

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 678.743.41:621.793.14:539.61

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.008

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА АДГЕЗИЮ, МОРФОЛОГИЮ И СТРУКТУРУ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Андрей Петрович Васильев¹, Надежда Николаевна Лазарева²,
Ульяна Викторовна Хомутова^{3,4}, Олеся Александровна Лапуть⁵,
Прасковья Николаевна Тарасова⁶, Юлия Валерьевна Капитонова⁷,
Александр Алексеевич Черкасов⁸, Максим Валентинович Шандриков⁹,
Долгуйаана Николаевна Сидорова¹⁰, Айталиа Алексеевна Охлопкова¹¹,
Ирина Александровна Курзина¹²

^{1, 2, 6, 7, 10, 11} Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Белинского, 58, Якутск, 677000, Россия

^{3, 5, 12} Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия

^{4, 8, 9} Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, пр. Академический, 2/3, Томск, 634055, Россия

¹ gtvap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7699-533X>

² lazareva-nadia92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>

^{3,4} ugoroshkinau@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8110-4482>

⁵ olesyalaput@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5553-5983>

⁶ pn.tarasova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8382-9735>

⁷ kapitonova-kirillina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0530-0227>

⁸ cherkasov.a@hcei.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2429-4969>

⁹ shandrikov@hcei.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0844-0356>

¹⁰ dolguyana.sidorova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7470-5634>

¹¹ okhlopkova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>

¹² kurzina99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4976-2295>

Аннотация. В работе исследовано влияние материала металлического покрытия на адгезионные, морфологические, структурные и поверхностные характеристики политетрафторэтилена (ПТФЭ), модифицированного методом ДС-магнетронного напыления с предварительной плазменной активацией поверхности. В качестве материалов покрытий использовали Ст3, титан и нержавеющую сталь 12Х18Н10Т. Установлено, что нанесение металлических слоев изменяет микрорельеф и снижает шероховатость поверхности ПТФЭ: параметр Ra уменьшается с 2,16 мкм для исходного полимера до 1,16–1,81 мкм для металлизированных образцов. Металлизация также приводит к снижению краевых углов смачивания и повышению свободной поверхностной энергии. Наибольшая прочность при отрыве достигнута для покрытия из титана и составила 0,81 МПа, что связано с формированием более связной и менее дискретной морфологии пленки. Покрытие Ст3 толщиной около 800 нм обеспечило максимальную прочность при сдвиге – 1,28 МПа, что объясняется механическим зацеплением крупных фрагментов покрытия с клеевым слоем. По данным рентгеноструктурного анализа, объемная кристаллическая структура ПТФЭ после металлизации сохраняется. ИК-спектроскопия показала отсутствие новых полос поглощения после испытаний на отрыв, что согласуется с адгезионным характером разрушения. Полученные результаты показывают перспективность магнетронного напыления для формирования функциональных металлических покрытий на поверхности ПТФЭ.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, металлизация, магнетронное напыление, металлические покрытия, адгезия, смачиваемость, поверхностная энергия.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-13-20061, <https://rscf.ru/project/25-13-20061/>

Для цитирования: Васильев А.П., Лазарева Н.Н., Хомутова У.В., Лапуть О.А., Тарасова П.Н., Капитонова Ю.В., Черкасов А.А., Шандриков М.В., Сидорова Д.Н., Охлопкова А.А., Курзина И.А. Влияние материала металлического покрытия на адгезию, морфологию и структуру металлизированного политетрафторэтилена

// Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 3. С. 350-364.
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.008.

Original article

EFFECT OF METALLIC COATING MATERIAL ON THE ADHESION, MORPHOLOGY, AND STRUCTURE OF METALLIZED POLYTETRAFLUOROETHYLENE

Andrey P. Vasilev¹, Nadezhda N. Lazareva², Ulyana V. Khomutova^{3,4}, Olesya A. Laput⁵,
Praskovia N. Tarasova⁶, Iuliia V. Kapitonova⁷, Aleksandr A. Cherkasov⁸, Maksim V. Shandrikov⁹,
Dolguyaana N. Sidorova¹⁰, Aitalina A. Okhlopova¹¹, Irina A. Kurzina¹²

^{1, 2, 6, 7, 10, 11} North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Belinsky St., 58, Yakutsk, 677000, Russia

^{3, 5, 12} National Research Tomsk State University, Lenin Ave., 36, Tomsk, 634050, Russia

^{4, 8, 9} Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskoy Ave., 2/3, Tomsk, 634055, Russia

¹ gtvap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7699-533X>

² lazareva-nadia92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>

^{3,4} ugoroshkina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8110-4482>

⁵ olesyalaput@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5553-5983>

⁶ pn.tarasova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8382-9735>

⁷ kapitonova-kirillina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0530-0227>

⁸ cherkasov.a@hcei.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2429-4969>

⁹ shandrikov@hcei.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0844-0356>

¹⁰ dolguyaana.sidorova@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7470-5634>

¹¹ okhlopova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>

¹² kurzina99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4976-2295>

Abstract. This study investigates the effect of metallic coating material on the adhesive, morphological, structural, and surface characteristics of polytetrafluoroethylene (PTFE) modified by DC magnetron sputtering with preliminary plasma surface activation. St3 steel, titanium, and 12Kh18N10T stainless steel were used as coating materials. It was found that the deposition of metallic layers changes the microrelief and reduces the surface roughness of PTFE: the R_a parameter decreases from 2.16 μm for the pristine polymer to 1.16–1.81 μm for the metallized samples. Metallization also leads to a decrease in contact angles and an increase in free surface energy. The highest pull-off strength was achieved for the titanium coating and amounted to 0.81 MPa, which is associated with the formation of a more continuous and less discrete film morphology. The St3 coating with a thickness of about 800 nm provided the maximum shear strength of 1.28 MPa, which can be explained by mechanical interlocking of large coating fragments with the adhesive layer. According to X-ray diffraction analysis, the bulk crystalline structure of PTFE is preserved after metallization. IR spectroscopy showed no new absorption bands after pull-off tests, which is consistent with the adhesive nature of failure. The obtained results demonstrate the potential of magnetron sputtering for the formation of functional metallic coatings on the PTFE surface.

Keywords: polytetrafluoroethylene, metallization, magnetron sputtering, metallic coatings, adhesion, wettability, surface energy.

Acknowledgements: The research is supported by a grant from the Russian Science Foundation, No. 25-13-20061, <https://rscf.ru/project/25-13-20061/>.

For citation: Vasilev A.P., Lazareva N.N., Khomutova U.V., Laput O.A., Tarasova P.N., Kapitonova Yu.V., Cherkasov A.A., Shandrikov M.V., Sidorova D.N., Okhlopova A.A. & Kurzina I.A. (2026). Effect of metallic coating material on the adhesion, morphology, and structure of metallized polytetrafluoroethylene. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(3), 350-364 (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.008.

Введение

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) является наиболее распространенным фторполимером. Он представляет собой полукристаллический

термопласт, состоящий из атомов углерода и фтора. Такие свойства ПТФЭ, как исключительная химическая инертность, высокая термо- и морозостойкость, антиадгезионные характеристики и низкий коэффициент трения,

обусловлены прежде всего высокой энергией связи C–F (~485 кДж/моль). Эта энергия значительно превышает энергию связи C–C (~359 кДж/моль) в цепи полимера [1,2]. Важную роль также играют высокая электроотрицательность фтора и формирование плотной инертной «оболочки» из атомов фтора вокруг углеродной цепи. Благодаря этим свойствам ПТФЭ широко применяется в химической, электротехнической, авиационной и космической промышленности, медицине, автомобилестроении [3]. Металлизация ПТФЭ с формированием проводящих покрытий особенно востребована в электронике (гибкие печатные платы, экранирование), авиакосмической технике и медицине [4–6].

