

РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 537.217, 537.525.99, 539.23

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.001

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ CF₄ НА СМАЧИВАЕМОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА

Ефим Петрович Неустроев

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, г. Якутск, Российская Федерация
neustr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>

Аннотация. В работе проведены исследования воздействия плазменной обработки в индуктивно-связанной плазме CF₄ на смачиваемость поверхности карбонового углепластика. Обработки проведены в плазме мощностью 200 Вт при скорости потока газа 100 см³/мин. Длительность обработки составляла от 5 минут до 40 мин. Для анализа элементного состава поверхности использовался метод рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии. Морфология поверхности изучалась с помощью электронной и атомно-силовой микроскопии. Также были исследованы спектры комбинационного рассеяния, интенсивность фотолюминесценции и контактные углы смачивания. Содержание фтора на поверхности после 20-минутной обработки составляет 27 ат.-% и при увеличении времени обработки до 40 мин незначительно возрастает. Обнаружено изменение состояния поверхности углепластика от гидрофильного до гидрофобного после плазменной обработки. Измерения контактного угла смачивания после фторирования в плазме CF₄ показали возрастание на 60°-65° от исходных значений. Показана прямая зависимость между длительностью плазменного воздействия и углом смачивания. Максимальное значение краевого угла смачивания равное 135° достигнуто при времени обработки 40 мин. Наблюдаемый эффект в работе объясняется уменьшением поверхностной энергии за счет формирования C-F-связей при плазменном фторировании. Дополнительный вклад в усилении гидрофобных свойств дает изменение морфологии поверхности, вызванное плазменным травлением. В данном случае теоретической моделью описывающей гидрофобные свойства поверхности может служить модель Кэсси-Бакстера и/или её модификация, предложенной Мармуром.

Ключевые слова: карбоновый углепластик, контактный угол смачивания, плазменное осаждение, фторирование, плазменное травление, морфология поверхности, гидрофобность, сканирующая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, спектроскопия комбинационного рассеяния света, фотолюминесценция.

Благодарности: Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект №24-22-20087)

Для цитирования: Неустроев Е.П. Исследование воздействия плазмы CF₄ на смачиваемость поверхности углепластика // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 4. С. 388-395.
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.001.

Original article

THE EFFECT OF CF_4 PLASMA TREATMENT ON THE WETTABILITY OF CARBON FIBER-REINFORCED PLASTIC SURFACE

Efim P. Neustroev

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 677000, Yakutsk, Russian Federation
neustr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>

Abstract. The article investigates the effect of inductively coupled CF_4 plasma on the wettability of carbon fiber plastic surfaces. Plasma treatment was performed using a plasma power of 200 W and a CF_4 gas flow rate of 100 cm^3/min . The treatment duration ranged from 5 to 40 minutes. The surface elemental composition was analyzed using X-ray energy-dispersive spectroscopy. The surface morphology was examined using electron microscopy and atomic force microscopy. Raman spectra, photoluminescence intensity, and contact wetting angles were also studied. After 20 minutes of treatment, the fluorine content on the surface reached 27 at.%, with only a slight increase observed when the treatment time was extended to 40 minutes. A change in the state of the carbon fiber surface from hydrophilic to hydrophobic was detected as a result of plasma exposure. Contact angle measurements following plasma treatment showed an increase of 60–65° compared to the initial values. A direct relationship between the duration of plasma exposure and the wetting angle is shown. The maximum contact angle of 135° was achieved after 40 minutes of treatment. The observed effect is attributed to a reduction in surface energy due to the formation of C–F bonds during plasma fluorination. An additional contribution to the enhanced hydrophobicity is provided by changes in surface morphology caused by plasma etching. In this case, the hydrophobic behavior of the surface can be theoretically described by the Cassie–Baxter model and/or its modification proposed by Marmur.

Keywords: carbon fiber-reinforced plastic, contact angle, wetting, plasma deposition, fluorination, plasma etching, hydrophobicity, scanning electron microscopy, atomic force microscopy, Raman spectroscopy, photoluminescence.

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 24-22-20087).

For citation: Neustroev E.P. (2025). The effect of CF_4 plasma treatment on the wettability of carbon fiber-reinforced polymer surfaces. *Fundamental'nye problemy sovremennoego materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(4), 388–395. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.04.001.

Введение

Углепластики – это полимерные композиционные материалы, армированные углеродными волокнами в виде нитей, жгутов, лент, тканей и др. В качестве связующего используются синтетические смолы (эпоксидные, фенольные и др.) и термопласти (полиамиды, поликарбонаты, полиэфиры и др.). Углепластики широко используются в различных отраслях промышленности таких, как аэрокосмическая, железнодорожная, авто- и судостроение, а также в строительстве, электронике, медицине и др. [1,2]. В этих приложениях одним из вос требованных свойств полимеров является водоотталкивающее свойство (гидрофобность). Гидрофобными и супергидрофобными считаются материалы, которые имеют на границе раздела с жидкостью краевой угол смачивания больше 90° и 150° соответственно [3]. Существуют различные способы придания полимерам гидрофобных свойств. Наиболее известны

