

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 537.533.9

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.003

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА СТРУКТУРНЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

**Алена Геннадьевна Коржова¹, Олеся Александровна Лапуть²,
Андрей Викторович Казаков³, Надежда Николаевна Лазарева⁴,
Андрей Петрович Васильев⁵, Прасковья Николаевна Тарасова⁶,
Юлия Валерьевна Капитонова⁷, Айталипа Алексеевна Охлопкова⁸,
Ирина Александровна Курзина⁹**

^{1, 2, 9} Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия

³ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, 40, Томск, 634050, Россия

^{4, 5, 6, 7, 8} Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, ул. Белинского, 58, Якутск, 677000, Россия

¹ korzhova17@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3189-4671>

² olesyalaput@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5553-5983>

³ andrei.v.kazakov@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3031-0240>

⁴ lazareva-nadia92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>

⁵ gtvap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7699-533X>

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

⁹ kurzina99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4976-2295>

Аннотация. Представлены результаты исследования структурных и функциональных свойств политетрафторэтилена (ПТФЭ) после обработки поверхности импульсным электронным пучком. Электронно-пучковую модификацию осуществляли при длительности воздействия 100 мкс; плотности тока пучка 0,25-1,23 А/см², давлении 5-7 Па и ускоряющем напряжении 8-9 кВ. Проведена оценка смачиваемости поверхности и рассчитана свободная поверхностная энергия образцов, осуществлен анализ изменения прочности, удлинения и модуля упругости в результате модифицирования, оценена твердость материалов и кристаллические свойства. Для модифицированного ПТФЭ отмечено снижение краевого угла смачивания, которое достигает минимальных значений 64,5°, и повышение свободной поверхностной энергии, достигающее в максимальном значении 55,5 мН/м. Для большинства исследованных образцов наблюдается увеличение прочности при растяжении и снижение показателя относительного удлинения при разрыве. Модуль упругости образцов при этом значительно повышается. Кристаллическая структура ПТФЭ после модификации изменяется незначительно, при этом размер кристаллитов в материале уменьшается с 74 нм до 67-73 нм. Таким образом, обработка ПТФЭ импульсным электронным пучком позволяет существенно повысить поверхностную энергию, сохраняя при этом основные механические характеристики на уровне исходного материала. Полученные результаты подтверждают эффективность электронно-пучковой обработки для направленной модификации поверхностных свойств политетрафторэтилена без ухудшения его прочностных показателей.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, модификация поверхности, электронный пучок, поверхностная энергия, смачиваемость, степень кристалличности, механические свойства

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

Для цитирования: 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. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.003.

Original article

EFFECT OF SURFACE TREATMENT WITH PULSED ELECTRON BEAM ON STRUCTURAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE

Alena G. Korzhova¹, Olesya A. Laput², Andrey V. Kazakov³, Nadezhda N. Lazareva⁴,
Andrey P. Vasilev⁵, Praskovia N. Tarasova⁶, Iuliia V. Kapitonova⁷,
Aitalina A. Okhlopkova⁸, Irina A. Kurzina⁹

^{1, 2, 9} National Research Tomsk State University, Lenin Ave., 36, Tomsk, 634050, Russia

³ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Lenin Ave., 40, Tomsk, 634050, Russia

^{4, 5, 6, 7, 8} North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Belinsky St., 58, Yakutsk, 677000, Russia

¹ korzhova17@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3189-4671>

² olesyalaput@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5553-5983>

³ andrei.v.kazakov@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3031-0240>

⁴ lazareva-nadia92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>

⁵ gtvap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7699-533X>

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

⁹ kurzina99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4976-2295>

Abstract. The article presents the results of studying the structural and functional properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) after surface treatment with a pulsed electron beam. Electron beam modification was carried out at an exposure duration of 100 μ s; beam current density of 0.25-1.23 A/cm², pressure of 5-7 Pa and accelerating voltage of 8-9 kV. The surface wettability and free surface energy of the samples, changes in strength, elongation and elastic modulus as a result of modification, material hardness and crystalline properties were studied. For modified PTFE, a decrease in the wetting angle to 64.5° and an increase in the free surface energy to 55.5 mN/m were noted. For most of the studied samples, an increase in tensile strength and a decrease in the relative elongation at break were observed. The elastic modulus of the samples significantly increased. The crystalline structure of PTFE after modification changes insignificantly, while the size of crystallites in the material decreases from 74 nm to 67-73 nm. Pulsed electron beam treatment of PTFE significantly increases the surface energy while maintaining mechanical properties. The data indicate that the method is promising for effective modification of the surface of polytetrafluoroethylene without reducing strength.