Однако крайняя химическая инертность и низкая поверхностная энергия ПТФЭ существенно затрудняют получение прочных адгезионных соединений с металлами. Поэтому для металлизации ПТФЭ применяют различные методы активации поверхности. Традиционный подход с использованием клеевого соединения имеет ограничения при эксплуатации в условиях экстремально низких температур, что стимулирует поиск альтернативных способов нанесения металлических покрытий [7]. Для получения металлических покрытий без использования клеевого слоя поверхность ПТФЭ необходимо предварительно активировать, поскольку низкая поверхностная энергия и химическая инертность полимера затрудняют его адгезионное взаимодействие с металлами. Химическое травление способствует активации поверхности для последующего нанесения металлов, но временный эффект активации совместно с риском деградации ПТФЭ, низкой прочностью связи металла и полимерной подложки, а также использованием токсичных реагентов делает данный метод малоперспективным для дальнейшего применения [8]. Электрохимическое осаждение, а также термическое испарение или холодное напыление (например, метод «Димет») не обеспечивают высокой адгезии металла и полимерной матрицы без предварительной активации поверхности [9], при этом число исследований по данной тематике крайне мало. В то же время магнетронное

напыление позволяет формировать тонкие металлические покрытия на ПТФЭ при относительно низких температурах, сохраняя структуру полимера и обеспечивая контролируемую толщину, однородность и повышенную адгезию покрытия. Данный метод превосходит альтернативы за счет работы в вакууме с магнитным полем, минимизируя дефекты и примеси, что делает его идеальным для материалов на основе ПТФЭ [10].

В настоящей работе исследован процесс металлизации поверхности ПТФЭ методом магнетронного напыления. В качестве мишеней для магнетронного распыления и последующего осаждения покрытий использовались: магнитная сталь Ст3, титан и нержавеющая немагнитная сталь 12Х18Н10Т. Химический состав Ст3: Fe – 97 %; C – 0,14–0,22 %; Ni, Cu, Cr – каждый не больше 0,3 %; Mn – 0,4–0,65 %; Si – 0,05–0,17 %; As < 0,08 %; S ≤ 0,05 %; P < 0,04 %. Химический состав 12Х18Н10Т: C ≤ 0,12 %; Cr ~ 18 %; Ni ~ 10 %; Ti < 0,8 %. Цель работы – установить влияние материала металлического покрытия и толщины слоя Ст3, сформированных методом магнетронного напыления с предварительной плазменной активацией поверхности, на морфологию, смачиваемость, структурное состояние и адгезионные свойства металлизированного ПТФЭ.

Материалы и методы

В работе использовали политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки ПН-90 производства АО «ГалоПолимер» (Россия). Порошок имел средний размер частиц 90 ± 10 мкм и плотность 2,16 г/см³.

ПТФЭ получали методом холодного прессования порошка при давлении 50 МПа с последующим спеканием в программируемой электрической печи SNOL 15/900 (Литва) при температуре 375 °С (режим подъема температуры – 60 °С/ч, выдержка 2 ч, охлаждение со скоростью печи). Толщина готовых листов составляла $2,0 \pm 0,2$ мм. В таблице 1 представлены результаты физико-механических характеристик исходного полимера [11].

Таблица 1. Физико-механические свойства ПТФЭ

Table 1. Physical and mechanical properties of PTFE

Образец	$\sigma_{\text{рм}}$, МПа	$\varepsilon_{\text{рр}}$, %	E, МПа	ρ , г/см ³	Твердость по Шору D
ПТФЭ	$29 \pm 2,9$	400 ± 40	403 ± 27	$2,16 \pm 0,01$	$56 \pm 1,0$

Примечание: $\sigma_{\text{рм}}$ – прочность при растяжении; $\varepsilon_{\text{рр}}$ – относительное удлинение при разрыве; E – модуль упругости при растяжении; ρ – плотность.

Металлические покрытия были получены методом магнетронного распыления. Схема экспериментальной установки и фотографии образцов представлены на рисунке 1. Магнетронный разряд функционировал в DC режиме. Электрическое питание разряда осуществлялось от специализированного блока питания (ООО «Прикладная электроника») с системой стабилизации параметров (P, I, U) и защиты от дуговых разрядов. Металлические мишени-катоды 1 устанавливались на водоохлаждаемый корпус магнетрона. Диаметр мишени составлял 50 мм, толщина 3 мм. Немагнитные мишени (Ti, 12X18H10T) устанавливались на корпус с использованием теплопроводящей пасты. Для распыления магнитных материалов (Ст3) мишень термоизолировалась и предварительно разогревалась до температуры выше точки Кюри (~400 °C). В качестве анода магнетрона использовались стенки вакуумной камеры 4. Откачка вакуумной камеры осуществлялась турбомолекулярным насосом со скоростью откачки 500 л/с. Рабочий газ (Ar) подводился трубкой непосредственно к области магнетронного разряда. Ток разряда варьировался от 450 до 500 мА. Образцы 5 закреплялись на пластинеподложкодержателе 6, которая, в свою очередь, крепилась на вал мотора-редуктора. Скорость вращения подложки составляла 20 об/мин. При этом ось мишени магнетрона и ось подложкодержателя были смещены на величину радиуса окружности $R = 3$ см, на которой размещались

образцы на подложке, так что при прохождении зоны напыления образец проходил ровно напротив центра мишени магнетрона. Расстояние от мишени до поверхности образцов составляло 10 см. Перед напылением образцы выдерживали в плазме аргона в течение 5 мин, генерируемой отдельным источником плазмы. Концентрация плазмы аргона в области расположения подложкодержателя составляла порядка $1 \cdot 10^{10}$ см⁻³.

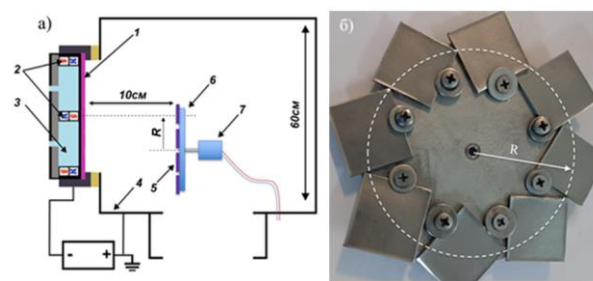


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – мишень магнетрона (катод); 2 – магнитная система; 3 – водяное охлаждение мишени и магнитов; 4 – вакуумная камера (анод); 5 – образцы; 6 – карусельный держатель образцов, 7 – мотор-редуктор вращения держателя образцов

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup: 1 – magnetron target (cathode); 2 – magnetic system; 3 – water cooling of the target and magnets; 4 – vacuum chamber (anode); 5 – samples; 6 – carousel sample holder; 7 – gear motor for rotating the sample holder

Параметры нанесения металлических покрытий на поверхность ПТФЭ методом магнетронного напыления представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры нанесения металлических покрытий на поверхность ПТФЭ

Table 2. Parameters for applying metal coatings to the PTFE surface

Маркировка образцов и материал мишени	Материал мишени	Ток разряда, А	Напряжение, В	Газ	Рабочее давление, мТорр	Расстояние, см	Время напыления, мин	Описание
ПТФЭ-Ti	Титан	0,45	410	Ar	2,5	10	10	Толщина слоя ~ 450 нм
ПТФЭ-Ст3 (№1)	Ст3	0,5	436		3		10	Толщина слоя ~ 700 нм
ПТФЭ-Ст3 (№2)								Толщина слоя ~ 800 нм
ПТФЭ-12Х18Н10Т	12Х18Н10Т	0,45	490		2,5		15	Толщина слоя > 1 мкм

Прочность адгезионных соединений оценивали методами отрыва (ГОСТ 32299-2013) и сдвига (ГОСТ Р 57834-2017) на универсальной машине Autograph AGS-J (Shimadzu, Япония). В качестве адгезива применяли двухкомпонентный эпоксидный клей с металлическим наполнителем ADHESOL M 346 (ООО «Эластомерик Системс», Россия).

