интенсивности массового изнашивания от концентрации наполнителя

Figure 8 – Dependence of the intensity of mass wear on the filler concentration

Из полученных данных проведенных исследований коэффициента трения композитов (рис. 9) установлено, что применение функционализированных нанотрубок для изготовления композиционного материала приводит к снижению коэффициента трения.

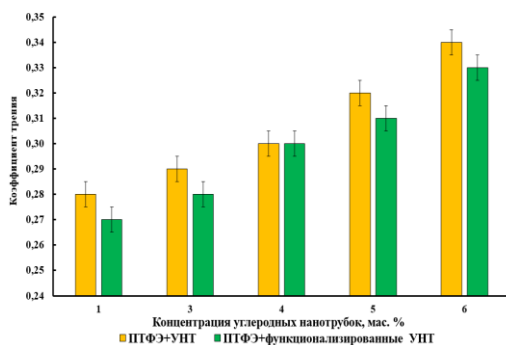


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента трения от концентрации наполнителя

Figure 9 – Dependence of the coefficient of friction on the filler concentration

Методом электронной сканирующей микроскопии была исследована надмолекулярная структура холодного скола образцов ПКМ с наименьшей скоростью изнашивания материала (рис. 10–11).

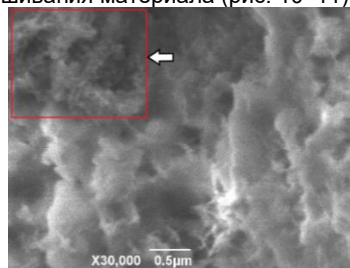


Рисунок 10 – СЭМ изображение надмолекулярной структуры холодного скола ПТФЭ наполненного 4 масс.% УНТ

Figure 10 – SEM image of the supramolecular structure of freeze-fracture PTFE filled with 4 wt.% CNT

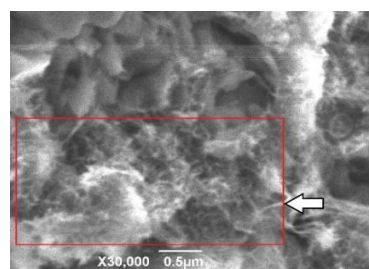


Рисунок 11 – СЭМ изображение надмолекулярной структуры холодного скола ПТФЭ, наполненного 4 масс.% функционализированными УНТ

Figure 11 – SEM image of the supramolecular structure of freeze-fracture PTFE filled with 4 wt.% functionalized CNT

В надмолекулярной структуре ПТФЭ-композитов в выделенных областях были идентифицированы агломераты УНТ, расположенные между несимметричными сферолитоподобными частицами полимерной матрицы (рис. 10). Применение функционализированных УНТ (рис. 11) приводит к более равномерному распределению агломератов в полостях между сферолитными образованиями полимера, что предположительно может способствовать увеличению прочности и износостойкости ПКМ.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено, что проведение химической активации УНТ смесью серной и соляной кислот приводит к разрушению агломератов частиц и увеличению концентрации кислорода на УНТ до 4,5 раз, что свидетельствует о закреплении кислородосодержащих групп на поверхности материала.

Экспериментально определено, что применение предварительно активированных нанотрубок позволяет повысить механические свойства композита: предел прочности при растяжении до 10 %, модуль упругости до 25%, твердость до 5 %, при

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

этом установлено снижение относительного удлинения до 31 %.

Функционализация наполнителя оказывает влияние на трибологические свойства ПКМ и позволяет снизить интенсивность массового изнашивания ПКМ до 2 раз.

Установлено, что применение функционализированных нанотрубок способствует их более равномерному распределению между сферолитными частицами политетрафторэтилена, что может способствовать увеличению прочности и износостойкости материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркова М.А., Петрова П.Н. Исследование влияния углеродных волокон и технологий получения композитов на свойства полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена // Перспективные материалы. 2020. № 11. С. 59–68. doi: 10.30791/1028-978X-2020-11-59-68.

2. Вершина Г.А., Реут Л.Е. Анализ деформационного поведения фторопласта-4 в условиях силового воздействия // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2016. № 4. С. 23–30.

3. Dhanumalayan E., Joshi G.M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) – a review // Adv. Compos. Hybrid Mater. 2018. Vol. 1. P. 247–268. doi: 10.1007/s42114-018-0023-8.