Keywords: polytetrafluoroethylene, surface modification, electron beam, surface energy, wettability, degree of crystallinity, mechanical properties

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

For citation: Korzhova A.G., Laput O.A., Kazakov A.V., Lazareva N.N., Vasilev A.P., Tarasova P.N., Kapitonova I.V., Okhlopkova A.A., Kurzina I.A. (2025). Effect of surface treatment with pulsed electron beam on structural and functional properties of polytetrafluoroethylene. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(3), 272-281. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.003.

Введение

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) – полимерный материал, используемый в различных отраслях легкой и тяжелой промышленности. Из ПТФЭ изготавливают изоляторы для электрооборудования, прокладочные и уплотнительные материалы, химически инертные покрытия для пищевой, фармацевтической и химической

промышленностей [1]. В медицине ПТФЭ применяется преимущественно в виде имплантатов для пластической и сердечно-сосудистой хирургии [2].

Изделия из политетрафторэтилена обладают химической инертностью, гидрофобностью, низкой поверхностной энергией (ПЭ), малым коэффициентом трения, термостойкостью и морозостойчивостью, однако имеют недостат-

ки – слабую износостойкость и невысокую твердость [1, 3].

В зависимости от назначения изделия недостатком также может являться низкая поверхностная энергия, вследствие чего ПТФЭ имеет низкую прочность адгезии к поверхностям различной химической природы [4]. При использовании ПТФЭ в медицинской сфере низкая поверхностная энергия материала препятствует взаимодействию имплантата с клетками организма и интеграции с окружающими тканями [2].

Улучшить адгезионные свойства ПТФЭ возможно путем обработки материала электронным пучком. Это перспективный метод модифицирования материалов, который заключается в воздействии на поверхность изделий сфокусированным пучком ускоренных электронов. При этом происходит преобразование кинетической энергии электронов в тепловую. В зависимости от химического состава материала, в процессе облучения электронным пучком первичные (ускоренные) и вторичные электроны и ионы могут преобразовываться в полимерные радикалы, инициируя новые химические реакции на поверхности [5]. Высокие скорости нагрева и охлаждения влияют на микроструктуру и фазовый состав поверхности, а возможность точного регулирования скорости движения электронного пучка и длительности воздействия позволяют проводить точечный нагрев и минимизировать термическое влияние на окружающие области материала [6, 7].

Электронно-пучковая обработка эффективно применяется для модификации поверхности металлических [6, 7, 8] и полимерных материалов [5, 9, 10, 11]. Существует значительное количество исследований, посвященных воздействию высокоэнергетических методов на различные материалы, однако количество работ, направленных на изучение изменения структурных и механических свойств политетрафторэтилена после электронно-пучковой модификации, остается ограниченным. Так, в работе [12] отмечается, что под действием электронного пучка кристалличность ПТФЭ увеличивается, что объясняется разрывами полимерной цепи в аморфной области. Однако авторы не приводят данные о размерах кристаллитов, что усложняет характеристику степени изменения структуры материала под влиянием электронного пучка. Согласно ряду работ [13, 14], электронно-пучковое воздействие позволяет

улучшить смачиваемость поверхности ПТФЭ. Тем не менее, не во всех работах проводится анализ свободной поверхностной энергии, что затрудняет оценку эффективности электронно-пучковой модификации ПТФЭ и прогнозирование поведения материала в процессах нанесения покрытий, склеивания и адсорбции веществ.

Ранее авторами было исследовано влияние импульсного электронного пучка на поверхностные свойства образцов, изготовленных из листа промышленного ПТФЭ марки Фторопласт-4 [15]. Нами продемонстрировано увеличение поверхностной энергии, микротвердости и коэффициента трения материала после обработки, а также снижение краевого угла смачивания (КУС) и удельного поверхностного сопротивления. Полученные данные свидетельствуют об улучшении адгезионных свойств и износостойкости материала.