При испытаниях на отрыв цилиндрические стальные заготовки (Ø 8 мм) приклеивали к поверхности металлизированного ПТФЭ эпоксидным клеем с последующим отверждением в течение 24 ч. При испытаниях на сдвиг использовали нахлесточные соединения ПТФЭ–клей–сталь Ст3 с площадью контакта 100 мм². Поверхности обезжиривали ацетоном, сталь дополнительно обрабатывали шлифовальной бумагой Р400. Клей наносили слоем 0,1–0,2 мм, образцы выдерживали под давлением 0,5 МПа в течение 24 ч. Скорость нагружения при отрыве – не более 1 МПа/с, при сдвиге – 1 мм/мин.

Морфологию поверхности металлизированных образцов ПТФЭ исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-7800F (JEOL, Япония) в режиме вторичных электронов и методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Scientific, Швейцария). Размер ОКР оценивали по формуле Шеррера.

ИК-спектроскопию проводили на Фурье-спектрометре Varian 7000 FT-IR (Varian, США) с приставкой НПВО в диапазоне 550–4000 см⁻¹.

Деконволюцию области 620–645 см⁻¹ проводили методом наименьших квадратов с использованием профилей Фойгта в программе Fityk v.1.3.1 после коррекции базовой линии. Количественную оценку проводили по отношению интегральных интенсивностей полос.

Шероховатость образцов определяли с помощью портативного измерителя шероховатости TR220 (Beijing Time High Technology Co., Ltd, Китай) по техническим условиям GB/T 3505–2000. Измерение параметров R_a, R_z, R_q и R_{sk} проводили в соответствии с ГОСТ 2789–73.

Исследование контактных свойств модифицированных материалов ПТФЭ проводили на установке для измерения краевого угла смачивания DSA25 (KRUS, Германия) с помощью программного обеспечения «ADVANCE» (KRUS, Германия). Смачиваемость поверхности оценивали методом лежащей капли с использованием двух контактных жидкостей – воды и глицерина. Расчет поверхностной энергии производили на основе измеренных краевых углов смачивания согласно модели Оуэнса–Вендта–Рабеля–Кельбле [12].

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования шероховатости поверхности исходного и металлизированного ПТФЭ по параметрам R_a, R_z, R_q и R_{sk} приведены в таблице 3 и на рис. 2.

Таблица 3. Параметры шероховатости поверхности

Table 3. Surface roughness parameters

Материал / Покрытие	R_a (мкм)	R_z (мкм)	R_q (мкм)	R_{sk}
ПТФЭ исходный	$2,16 \pm 0,08$	$12,51 \pm 0,63$	$2,72 \pm 0,16$	$-0,22 \pm 0,31$
ПТФЭ-Ст3 (№1)	$1,44 \pm 0,14$	$8,48 \pm 1,10$	$1,80 \pm 0,20$	$-0,32 \pm 0,24$
ПТФЭ-Ст3 (№2)	$1,81 \pm 0,22$	$11,87 \pm 2,09$	$2,34 \pm 0,27$	$0,54 \pm 0,38$
ПТФЭ-Ti	$1,16 \pm 0,15$	$5,56 \pm 0,48$	$1,43 \pm 0,16$	$0,19 \pm 0,20$
ПТФЭ-12X18H10T	$1,19 \pm 0,15$	$7,12 \pm 0,65$	$1,48 \pm 0,16$	$0,15 \pm 0,08$

Примечание: R_a – среднее арифметическое отклонение профиля; R_z – высота неровностей профиля; R_q – среднеквадратичное отклонение профиля; R_{sk} – коэффициент асимметрии профиля.

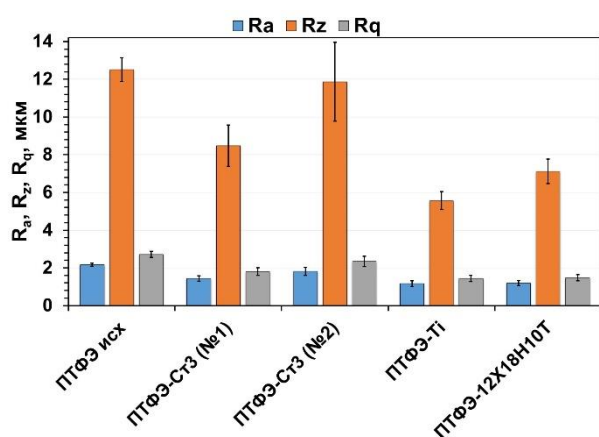


Рис. 2. Параметры шероховатости поверхности (R_a , R_z , R_q) исходного и металлизированного ПТФЭ

Fig. 2. Surface roughness parameters (R_a , R_z , R_q) of pristine and metallized PTFE

Как видно из рис. 2 и таблицы 3, поверхность исходного ПТФЭ обладает значительно большей шероховатостью ($R_a = 2,16 \pm 0,08$ мкм, $R_z = 12,51 \pm 0,63$ мкм), что типично для прессованных и спеченных изделий из полимера без финишной обработки. Полученные значения согласуются с данными литературы [13, 14].

После магнетронного напыления тонких металлических слоев параметры R_a , R_z и R_q снижаются в 1,2–2,3 раза по сравнению с исходным ПТФЭ. Наиболее гладкий рельеф формируется при использовании титана ($R_a = 1,16 \pm 0,15$ мкм, $R_z = 5,56 \pm 0,48$ мкм) и нержавеющей стали 12X18H10T ($R_a = 1,19 \pm 0,15$ мкм, $R_z = 7,12 \pm 0,65$ мкм), при этом R_{sk} близок к нулю, что свидетельствует о сбалансированном про-

филе без резкого преобладания пиков или впадин.

Покрyтия из Ст3 демонстрируют большую шероховатость (особенно при толщине 800 нм: $R_a = 1,81 \pm 0,22$ мкм, $R_z = 11,87 \pm 2,09$ мкм) и положительное значение R_{sk} ($0,54 \pm 0,38$). Это связано с формированием дискретной слоистой (хлопьевидной) структуры покрытия. С увеличением толщины слоя растет размер отдельных хлопьев и степень их приподнятости над поверхностью, что приводит к увеличению параметра R_a и положительной асимметрии профиля ($R_{sk} > 0$). Титановое и нержавеющей покрытие, напротив, формируют более мелкую и равномерную дискретную структуру, что обеспечивает меньшую шероховатость и близкое к нулю значение R_{sk} .