4. Разработка технологических приемов управления свойствами композитов на основе политетрафторэтилена, содержащих наномодификаторы / А.А. Охлопкова [и др.] // Вопросы материаловедения. 2013. № 1(73). С. 136–145.

5. Влияние ультразвуковой активации на структурообразование политетрафторэтилена, модифицированного нитридом бора / Д.А. Негров [и др.] // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1. № 2. С. 57–61.

6. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена / А.А. Охлопкова [и др.] // Российский химический журнал. 2008. Т. 52, № 3. С. 147–152.

7. Исследование полимерных композитов с гибридной матрицей, полученных методом взрывного прессования / Н.А. Адаменко [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2019. № 10(233). С. 48–52.

8. Износостойкость композитов на гибридной матрице СВМПЭ-ПТФЭ: механические и триботехнические свойства матрицы / С.В. Панин [и др.] // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 3. С. 325–333.

9. Manufacturing technology of composite materials-principles of modification of polymer composite materials technology based on polytetrafluoroethylene / Panda A. [et al.] // Materials. 2017. Т. 10. №. 4. С. 377. doi: 10.3390/ma10040377.

10. The effect of ultrasonic activation on the formation of polytetrafluoroethylene modified by detonation nanodiamonds / D.A. Negrov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series : Mechanical Science and Technology Update. Omsk : Institute of Physics Publishing, 2019. P. 062016. doi: 10.1088/1742-6596/1260/6/062016.

11. Никитина А.В., Охлопкова А.А., Васильев А.П. Исследование влияния наноразмерного нитрида бора на свойства политетрафторэтилена // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению:

Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. С. 329–333. doi: 10.17084/978-5-7765-1502-6-2022-329.

12. Microstructure and Properties of Polytetrafluoroethylene Composites Modified by Carbon Materials and Aramid Fibers / Zhang F. [et al.] // Coatings. 2020. Vol. 10. No. 11. P. 1103–1123. doi: 10.3390/coatings10111103.

13. Song J., Lei H., Zhao G. Improved mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene reinforced by carbon nanotubes: A molecular dynamics study // Computational Materials Science. 2019. Vol. 168. P. 131–136. doi: 10.1016/j.commatsci.2019.05.058.

14. Исследование влияния многостенных углеродных нанотрубок на свойства политетрафторэтилена / А.А. Охлопкова [и др.] // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2015. № 5(49). С. 43–50.

15. Functionalization of Carbon Nanotubes in Polystyrene and Properties of Their Composites: A Review / Li Hongfy [et al.] // Polymers 2024. V. 16(6). 770. doi: 10.3390/polym16060770.

16. Дьячкова Т.П., Ткачев А.Г. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок: монография / Издательский дом «Спектр», 2013. 152 с.

17. Yan S.C., Xue Y.H. Surface wettability, tensile mechanical performance, and tribological behavior of polyimide/polytetrafluoroethylene blends enhanced with hydroxylated multiwalled carbon nanotubes at high relative humidity // Polymer Composites. 2021. V. 42 (9). P. 4517–4532. doi: 10.1002/pc.26165.

18. Негров Д.А., Путинцев В.Ю. Усовершенствование технологии прессования изделий из политетрафторэтилена // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14, № 5. С. 564–571. doi: 10.17516/1999-494X-0333.

Информация об авторах

Д. А. Негров – доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и технологии материалов» Омского государственного технического университета.

В. Ю. Путинцев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии материалов» Омского государственного технического университета.

Е. В. Князев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технологии материалов» Омского государственного технического университета.

А. И. Глотов – ассистент кафедры «Материаловедение и технологии материалов» Омского государственного технического университета.

Д. А. Вебер – ассистент кафедры «Материаловедение и технологии материалов» Омского государственного технического университета.

REFERENCES

1. Markova, M.A. & Petrova, P.N. (2020). Investigation of the effect of carbon fibers and composite production technologies on the properties of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene // Perspective materials, (11), 59-68. (In Russ.). doi: 10.30791/1028-978X-2020-11-59-68.