Недостаточная изученность влияния электронно-пучковой технологии на структурные и механические свойства ПТФЭ определяет необходимость проведения дополнительного экспериментального исследования. Таким образом, целью работы является исследование влияния электронно-пучковой обработки на поверхностные и структурные характеристики политетрафторэтилена для модификации и улучшения его механических и функциональных свойств.

Материалы и методы

Для изготовления экспериментальных образцов использовали порошок политетрафторэтилена марки ПН-90 (ОАО «ГалоПолимер», Россия) со средним размером частиц 90 мкм. Пробоподготовка порошка ПТФЭ заключалась в предварительной сушке при 180 °С в течение 4 ч в сушильном шкафу ПЭ-0041 (ООО «Экоприбор», Россия) для удаления адсорбированной влаги. Образцы для испытаний изготавливали методом холодного прессования при удельном давлении $\Delta P = 50$ МПа при комнатной температуре с использованием гидравлического пресса ПКМВ-100 (ООО «Импульс», Россия). После прессования заготовки спекали в свободном виде в муфельной печи SNOI 15/900 (АВ «Umega», Литва) при температуре 375 °С. Заготовки охлаждали со скоростью $\Delta T = 2$ °С/мин до комнатной температуры.

Обработка поверхности образцов осуществлялась с использованием импульсного электронного пучка большого радиуса, который генерировался широкоапертурным форвакуумным плазменным источником электронов, устройство и принцип работы которого описаны в работе [16] (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия). Вакуумная камера предварительно откачивалась до давления 2 Па с помощью форвакуумного насоса, а затем рабочее давление p устанавливалось с помощью системы напуска газа. В экспериментах в качестве рабочего газа использовался азот высокой чистоты. Постоянное ускоряющее напряжение U_a , определяющее кинетическую энергию электронов, составляло 8–9 кВ. Образцы ПТФЭ обрабатывались серией из 10 импульсов с частотой следования импульсов 0,1 Гц. Параметры процесса и наименования образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры обработки поверхности ПТФЭ электронным пучком

Table 1. Parameters of PTFE surface treatment by electron beam

Образец	U_a , кВ	j_e , А/см ²	τ_d , мкс	p , Па	Газ	E_e , Дж/см ²
ПТФЭ	–	–	–	–	–	–
ПТФЭ-1	8	1,23	100	7	N ₂	0,984
ПТФЭ-2	8	0,37	100	7	N ₂	0,296
ПТФЭ-3	8	0,25	100	5	N ₂	0,2
ПТФЭ-4	9	0,25	100	5	N ₂	0,225

Примечание: U_a – ускоряющее напряжение, кВ; j_e – плотность тока, А/см²; τ_d – длительность воздействия, мкс; p – давление, Па; E_e – плотность энергии пучка в импульсе, Дж/см²

Исследование поверхностных свойств обработанных материалов проводили на установке для измерения краевого угла смачивания DSA25 (KRUSS, Германия) с помощью программного обеспечения «ADVANCE» (KRUSS, 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 – Кьельбле [17].

Исследование механических свойств ПТФЭ до и после электронно-пучковой модификации проводили на универсальной машине испытания МИМ.2-5-2.1-16.1.2-3.1.1 (ООО «ГОСТ», Россия). Испытания образцов ПТФЭ осуществляли согласно ГОСТ Р 56800-2015: использовались двухсторонние лопатки прямоугольного сечения (тип 5), скорость проведения испытаний – 10 мм/мин, комнатная температура – 23 °С. Определяемые параметры – прочность при растяжении (МПа), относительное удлинение при разрыве (%) и модуль упругости при растяжении.

Твердость образцов до и после обработки электронным пучком измеряли методом вдавливания индентора (по Шору D) на твердомере ТВР-D (ООО «Восток-7», Россия) по ГОСТ 24621-2015 (ISO 868:2003). Испытания проводились при температуре (23 ± 1) °С.

Структурные изменения на поверхности образцов ПТФЭ после обработки регистрировали методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Scientific, Швейцария).