На рис. 3 приведены типичные профили шероховатости поверхности исходного ПТФЭ и металлизированного образца ПТФЭ-Ti. Профиль исходного материала характеризуется выраженными пиками и впадинами с амплитудой до $\pm(10-15)$ мкм, что и обуславливает высокое значение $R_a = 2,16$ мкм. Нанесение титанового покрытия приводит к заметному сглаживанию рельефа, снижению высоты неровностей и, как следствие, уменьшению параметра R_a примерно в 1,9 раза по сравнению с исходным ПТФЭ.

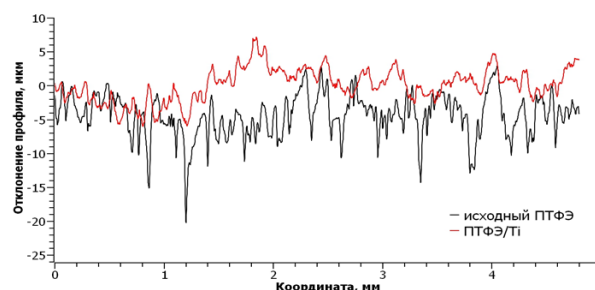


Рис. 3. Профиль поверхности исходного ПТФЭ и ПТФЭ-Ti

Fig. 3. Surface roughness profiles of pristine PTFE and PTFE-Ti

Методом рентгеноструктурного анализа было оценено влияние металлизации на струк-

туру приповерхностного слоя ПТФЭ. Результаты РСА-исследования приведены на рис. 4.

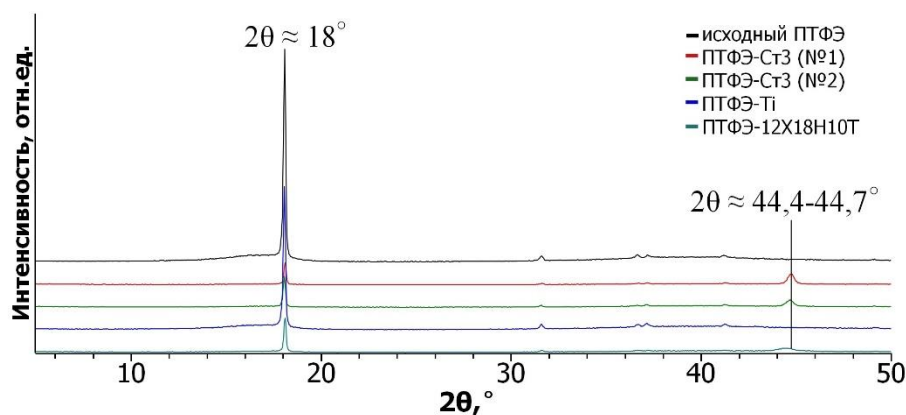


Рис. 4. Дифракционные кривые исходного и металлизированного ПТФЭ

Fig. 4. XRD patterns of pristine and metallized PTFE

Анализ результатов РСА показывает, что нанесение металлических покрытий приводит к существенному изменению интенсивности основного рефлекса ПТФЭ при $2\theta \approx 18^\circ$. Для покрытий на основе Ст3 и нержавеющей стали 12X18H10T интенсивность этого пика снижается на 70–80 % по сравнению с исходным ПТФЭ, что обусловлено поглощением рентгеновского излучения в металлическом слое.

Положение и ширина основного рефлекса ПТФЭ при $2\theta \approx 18^\circ$ после нанесения покрытий существенно не изменяются, что указывает на сохранение кристаллической структуры полимера в объеме, доступном для анализа методом РСА.

Появление рефлексов в области $2\theta = 44,4\text{--}44,7^\circ$ для образцов с железными покрытиями позволяет идентифицировать кристаллическую фазу α -Fe (ОЦК), с размером областей когерентного рассеяния 25–30 нм. Для покрытия из нержавеющей стали 12X18H10T наблюдается значительное уширение дифракционного пика металлической фазы ($\text{FWHM} = 0,6193^\circ$), что свидетельствует о формировании нанокристаллической структуры покрытия со средним размером кристаллитов ~ 14 нм.

Для оценки качества и целостности полученных покрытий был проведен СЭМ-анализ поверхности металлизированного ПТФЭ после магнетронного напыления (рис. 5).

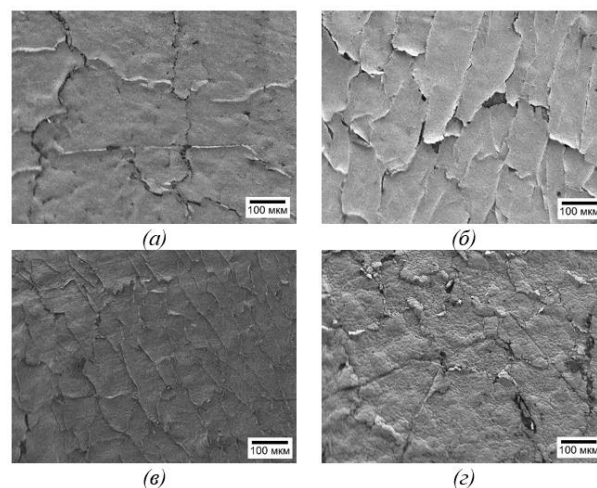


Рис. 5. Морфология поверхностей металлизированной поверхности ПТФЭ: а) ПТФЭ-Ст3 (№1); б) ПТФЭ-Ст3 (№2); в) ПТФЭ-Ti; г) ПТФЭ-12X18H10T

Fig. 5. SEM micrographs of the surface morphology of metallized PTFE: a) PTFE-St3 (No. 1); b) PTFE-St3 (No. 2); c) PTFE-Ti; d) PTFE-12Kh18N10T

Как видно из рис. 5, все исследованные металлы формируют на плазменно-активированном ПТФЭ дискретную слоистую структуру, состоящую из отдельных хлопьев и пластинок, которые не полностью срастаются между собой и с подложкой. Такая морфология может быть связана с островковым ростом металлических пленок по механизму Вольмера–Вебера на низкоэнергетических поверхностях

полимеров, в том числе ПТФЭ, и обычно сохраняется даже после плазменной активации [15, 16]. При толщине железного покрытия 700 нм наблюдаются крупные плоские хлопья, которые уже частично приподняты над поверхностью по границам между элементами. Увеличение толщины до 800 нм приводит к ещё более выраженной дискретной слоистой структуре – появляются крупные отслоившиеся пластины и обширные зоны с минимальным контактом покрытия с подложкой. Это указывает на накопление внутренних напряжений с ростом толщины железной пленки. Титановое покрытие демонстрирует наиболее благоприятную морфологию: дискретный характер сохраняется, однако отдельные элементы имеют меньший размер и визуально лучше срастаются между собой, образуя более связную сеть. Это обеспечивает наилучший контакт с активированной поверхностью ПТФЭ. Покрытие из нержавеющей стали 12Х18Н10Т характеризуется наиболее фрагментированной структурой с мелкими островками. Покрытие имеет выраженный дискретный характер с множеством слабых границ между структурными элементами.