2. Vershina, G.A. & Reut, L.E. (2016). Analysis of the deformation behavior of fluoroplast-4 under conditions of force // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. A series of physical and technical sciences, (4), 23-30. (In Russ.).
3. Dhanumalayan, E. & Joshi, G.M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) - a review // Adv. Compos. Hybrid Mater, (1), 247-268. doi: 10.1007/s42114-018-0023-8.
4. Okhlopkova, A.A. [et al.]. (2013). Development of technological methods for controlling the properties of composites based on polytetrafluoroethylene containing nanomodifiers // Questions of materials science, (73). 136-145. (In Russ.).
5. Negrov, D.A. [et al.]. (2017). The effect of ultrasonic activation on the structure formation of polytetrafluoroethylene modified with boron nitride // Omsk Scientific Bulletin. A series of aviation, rocket and power engineering, (2), 57-61.
6. Okhlopkova, A.A. [et al.]. (2008). Polymer composite materials for tribotechnical purposes based on polytetrafluoroethylene // Russian Chemical Journal, (3), 147-152. (In Russ.).
7. Adamenko, N.A. [et al.]. (2019). Investigation of polymer composites with a hybrid matrix obtained by explosive pressing // Proceedings of the Volgograd State Technical University, (10), 48-52. (In Russ.).
8. Panin, S.V. [et al.]. (2015). Wear resistance of composites based on a UHMWPE-PTFE hybrid matrix: mechanical and tribotechnical properties of the matrix // Friction and wear. (3), 325-333. (In Russ.).
9. Panda, A. [et al.]. (2017). Manufacturing technology of composite materials-principles of modification of polymer composite materials technology based on polytetrafluoroethylene // Materials, (4), 377 doi: 10.3390/ma10040377.
10. Negrov, D.A. [et al.]. (2019). The effect of ultrasonic activation on the formation of polytetrafluoroethylene modified by detonation nanodiamonds // Journal of Physics: Conference Series: Mechanical Science and Technology Update. Omsk : Institute of Physics Publishing, 062016. doi: 10.1088/1742-6596/1260/6/062016.
11. Nikitina, A.V., Okhlopkova, A.A. & Vasiliev, A.P. Investigation of the effect of nanoscale boron nitride on the properties of polytetrafluoroethylene. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University. (In Russ.). doi: 10.17084/978-5-7765-1502-6-2022-329.
12. Zhang, F. [et al.]. (2020). Microstructure and Properties of Polytetrafluoroethylene Composites Modified by Carbon Materials and Aramid Fibers // Coatings, (11), 1103-1123. doi: 10.3390/coatings10111103.
13. Song, J. Lei, H. & Zhao, G. (2019). Improved mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene reinforced by carbon nanotubes: A molecular dynamics study // Computational Materials Science, (168), 131-136. doi: 10.1016/j.commatsci.2019.05.058.
14. Okhlopkova, A.A. [et al.]. (2015). Investigation of the effect of multi-walled carbon nanotubes on the properties of polytetrafluoroethylene // Bulletin of the Northeastern Federal University named after M.K. Amosov, (5), 43-50. (In Russ.).
15. Li, Hongfy. (2024). Functionalization of Carbon Nanotubes in Polystyrene and Properties of Their Composites: A Review // Polymers, (6), 770. doi: 10.3390/polym16060770.
16. Dyachkova, T.P. & Tkachev, A.G. (2013). Methods of carbon nanotube functionalization and modification : Monograph. Moscow : Spektr Publishing House. (In Russ.).
17. Yan, S.C. & Xue, Y.H. (2021). Surface wettability, tensile mechanical performance, and tribological behavior of polyimide/polytetrafluoroethylene blends enhanced with hydroxylated multiwalled carbon nanotubes at high relative humidity // Polymer Composites, (9), 4517-4532. doi: 10.1002/PC.26165.
18. Negrov, D.A. & Putintsev, V.Yu. (2021). Improvement of the technology of pressing polytetrafluoroethylene products // Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and technology, (5), 564-571. doi: 10.17516/1999-494X-0333. (In Russ.).

Information about the authors

D.A. Negrov - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Materials science and technology of materials, Omsk State Technical University.

V.Yu. Putintsev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Materials science and technology of materials, Omsk State Technical University.

E.V. Knyazev - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Materials science and technology of materials, Omsk State Technical University.

A.Ig. Glotov - Assistant of the Department Materials science and technology of materials, Omsk State Technical University.

D.A. Veber - Assistant of the Department Materials science and technology of materials, Omsk State Technical University.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mart 2026.