Результаты и их обсуждение

После обработки полимеров электронным пучком их поверхность способна значительно изменять степень смачиваемости. Исследуемый в данной работе политетрафторэтилен в исходном состоянии характеризуется следующими значениями краевых углов смачивания поверхности: для воды 115,1° ± 4,5°, для глицерина 115,6° ± 7,8° (рис. 1). В результате воздействия электронного пучка на поверхность материалов наблюдается снижение краевого угла смачивания для всех образцов. Образцы ПТФЭ-3 и ПТФЭ-4 при этом изменяют характер смачиваемости с гидрофобного на гидрофильный. Наибольшей смачиваемостью обладает образец ПТФЭ-3 (КУС 64,5° ± 2,4°).

Изменение смачиваемости ПТФЭ, вероятно, связано со значениями плотности тока, а также характером поведения образцов в камере во время обработки (табл. 1). Так, для образцов ПТФЭ-1 и ПТФЭ-2, которые показали незначительное изменение КУС, во время электронно-пучкового облучения наблюдалось испарение образцов, которое регистрировали по повыше-

нию давления газа в вакуумной камере (изменение давления не превышало 1 Па). Несущественное испарение образцов связано с более высокими значениями плотности тока, которым соответствуют наибольшие плотности энергии электронного пучка в импульсе E_e . Испарение материала могло привести к изменению структуры поверхностного слоя экспериментальных образцов, оказывая влияние на их смачиваемость.

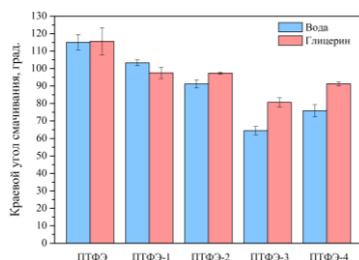


Рис. 1. Смачиваемость поверхности ПТФЭ до и после обработки электронным пучком

Fig. 1. Wettability of PTFE surface before and after electron beam treatment

Снижение КУС может быть связано с изменением микроструктуры поверхности и приобретением новых полярных групп. В работе [13] для обработанного электронным пучком ПТФЭ авторы отмечают снижение КУС с $89,4^\circ$ (исходный) до $57,5^\circ$, что сопровождается формированием кислородсодержащих функциональных групп после реакции активированной поверхности ПТФЭ с воздухом. Khan M. S. с соавторами также зафиксировали для порошка ПТФЭ постепенное снижение КУС со 111° до 92° по мере увеличения дозы облучения электронным пучком и соответствующего увеличения концентрации карбоксильных групп в составе поверхности [14].

Изменению смачиваемости ПТФЭ соответствует увеличение поверхностной энергии модифицированных образцов по сравнению с необработанным материалом (рис. 2). Для исходного ПТФЭ поверхностная энергия составляет $6,15$ мН/м, при этом основной вклад в энергию вносит дисперсионная компонента.

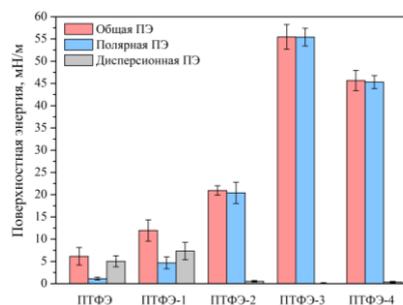


Рис. 2. Поверхностная энергия ПТФЭ до и после обработки электронным пучком

Fig. 2. Surface energy of PTFE before and after electron beam treatment

В зависимости от параметров процесса электронно-пучковой обработки соотношение полярной и дисперсионной компонент ПЭ изменяется. Наибольшее значение поверхностной энергии демонстрируют образцы ПТФЭ-3 и ПТФЭ-4 – $55,5$ мН/м и $45,6$ мН/м соответственно. Основной вклад в энергию, за исключением образца ПТФЭ-1, вносит полярная компонента. Это может указывать на значительное изменение химии поверхности материала после электронно-пучковой модификации [15].

Обработка электронным пучком способна воздействовать на механические характеристики и структуру материалов, следовательно, необходимо провести оценку влияния такого модифицирования на их свойства. В таблице 2 и на рисунке 3 представлены результаты исследования физико-механических свойств образцов ПТФЭ.