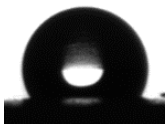
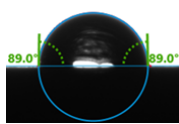
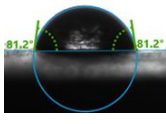
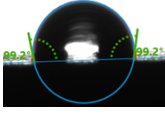
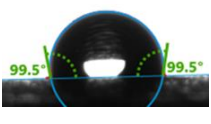
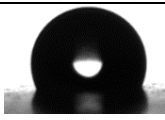
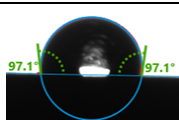
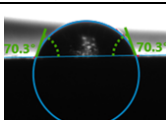
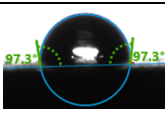
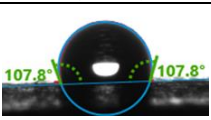
Таким образом, морфологический анализ показывает, что тип металла и толщина покрытия существенно влияют на степень дискретности и целостность пленки уже на стадии оса-

ждения. Титановое покрытие образует наименее дискретную и наиболее связную слоистую структуру, тогда как покрытия Ст3 (особенно толщиной 800 нм) и нержавеющая сталь склонны к формированию рыхлой, сильно фрагментированной морфологии.

Металлические покрытия на подложке из ПТФЭ, полученные методом магнетронного напыления, могут способствовать изменению смачиваемости его поверхности, как правило, снижая гидрофобность исходного тефлона за счет изменения микрорельефа и химического состава поверхностного слоя [17]. Исследуемый в данной работе ПТФЭ в исходном состоянии характеризуется следующими значениями краевых углов смачивания поверхности: для воды $115,1^\circ \pm 4,5^\circ$, для глицерина $115,6^\circ \pm 7,8^\circ$ (табл. 4). В результате нанесения металлических покрытий на поверхность материалов наблюдается снижение краевого угла смачивания для всех образцов. Образцы ПТФЭ-Ст3 (№ 1, 2) характеризуются гидрофильной поверхностью, так как значения КУС для них $<90^\circ$. Наибольшей смачиваемостью обладает образец ПТФЭ-Ст3 (№2) (КУС $81,42^\circ \pm 1,10^\circ$). Данное явление, вероятно, связано с изменением микрорельефа - высокими значениями шероховатости, а также формированием более слоистой структуры [18]

Таблица 4. Краевой угол смачивания для образцов ПТФЭ до и после нанесения металлических покрытий

Table 4. Contact angle of wetting for PTFE samples before and after deposition of metal coatings

Образец	ПТФЭ исх.	ПТФЭ-Ст3 (№1)	ПТФЭ-Ст3 (№2)	ПТФЭ-Ti	ПТФЭ- 12Х18Н10Т
Контактная жидкость	Краевой угол смачивания, град.				
Вода	$115,08 \pm 4,46$	$88,45 \pm 0,49$	$81,42 \pm 1,10$	$99,28 \pm 3,26$	$99,54 \pm 0,40$
					
Глицерин	$115,65 \pm 7,78$	$96,50 \pm 0,75$	$70,65 \pm 3,82$	$97,33 \pm 1,18$	$106,06 \pm 4,63$
					

Металлические покрытия имеют существенно более высокую поверхностную энергию, чем ПТФЭ, поэтому граница «жидкость–металл» смачивается водой лучше, чем граница «жидкость–ПТФЭ». Для исходного ПТФЭ по-

верхностная энергия составляет 6,15 мН/м, при этом основной вклад в энергию вносит дисперсионная компонента. Наряду со снижением значений краевых углов смачивания наблюдается повышение свободной поверхностной энергии для всех исследуемых образцов после

магнетронного воздействия. Наибольшее значение поверхностной энергии демонстрируют образцы ПТФЭ-СтЗ (№2) – 27,4 мН/м (рис. 6). При этом, основной вклад в энергию, за исключением данного образца, вносит полярная компонента. Это может указывать на значительное изменение химии поверхности материалов после магнетронного напыления металлов, так как помимо металлических включений в процессе обработки и последующей экспозиции на воздухе на полимерной поверхности могут образовываться полярные кислород- и азотсодержащие функциональные группы, которые дополнительно оказывают влияние на повышение гидрофильности поверхности ПТФЭ по сравнению с исходным материалом.

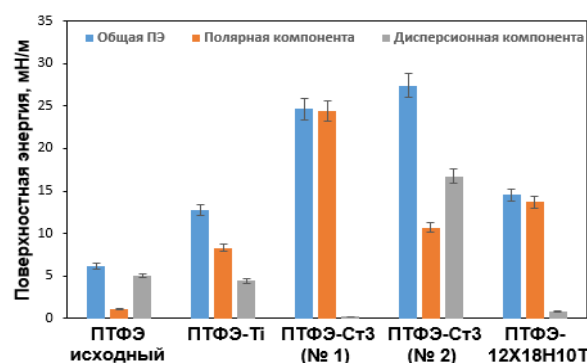


Рис. 6. Поверхностная энергия ПТФЭ до и после нанесения металлических покрытий

Fig. 6. Surface energy of PTFE before and after deposition of metal coatings

Для оценки того, насколько наблюдаемая морфология покрытий влияет на их адгезионные свойства, были проведены механические испытания на отрыв и сдвиг. Результаты испытаний на прочность при отрыве и сдвиге приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты прочности при отрыве и сдвиге исходного ПТФЭ и металлизированного полимера

Table 5. Adhesion strength of pristine and metallized PTFE determined by pull-off and shear tests

Образец	Прочность на отрыв, МПа	Прочность при сдвиге, МПа	Характер разрушения
ПТФЭ исходный	$0,38 \pm 0,02$	$1,17 \pm 0,04$	Адгезионное
ПТФЭ-СтЗ (№1)	$0,59 \pm 0,02$	$0,99 \pm 0,02$	Адгезионное
ПТФЭ-СтЗ (№2)	$0,61 \pm 0,03$	$1,28 \pm 0,03$	Адгезионное
ПТФЭ-Тi	$0,81 \pm 0,04$	$1,16 \pm 0,02$	Адгезионное
ПТФЭ-12Х18Н10Т	$0,54 \pm 0,03$	$1,24 \pm 0,03$	Адгезионное

Во всех случаях после испытаний на отрыв на поверхности ПТФЭ визуально не наблюдалось остатков металлического покрытия и клея, что свидетельствует об адгезионном характере разрушения по границе раздела «металлическое покрытие – ПТФЭ».

Несмотря на адгезионный тип разрушения, значения прочности на отрыв хорошо коррелируют с морфологией покрытий, наблюдаемой методом СЭМ. Наиболее высокую адгезию к ПТФЭ (0,81 МПа) показало ПТФЭ-Тi, которое характеризовалось наименее дискретной и наиболее связной слоистой структурой. ПТФЭ-СтЗ, имеющие выраженную дискретную морфологию с крупными приподнятыми хлопьями, продемонстрировали промежуточные значения прочности на отрыв (0,59–0,61 МПа). Наименьшую адгезию (0,54 МПа) имело по-

крытие из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, морфология которого отличалась максимальной фрагментацией и наличием большого количества слабых границ между элементами.

Примечательно, что прочность при сдвиге не всегда коррелирует с прочностью на отрыв. Так, ПТФЭ-СтЗ толщиной 800 нм, несмотря на выраженную дискретную морфологию и относительно низкую прочность на отрыв, показало наибольшую прочность при сдвиге (1,28 МПа, на 9 % выше, чем у исходного ПТФЭ). Это можно объяснить тем, что при сдвиговой нагрузке крупные хлопья покрытия обеспечивают дополнительное механическое зацепление с эпоксидным клеем.

В целом после плазменной активации и магнетронного напыления адгезия металлических покрытий к ПТФЭ существенно возросла по сравнению с неметаллизированным матери-

алом (0,38 МПа). Наибольшее значение прочности на отрыв (0,81 МПа, +113 %) получено для титанового покрытия. Покрытия на основе Ст3 показали прочность 0,59–0,61 МПа, а покрытие из нержавеющей стали 12Х18Н10Т – 0,54 МПа. Полученные результаты свидетельствуют о повышении прочности при отрыве металлизированных покрытий от поверхности

ПТФЭ, наиболее выраженном в случае титанового покрытия.

Методом ИК-спектроскопии исследовали поверхности исходного ПТФЭ и после испытаний на отрыв, а также проведена оценка конформационных изменений в поверхностном слое деконволюцией полос CF_2 в области 620–645 cm^{-1} (рис. 7, таблица 6).

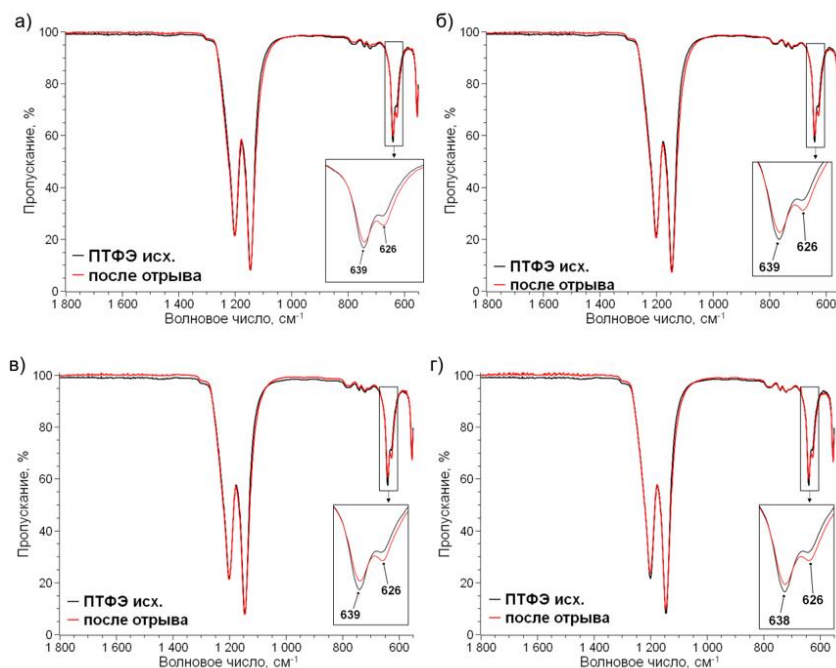


Рис. 7. ИК-спектры поверхности: а) ПТФЭ-Ст3 (№1); б) ПТФЭ-Ст3 (№2); в) ПТФЭ-Тi; г) ПТФЭ-12Х18Н10Т

Fig. 7. IR spectra of the surface: a) PTFE-St3 (No. 1); b) PTFE-St3 (No. 2); c) PTFE-Ti; d) PTFE-12Kh18N10T

ИК-спектры всех исследованных образцов практически идентичны и новых полос поглощения не появилось. Отсутствие изменений в ИК-спектрах после испытаний на отрыв согласуется с адгезионным характером разрушения, установленным при механических испытаниях.

Две полосы области ~ 625 и ~ 638 – 640 cm^{-1} являются чувствительными маркерами спиральной конформации полимера. Согласно литературным данным, полоса около 625 cm^{-1} связана с дефектами из-за изменения направления закручивания спирали, а полоса около 638–640 cm^{-1} соответствует симметричному деформационному колебанию CF_2 в правильной, регулярной спиральной конформации [19]. Для количественной оценки конформационной упорядоченности поверхностного слоя ПТФЭ было использовано отношение площадей пиков после деконволюции полос в области 620–645 cm^{-1}

Таблица 6. Площади пиков ~ 625 и ~ 638 cm^{-1} для исходного и металлизированного ПТФЭ

Table 6. Peak areas at ~ 625 and ~ 638 cm^{-1} for the initial and metallized PTFE

Образец	A_{625}	A_{638}	Отношение A_{625}/A_{638}
ПТФЭ исходный	2,751	3,357	0,819
ПТФЭ-Ст3 (№1)	2,847	3,402	0,837
ПТФЭ-Ст3 (№2)	2,678	3,640	0,736
ПТФЭ-Тi	2,507	3,644	0,688
ПТФЭ-12Х18Н10Т	2,435	3,641	0,669

После плазменной активации и магнетронного напыления металлических покрытий наблюдается снижение отношения площадей

пиков A_{625}/A_{638} по сравнению с исходным ПТФЭ. Наименьшие значения этого отношения (0,669–0,688) были характерны для образцов с покрытиями из титана и стали 12X18H10T, что свидетельствует об уменьшении доли дефектов из-за изменения направления закручивания спирали и увеличении упорядоченности спиральных конформаций полимера. Кроме того, отмечался небольшой сдвиг центров обеих полос в высокочастотную область (примерно на $0,5\text{--}1,0\text{ см}^{-1}$), указывающий на изменение молекулярного окружения колеблющихся групп. Полученные результаты могут свидетельствовать о некоторой реорганизации поверхностных цепей ПТФЭ под действием ионной бомбардировки и локального нагрева в процессе плазменной активации и магнетронного напыления. При этом объемная кристаллическая структура полимера, согласно данным РСА, сохраняется.

Выводы

1. Методом DC-магнетронного напыления с предварительной плазменной активацией поверхности на ПТФЭ получены покрытия из Ст3, Ti и нержавеющей стали 12X18H10T. Установлено, что тип металла и толщина покрытия определяют морфологию и шероховатость поверхности. После металлизации значения R_a , R_z и R_q снижаются по сравнению с исходным ПТФЭ, наиболее выражено для покрытий Ti и 12X18H10T. Во всех случаях формируется дискретная слоистая структура по механизму Вольмера–Вебера. Наиболее связная морфология характерна для Ti-покрытия, тогда как увеличение толщины Ст3 до 800 нм приводит к укрупнению хлопьев, частичному отслоению и росту R_{sk} до 0,54.

2. Металлизация поверхности ПТФЭ сопровождается снижением краевых углов смачивания и повышением свободной поверхностной энергии для всех образцов. Наиболее выраженные изменения наблюдаются для образца ПТФЭ–Ст3 (№2): краевой угол смачивания водой уменьшается с $115,08^\circ$ до $81,42^\circ$, а поверхностная энергия возрастает с 6,15 до 27,4 мН/м. Это может быть связано с изменением микрорельефа и химического состава поверхностного слоя после магнетронного напыления.

3. Адгезионные свойства металлизированного ПТФЭ зависят от материала покрытия и его морфологии. Максимальная прочность при

отрыве получена для ПТФЭ–Ti (0,81 МПа), что на 113 % выше, чем у исходного полимера. Покрытия из Ст3 и 12X18H10T показали значения 0,54–0,61 МПа. Разрушение во всех случаях имело адгезионный характер по границе раздела «металлическое покрытие – ПТФЭ». При сдвиге наибольшая прочность зафиксирована для ПТФЭ–Ст3 (№2) (1,28 МПа), что связано с механическим зацеплением крупных фрагментов покрытия с клеем.