Таблица 2. Физико-механические свойства образцов ПТФЭ после обработки электронным пучком

Table 2. Physical and mechanical properties of PTFE samples after electron beam treatment

Образец	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость по Шору D
ПТФЭ	$29 \pm 2,9$	$400 \pm 40,0$	$56 \pm 1,0$
ПТФЭ-1	$32 \pm 3,2$	$400 \pm 40,0$	$56 \pm 1,1$
ПТФЭ-2	$29 \pm 2,9$	$353 \pm 35,3$	$56 \pm 0,5$
ПТФЭ-3	$34 \pm 3,4$	$368 \pm 36,8$	$56 \pm 0,5$
ПТФЭ-4	$35 \pm 3,5$	$358 \pm 35,8$	$57 \pm 1,2$

Результаты исследования физико-механических свойств обработанных электронным пучком образцов ПТФЭ показали некоторые изменения в сопоставлении с показателями исходного полимера. В целом, во всех образцах наблюдается следующая тенденция: повышение прочности при растяжении и модуля упругости, при этом отмечается некоторое снижение относительного удлинения при разрыве. Изменение данных свойств может свидетельствовать о структурных изменениях в полимере, связанных преимущественно с образованием сшивок между макромолекулами. Значительное повышение модуля упругости на 58% показал образец ПТФЭ-2. При этом для данного образца прослеживается сохранение показателя прочности при растяжении на уровне исходного ПТФЭ и снижение относительного удлинения при разрыве на 12%.

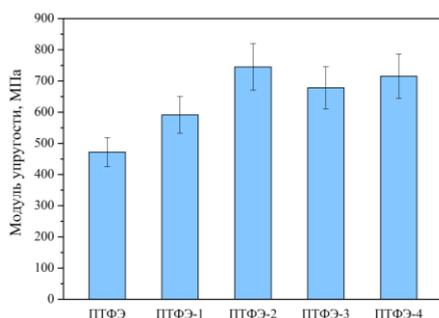


Рис. 3. Модуль упругости ПТФЭ до и после обработки электронным пучком

Fig. 3. Elastic modulus of PTFE before and after electron beam treatment

Результаты измерения твердости по Шору D (табл. 2) показали, что обработка электронным пучком не приводит к значительным изменениям в микротвердости ПТФЭ. Исходный ПТФЭ имеет твердость $56 \pm 1,0$, что соответствует типичным значениям для немодифицированного полимера [18]. Отсутствие статистически значимого влияния на твердость ПТФЭ по Шору D указывает на сохранение его механической целостности при использованных режимах модификации электронным пучком. Незначительные вариации значений в пределах погрешности измерений (55–57) подтверждают стабильность поверхностных свойств полимерного материала.

Для более детального изучения структурных изменений проведен рентгеноструктурный анализ образцов ПТФЭ, обработанных электронным пучком. В таблице 3 представлены

результаты исследования материалов до и после модифицирования. Данные рентгеноструктурного анализа показали, что обработка ПТФЭ электронным пучком приводит к незначительным изменениям кристаллической структуры. Как видно из данных таблицы 3, размер кристаллитов D_p уменьшился с 74 нм у исходного образца до 67–73 нм у обработанных, что свидетельствует о частичном разрушении кристаллических областей под действием облучения. При этом степень кристалличности χ_c либо оставалась на исходном уровне (65 %), либо незначительно возрастала.

Таблица 3. Результаты рентгеноструктурного анализа образцов ПТФЭ после обработки электронным пучком

Table 3. Results of X-ray diffraction analysis of PTFE samples after electron beam treatment

Образец	D_p , нм	χ_c , %
ПТФЭ	74	65 ± 1
ПТФЭ-1	68	65 ± 1
ПТФЭ-2	72	64 ± 1
ПТФЭ-3	73	70 ± 1
ПТФЭ-4	67	67 ± 1

Примечание: D_p – размер кристаллитов по Шерреру, нм; χ_c – степень кристалличности, %.

Наибольшее увеличение χ_c наблюдалось для образца ПТФЭ-3 (70 %), тогда как у ПТФЭ-1 и ПТФЭ-2 этот параметр практически не изменился, у ПТФЭ-4 изменился незначительно. Полученные данные указывают на избирательное воздействие электронного пучка, зависящее от условий обработки. В целом полученные результаты согласуются с другими работами, где показано увеличение степени кристалличности ПТФЭ при электронном облучении и уменьшение размера кристаллитов [12, 13, 19].

Выводы

Экспериментально установлено, что модификация поверхности политетрафторэтилена импульсным электронным пучком обеспечивает улучшение характеристик поверхности и со-

хранение основных механических свойств материала.

1. Установлено, что в результате воздействия электронным пучком на ПТФЭ его свободная поверхностная энергия возрастает в 9 раз (с 6,15 мН/м до 55,5 мН/м). Наряду с этим изменяется соотношение компонент поверхностной энергии – полярная компонента для большинства модифицированных образцов значительно преобладает над дисперсионной. Этот факт может указывать на улучшение адгезионных свойств модифицированного ПТФЭ. Также, наблюдается снижение краевого угла смачивания с 115,1° до 64,5°, за счет чего поверхность ПТФЭ приобретает гидрофильный характер.

2. После электронно-пучковой обработки ПТФЭ отмечается увеличение показателей прочности при растяжении и модуля упругости, при этом показатель относительного удлинения при разрыве несколько снизился. Модификация не оказала влияния на микротвердость образцов ПТФЭ, что свидетельствует о сохранении механической стабильности материала при воздействии импульсного электронного пучка выбранными режимами обработки.

3. Показано изменение структурного состояния поверхности ПТФЭ в условиях электронно-пучковой модификации. Обработка ПТФЭ электронным пучком приводит к увеличению степени кристалличности материала на 2-5 % и уменьшению размера кристаллитов в структуре материала на 1-7 нм.

Полученные результаты демонстрируют перспективность электронно-пучковой обработки для улучшения характеристик и функционализации изделий из ПТФЭ без ущерба их эксплуатационным свойствам.

Список литературы

1. Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) — a review. // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2018. – Vol.1. – P. 247-268. <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>.
2. Roina Y., Auber F., Hocquet D., Herlem G. ePTFE functionalization for medical applications // *Materials Today Chemistry*. 2021. – Vol. 20. – P. 100412. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100412>.
3. Puts G. J., Crouse P., Ameduri B. M. Polytetrafluoroethylene: synthesis and characterization of the original extreme polymer // *Chemical reviews*. – 2019. – Vol. 119, is. 3. – P. 1763-1805. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00458>.
4. Ohkubo Y., Shibahara M., Nagatani A., Honda K., Endo K., Yamamura K. Comparison between adhesion properties of adhesive bonding and adhesive-free adhesion for heat-assisted plasma-treated polytetrafluoroethylene (PTFE) // *The Journal of Adhesion*. – 2020. – Vol. 96, is. 8. – P. 776-796. <https://doi.org/10.1080/00218464.2018.1512859>.
5. Abou Elmaaty T., Okubayashi S., Elsisi H., Abouelenin S. Electron beam irradiation treatment of textiles materials: a review // *Journal of Polymer Research*. – 2022. – Vol. 29, is. 4. – P. 117. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-02952-4>.
6. Valkov S., Ormanova M., Petrov P. Electron-beam surface treatment of metals and alloys: Techniques and trends // *Metals*. – 2020. – Vol. 10, is. 9. – P. 1219. <https://doi.org/10.3390/met10091219>.
7. Ivanov Y. F., Gromov V. E., Zaguliaev D. V., Konovalov S. V., Rubannikova Y. A., Semin A. P. Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state-of-the-art technologies // *Progress in Physics of Metals/Uspehi Fiziki Metallov*. – 2020. – Vol. 21, is. 3. – P. 345. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>.
8. Fetzer R., Mueller G., An W., Weisenburger A. Metal surface layers after pulsed electron beam treatment // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 258. – P. 549-556. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.039>.
9. Chaudhary N., Singh A., Debnath A. K., Acharya S., Aswal D. K. Electron beam modified organic materials and their applications // *Solid State Phenomena*. – 2015. – Vol. 239. – P. 72-97. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.239.72>.
10. Павленко В. И., Домарев С. Н., Едаменко О. Д., Кашибадзе В. В., Ручий А. Ю. Модификация поверхности полимерных пленок пучком низкоэнергетических (8.5 keV) электронов // *Журнал технической физики*. – 2024. – Т. 94, № 10. – С. 1738-1746.
11. Agam M. A., Guo Q. Electron beam modification of polymer nanospheres // *Journal of nanoscience and nanotechnology*. – 2007. – Vol. 7, is. 10. – P. 3615-3619. <https://doi.org/10.1166/jnn.2007.814>.