4. По данным РСА, нанесение металлических покрытий не изменяет положение и ширину рефлекса при $2\theta \approx 18^\circ$, что указывает на сохранение объемной кристаллической структуры полимера. Снижение интенсивности этого рефлекса на 70–80 % связано с поглощением рентгеновского излучения металлическим слоем. В железосодержащих покрытиях выявлены рефлексы в области $2\theta = 44,4\text{--}44,7^\circ$.

5. ИК-спектры поверхностей ПТФЭ после испытаний на отрыв не содержали новых полос, связанных с остатками клея или продуктами химического взаимодействия, что согласуется с визуально установленным адгезионным характером разрушения. Деконволюция полос в области $620\text{--}645\text{ см}^{-1}$ выявила снижение A_{625}/A_{638} с 0,819 для исходного ПТФЭ до 0,669–0,688 для образцов с покрытиями из Ti и 12X18H10T. Это может указывать на уменьшение доли конформационных дефектов и частичную реорганизацию приповерхностных цепей ПТФЭ под действием плазменной активации и магнетронного напыления.

Список литературы

1. Abiodun S., Krishnamoorti R., Bhowmick A. K. Thermal degradation of polytetrafluoroethylene, modified polytetrafluoroethylene, and their nanocomposites with boron nitride nanobars: Lifetime predictions and kinetic analysis // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2025. – Vol. 142. – № 5. – P. e56452.
2. Puts G., Crouse P., Ameduri B. Thermal degradation and pyrolysis of polytetrafluoroethylene // *Handbook of Fluoropolymer Science and Technology*. – 2014. – P. 81–104.
3. Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) — a review // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2018. – Vol. 1. – № 2. – P. 247–268.

4. Puts G. J., Crouse P., Ameduri B. M. Polytetrafluoroethylene: synthesis and characterization of the original extreme polymer // *Chemical Reviews*. – 2019. – Vol. 119. – № 3. – P. 1763–1805.
5. Wang R., Nie J., Liu P., Pang X., Xu L., Qiao L. Effect of Magnetron Sputtering Process on the Bonding of Copper Layers on Polytetrafluoroethylene Surfaces // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2025. – Vol. 34. – P. 20485–20494.
6. Kleiman J. Surface Modification Technologies for Space and Planetary Applications // *Mechanics of Advanced Technologies*. – 2025. – Vol. 9. – № 1(104). – P. 5–21.
7. Zhang S. J., Liu Y. Y., Lv S. S., Cheng J. P., Liao B., Pang P., Deng Z., He L. Surface metallization of PTFE and PTFE composites by ion implantation for low-background electronic substrates in rare-event detection experiments // *Nuclear Science and Techniques*. – 2022. – Vol. 33. – № 7. – P. 90.
8. Kim S. R. Surface modification of poly(tetrafluoroethylene) film by chemical etching, plasma, and ion beam treatments // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2000. – Vol. 77. – № 9. – P. 1913–1920.
9. Desai H. R. Adhesion of copper to polytetrafluoroethylene surfaces modified with vacuum UV radiation downstream from He and Ar microwave plasmas : дис. ... PhD. – Rochester Institute of Technology, 2004. – 214 p.
10. Скрипаченко К. К., Кошуро В. А., Шумилин А. И., Пичхидзе С. Я. Модификация поверхности фторполимеров нанесением нанослоев алюминия магнетронным распылением // *Ученые записки Тамбовского отделения РoCMY*. – 2014. – № 2. – С. 266–268.
11. Коржова А. Г., Лапуть О. А., Казаков А. В., Лазарева Н. В., Васильев А. П., Тарасова П. Н., Капитонова Ю. В., Охлопкова А. А., Курзина И. А. Влияние поверхностной обработки импульсным электронным пучком на структурные и функциональные свойства политетрафторэтилена // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2025. – Т. 22. – № 3. – С. 272–281.
12. Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the surface free energy of polymers // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1969. – Vol. 13. – № 8. – P. 1741–1747.
13. Deaconescu T., Deaconescu A. Experimental research on polymer-based coaxial sealing systems of hydraulic cylinders for small displacement velocities // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14. – № 2. – P. 290.
14. Yin S., Taylor A., Wong J. S. S. Tribology of PTFE in hydrogen atmosphere // *Tribology International*. – 2025. – Vol. 204. – P. 110481.
15. Alfonso E., Olaya J., Cubillos G. Thin film growth through sputtering technique and its applications // *Crystallization – Science and Technology*. – 2012. – P. 401–420.
16. Siegel J., Polívková M., Staszek M., Hubáček T., Kolář M., Švorčík V. Properties of silver nanostructure-coated PTFE and its biocompatibility // *Nanoscale Research Letters*. – 2013. – Vol. 8. – № 1. – P. 388.
17. Дермель И. В., Шашкеев К. А. Особенности магнетронного распыления металлов в присутствии реактивных газов // *Труды ВИАМ*. – 2017. – № 11 (59). – С. 105–114.
18. Курзина И. А., Пухова И. В., Савкин К. П., Медовник А. В., Лапуть О. А., Чебодаева В. В. Модификация поверхностных свойств ПТФЭ методами ионного и электронно-лучевого воздействия // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2016. – Т. 13. – № 4. – С. 473–484.
19. Oonuki T., Araki T., Oka T., Matsuda H., Shioya N., Kano J., Hibara A., Hasegawa T. Molecular Disaggregation Process of PTFE Using Sodium Chloride: A Study by Infrared Spectroscopy // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2025. – Vol. 129. – № 17. – P. 4249–4255.

Информация об авторах

А. П. Васильев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник учебно-научно-технологической лаборатории «Технологии полимерных нанокомпозитов им. доцента С. А. Слепцовой» химического отделения Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова.

Н. Н. Лазарева – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник учебно-научно-технологической лаборатории «Технологии полимерных нанокомпозитов им. доцента С. А. Слепцовой» химического отделения Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова.

У. В. Хомутова – младший научный сотрудник центра исследований в области мате-

риалов и технологий Национального исследовательского Томского государственного университета, аспирант Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

О. А. Лапуть – кандидат технических наук, старший научный сотрудник центра исследований в области материалов и технологий Национального исследовательского Томского государственного университета, старший преподаватель кафедры природных соединений, фармацевтической и медицинской химии Национального исследовательского Томского государственного университета.

П. Н. Тарасова – младший научный сотрудник лаборатории «Полимерные композиты для Севера» Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова.

Ю. В. Капитонова – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Полимерные композиты для Севера» Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова.

А. А. Черкасов – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Лаборатории плазменных источников Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

М. В. Шандриков – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории плазменных источников Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

Д. Н. Сидорова – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории «Полимерные композиты для Севера» Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова.

А. А. Охлопкова – доктор технических наук, профессор химического отделения Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова, главный научный сотрудник - руководитель учебно-научно-технологической лаборатории «Технологии полимерных нанокompозитов им. доцента С. А. Слепцовой» химического отделения Института естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова.

И. А. Курзина – доктор физико-математических наук, директор центра исследований в области материалов и технологий Национального исследовательского Томского государственного университета, заведу-

ющий кафедрой природных соединений, фармацевтической и медицинской химии Национального исследовательского Томского государственного университета.