12. Abdou S. M., Mohamed R. I. Characterization of structural modifications in poly-tetrafluoroethylene induced by electron beam irradiation // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2002. – Vol. 63, is. 3. – P. 393-398. [https://doi.org/10.1016/S0022-3697\(01\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3697(01)00131-7).
13. Jinglong G., Zaochun N., Yanhui L. The investigation of the structural change and the wetting behavior of electron beam irradiated PTFE film // *e-Polymers*. – 2016. – Vol. 16, is. 2. – P. 111-115. <https://doi.org/10.1515/epoly-2015-0223>.
14. Khan M. S., Lehmann D., Heinrich G. Modification of PTFE nanopowder by controlled electron beam irradiation: A useful approach for the development of PTFE coupled EPDM compounds // *Express Polymer Letters*. – 2008. – Vol. 2, is. 4. – P. 284-293. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2008.34>.
15. Vasenina I. V., Savkin K. P., Laput O. A., Lytkina D. N., Botvin V. V., Medovnik A. V., Kurzina, I. A. Effects of ion-and electron-beam treatment on surface physicochemical properties of polytetrafluoroethylene // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 334. – P. 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.11.035>.
16. Kazakov A. V., Medovnik A. V., Oks E. M., Panchenko N. A. Broad-beam plasma-cathode electron beam source based on a cathodic arc for beam generation over a wide pulse-width range // *Review of Scientific Instruments*. – 2020. – Vol. 91, is. 9. – P. 093304. <https://doi.org/10.1063/5.0023172>.
17. Owens D. K., Wendt R. C. Estimation of the surface free energy of polymers // *Journal of applied polymer science*. – 1969. – Vol. 13, is. 8. – P. 1741-1747. <https://doi.org/10.1002/app.1969.070130815>.
18. Wang C., Yu H., Yin Y., Zhang Z., Zhou X., Wang H., Song Z., Zhao Z., Guo Z., Algadi H. Dual-phase Enhanced Polytetrafluoroethylene Composites with Friction-triggered Self-healing Interfaces: Role of Antigorite and Graphene in Tribofilm Evolution // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2025. – Vol. 725, is. 2. – P. 137733. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137733>.
19. Barylski A., Aniołek K., Swinarew A. S., Kaptacz S., Gabor J., Waśkiewicz Z., Stanula A. Novel organic material induced by electron beam irradiation for medical application // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, is. 2. – P. 306. <https://doi.org/10.3390/polym12020306>.

Информация об авторах

А. Г. Коржова – аспирант, младший научный сотрудник центра исследований в области материалов и технологий Национального исследовательского Томского государственного университета.

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.

А. В. Казаков – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Лаборатории пучково-плазменной модификации диэлектриков Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

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.

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.