References

1. Abiodun S., Krishnamoorti R., & Bhowmick A. K. (2025). Thermal degradation of polytetrafluoroethylene, modified polytetrafluoroethylene, and their nanocomposites with boron nitride nanobarbs: Lifetime predictions and kinetic analysis. *Journal of Applied Polymer Science*, 142(5), e56452. DOI: 10.1002/app.56452
2. Puts G., Crouse P., & Ameduri B. (2014). Thermal degradation and pyrolysis of polytetrafluoroethylene. *Handbook of Fluoropolymer Science and Technology*, 81-104. DOI: 10.1002/9781118850220.ch5
3. Dhanumalayan E., & Joshi G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) — a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 247-268. DOI: 10.1007/s42114-018-0023-8.
4. Puts G. J., Crouse P., & Ameduri B. M. (2019). Polytetrafluoroethylene: synthesis and characterization of the original extreme polymer. *Chemical Reviews*, 119(3), 1763-1805. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00458.
5. Wang R., Nie J., Liu P. et al. (2025). Effect of Magnetron Sputtering Process on the Bonding of Copper Layers on Polytetrafluoroethylene Surfaces. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34, 20485-20494. DOI: 10.1007/s11665-025-10726-4
6. Kleiman J. (2025). Surface Modification Technologies for Space and Planetary Applications. *Mechanics of Advanced Technologies*, 9(1(104)), 5-21. DOI: 10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).324283
7. Zhang S. J. et al. (2022). Surface metallization of PTFE and PTFE composites by ion implantation for low-background electronic substrates in rare-event detection experiments. *Nuclear Science and Techniques*, 33(7), 90. DOI: 10.1007/s41365-022-01068-0
8. Kim S. R. (2000). Surface modification of poly(tetrafluoroethylene) film by chemical etching, plasma, and ion beam treatments. *Journal of Applied Polymer Science*, 77(9), 1913-1920. DOI: 10.1002/1097-4628(20000829)77:9<1913::AID-APP7>3.0.CO;2-%23

9. Desai H. R. (2004). Adhesion of copper to polytetrafluoroethylene surfaces modified with vacuum UV radiation downstream from He and Ar microwave plasmas (Doctoral dissertation). *Rochester Institute of Technology*, 214 p.
10. Skripachenko, K. K., Koshuro, V. A., Shumilin, A. I., & Pichkhidze, S. Ya. (2014). Modifikatsiya poverkhnosti ftoropolimernanoseniem nanosloev alyuminiya magnetronnym raspyleniem [Modification of the surface of fluoropolymers by deposition of aluminum nanolayers using magnetron sputtering]. *Uchenye Zapiski Tambovskogo Otdeleniya RoSMU*, 2, 266–268.
11. Korzhova, A. G., Laput, O. A., Kazakov, A. V., Lazareva, N. V., Vasil'ev, A. P., Tarasova, P. N., Kapitonova, Yu. V., Okhlopko, A. A., & Kurzina, I. A. (2025). Vliyanie poverkhnostnoi obrabotki impul'snym elektronnym puchkom na strukturnye i funktsional'nye svoystva politetraftoretilena [Effect of pulsed electron beam surface treatment on the structural and functional properties of polytetrafluoroethylene]. *Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedeniya*, 22(3), 272–281. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.003
12. Owens D. K., & Wendt R. C. (1969). Estimation of the surface free energy of polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 13(8), 1741–1747. DOI: 10.1002/app.1969.070130815
13. Deaconescu T., & Deaconescu A. (2022). Experimental research on polymer-based coaxial sealing systems of hydraulic cylinders for small displacement velocities. *Polymers*, 14(2), 290. DOI: 10.3390/polym14020290
14. Yin S., Taylor A., & Wong J. S. S. (2025). Tribology of PTFE in hydrogen atmosphere. *Tribology International*, 204, 110481. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.110481
15. Alfonso E., Olaya J., & Cubillos G. (2012). Thin film growth through sputtering technique and its applications. *Crystallization – Science and Technology*, 401–420. DOI: 10.5772/35844
16. Siegel J., Polívková M., Staszek M., Hubáček T., Kolář M., & Švorčík V. (2013). Properties of silver nanostructure-coated PTFE and its biocompatibility. *Nanoscale Research Letters*, 8(1), 388. DOI: 10.1186/1556-276X-8-388.
17. Dermal, I. V., & Shashkeev, K. A. (2017). Osobennosti magnetronnogo raspyleniya metallov v prisutstvii reaktivnykh gazov [Features of magnetron sputtering of metals in the presence of reactive gases]. *Trudy VIAM*, 11(59), 105–114. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-11-11
18. Kurzina, I. A., Pukhova, I. V., Savkin, K. P., Medovnik, A. V., Laput, O. A., & Chebodaeva, V. V. (2016). Modifikatsiya poverkhnostnykh svoystv PTFE metodami ionnogo i elektronno-lucheвого vozdeistviya [Modification of the surface properties of PTFE by ion and electron-beam treatment methods]. *Fundamental'nye Problemy Sovremennogo Materialovedeniya*, 13(4), 473–484.
19. Oonuki T. et al. (2025). Molecular Disaggregation Process of PTFE Using Sodium Chloride: A Study by Infrared Spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry B.*, 129(17), 4249–4255. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5c01148

Information about the authors

A. P. Vasilev – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the educational, scientific and technological laboratory “Technology of polymer nanocomposites named after Associate Professor S. A. Sleptsova” of the Chemical Department of the Institute of Natural Sciences of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov.

N. N. Lazareva – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the educational, scientific and technological laboratory “Technology of polymer nanocomposites named after Associate Professor S. A. Sleptsova” of the Chemical Department of the Institute of Natural Sciences of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov.

U.V. Khomutova – Junior Researcher of the Center for Research in Materials and Technologies of the National Research Tomsk State University; Postgraduate Student at the Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

O. A. Laput – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Center for Research in Materials and Technologies of the National Research Tomsk State University, Senior Lecturer at the Department of Natural Compounds, Pharmaceutical and Medical Chemistry of the National Research Tomsk State University.

P. N. Tarasova – Junior Researcher of the laboratory “Polymer Composites for the North” of the Institute of Natural Sciences of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov.

Iu. V. Kapitonova – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher of the laboratory “Polymer Composites for the North” of the Institute of Natural Sciences of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov.

A. A. Cherkasov – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of the laboratory of Plasma Sources of the Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

M. V. Shandrikov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the laboratory of Plasma Sources of the Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

D. N. Sidorova – Postgraduate Student, Junior Researcher of the laboratory “Polymer Composites for the North” of the Institute of Natural Sciences of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov.

A. A. Okhlopova – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chemical Department of the Institute of Natural Sciences of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Chief Researcher - Head of the educational, scientific and technological laboratory “Technology of Polymer Nanocomposites named after Associate Professor S. A. Sleptsova” of the Chemical Department of the Institute of Natural Sciences of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov.

I. A. Kurzina – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Center for Research in Materials and Technologies of the National Research Tomsk State University, Head of the Department of Natural Compounds, Pharmaceutical and Medical Chemistry of the National Research Tomsk State University

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

Статья поступила в редакцию 07.07.2026; одобрена после рецензирования 07.09.2026; принята к публикации 14.09.2026.

The article was received by the editorial board on 07 Jul. 2026; approved after reviewing 07 Sep. 2026; accepted for publication 14 Sep. 2026.