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

References

1. Dhanumalayan, E., & Joshi, G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) — a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 247-268.
2. Roina, Y., Auber, F., Hocquet, D., & Herlem, G. (2021). ePTFE functionalization for medical applications. *Materials Today Chemistry*, 20, 100412.
3. Puts, G. J., Crouse, P., & Ameduri, B. M. (2019). Polytetrafluoroethylene: synthesis and characterization of the original extreme polymer. *Chemical reviews*, 119(3), 1763-1805.
4. Ohkubo, Y., Shibahara, M., Nagatani, A., Honda, K., Endo, K., & Yamamura, K. (2020). Comparison between adhesion properties of adhesive bonding and adhesive-free adhesion for heat-assisted plasma-treated polytetrafluoroethylene (PTFE). *The Journal of Adhesion*, 96(8), 776-796.
5. Abou Elmaaty, T., Okubayashi, S., Elsisi, H., & Abouelenin, S. (2022). Electron beam irradiation treatment of textiles materials: a review. *Journal of Polymer Research*, 29(4), 117.
6. Valkov, S., Ormanova, M., & Petrov, P. (2020). Electron-beam surface treatment of metals and alloys: Techniques and trends. *Metals*, 10(9), 1219.
7. Ivanov, Y. F., Gromov, V. E., Zaguliaev, D. V., Konovalov, S. V., Rubannikova, Y. A., & Semin, A. P. (2020). Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state-of-the-art technologies. *Progress in Physics of Metals/Uspehi Fiziki Metallov*, 21(3), 345.
8. Fetzer, R., Mueller, G., An, W., & Weisenburger, A. (2014). Metal surface layers after pulsed electron beam treatment. *Surface and Coatings Technology*, 258, 549-556.
9. Chaudhary, N., Singh, A., Debnath, A. K., Acharya, S., & Aswal, D. K. (2015). Electron beam modified organic materials and their applications. *Solid State Phenomena*, 239, 72-97.
10. Pavlenko, V. I., Domarev, S. N., Edamenco, O. D., Kashibadze, V. V., & Ruchij, A. Yu. (2024). Modification of the surface of polymer films with a beam of low-energy (8.5 keV) electrons. *Zhurnal tekhicheskoy fiziki (Journal of Theoretical Physics)*, 94(10), 1738-1746. (In Russ.).
11. Agam, M. A., & Guo, Q. (2007). Electron beam modification of polymer nanospheres. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 7(10), 3615-3619.
12. Abdou, S. M., & Mohamed, R. I. (2002). Characterization of structural modifications in poly-tetra-fluoroethylene induced by electron beam irradiation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 63(3), 393-398.
13. Jinglong, G., Zaochun, N., & Yanhui, L. (2016). The investigation of the structural change and the wetting behavior of electron beam irradiated PTFE film. *e-Polymers*, 16(2), 111-115.
14. Khan, M. S., Lehmann, D., & Heinrich, G. (2008). Modification of PTFE nanopowder by controlled electron beam irradiation: A useful approach for the development of PTFE coupled EPDM compounds. *Express Polymer Letters*, 2(4), 284-293.
15. Vasenina, I. V., Savkin, K. P., Laput, O. A., Lytkina, D. N., Botvin, V. V., Medovnik, A. V., & Kurzina, I. A. (2018). Effects of ion-and electron-beam treatment on surface physicochemical properties of polytetrafluoroethylene. *Surface and Coatings Technology*, 334, 134-141.
16. Kazakov, A. V., Medovnik, A. V., Oks, E. M., & Panchenko, N. A. (2020). Broad-beam plasma-cathode electron beam source based on a cathodic arc for beam generation over a wide pulse-width range. *Review of Scientific Instruments*, 91(9), 093304.
17. Owens, D. K., & Wendt, R. C. (1969). Estimation of the surface free energy of polymers. *Journal of applied polymer science*, 13(8), 1741-1747.
18. Wang, C., Yu, H., Yin, Y., Zhang, Z., Zhou, X., Wang, H., ... & Algadi, H. (2025). Dual-

phase Enhanced Polytetrafluoroethylene Composites with Friction-triggered Self-healing Interfaces: Role of Antigorite and Graphene in Tribofilm Evolution. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 725(2), 137733.

19. Barylski, A., Aniołek, K., Swinarew, A. S., Kaptacz, S., Gabor, J., Waśkiewicz, Z., & Stanula, A. (2020). Novel organic material induced by electron beam irradiation for medical application. *Polymers*, 12(2), 306.

Information about the authors

A. G. Korzhova – Postgraduate student, Junior Researcher of the Center for Research in Materials and Technologies of the National Research Tomsk State University.

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.

A. V. Kazakov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Beam-Plasma Modification of Dielectrics of the Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

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.

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.

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. Okhlopko – 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 18.08.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was received by the editorial board on 18 Aug. 2025; approved after reviewing 25 Aug. 2025; accepted for publication 01 Sep. 2025.