ми и популярными являются физические и химические методы [1–5]. Одним из эффективных направлений регулирования смачивающих свойств поверхности материалов является плазменная обработка благодаря простоте обработки, технологичности и эффективности [1,2,6–11]. Кроме того, плазменная обработка позволяет контролировать смачиваемость поверхности, сохраняя свойства материала. В зависимости от целей используются различные плазмообразующие газы для изменения водоотталкивающих свойств поверхности [1,2,6–11]. Гидрофобность поверхности можно повысить за счет снижения поверхностной энергии или придания шероховатости поверхности [2,12,13]. Известно, что фтор обладает высокой электротрицательностью (3,98), что приводит к низкой поверхностной энергии в соединениях фтора с углеродом [12,13]. В связи с этим, для увеличения краевого угла смачивания материалов приобрели популярность фтор-содержащие прекурсоры в качестве плазмообразующего газа

[8-11]. В данной работе представлены результаты исследования воздействия плазмы CF_4 на морфологию поверхности углепластика и краевой угол смачивания. Исследования краевого угла смачивания показывают прямую связь между уровнем фторирования и гидрофобными свойствами поверхности.

Методика исследований

Для исследований использован карбоновый углепластик, изготовленный методом вакуумной инфузии, на основе углеткани карбон Twill-240. В качестве наполнителя углепластика использовалась kleевая эпоксидная смола с отвердителем, предоставленные компанией “Fusion” (Россия). Перед обработками пластины углепластика толщиной 1 мм и площадью $1 \times 1 \text{ см}^2$ были обезжириены изопропиловым спиртом в ультразвуковой ванне в течение 5 мин и промыты этиловым спиртом.

Обработка образцов проводилась на микроволновой (13,56 МГц) плазменной установке «Этна-ПТ-100» (НТ МДТ). Источником плазмы служил индуктивно-связанный генератор плазмы с регулируемой мощностью. Предварительный вакуум в реакционной камере плазменной установки создавался последовательной откачкой форвакуумным и затем безмасляным турбомолекулярным насосами до давления 4×10^{-3} мбар. После откачки в камеру запускался газообразный CF_4 со скоростью потока 100 $\text{см}^3/\text{мин}$ до установления равновесного давления $\sim 4 \times 10^{-2}$ мбар. После этого включался СВЧ-генератор для возбуждения плазмы. Время обработки образцов в плазменной камере составляло от 5 до 45 мин при мощности генератора плазмы 200 Вт. Температура образцов при плазменной обработке не превышала 50°C. Одним из эффектов воздействия продуктов реакции плазмы на поверхность исследуемого материала является внедрение ионов в структуру вещества. Это может приводить к изменению физических свойств, в частности, коэффициента отражения. В работе, одним из показателей воздействия плазмы на образцы было приобретение глянцево-черной поверхностью исходного углепластика медного оттенка, насыщенность которого возрастала с увеличением времени плазменной обработки.

Для исследований угла смачивания поверхности использовалась ионизированная дистилированная вода. Масса одной капли была

примерно 10 мг. Измерение углов краевого смачивания проводилось с применением программы для обработки и анализа изображений ImageJ [14].

Исследования спектров комбинационного рассеяния (КР) света, фторированного в плазме CF_4 углепластика, проведены на установке «Интегра Спектра» (НТ МДТ). Морфология поверхности изучена методами электронной (JEOL 7800F) и оптической микроскопии (Nikon Eclipse 100). Содержание фтора определено методом рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии (РЭДС) на установке «INCA Energy» компании Oxford Instruments, являющейся приставкой СЭМ JEOL 7800F.

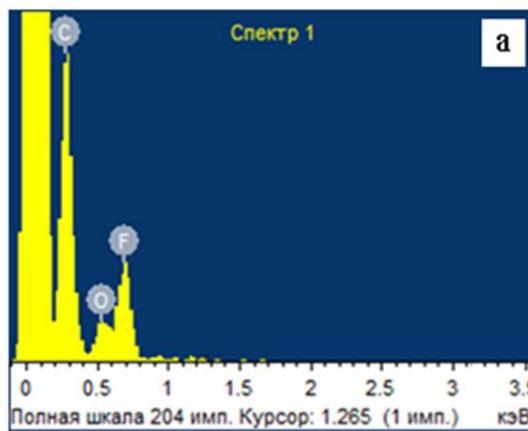
Результаты и их обсуждение

Элементный анализ, проведенный методом РЭДС, показывает наличие фтора на поверхности исследованных образцов после обработок различной длительности в плазме CF_4 . На рисунке 1 а показан спектр РЭДС после 40 минутной обработки в плазме CF_4 . Как видно из рисунка в спектрах отчетливо проявляются пики связанные с наличием в составе структуры атомов углерода, фтор и кислород. На рисунке 1 б (красные квадраты) показано изменение содержания фтора на поверхности углепластика в зависимости от времени обработки в плазме. Как видно из графика содержание фтора увеличивается от нуля до значений близких к 30%. Наиболее резкое возрастание наблюдается при обработках длительностью от 10 до 20 минут. После 20 минутного воздействия плазмой содержание фтора возрастает незначительно.

На рисунке 2 показаны поверхности контрольной пленки углепластика (рис. 2 а) и после обработок в плазме CF_4 длительностями 20 мин (рис. 2 б) и 40 мин (рис. 2 в), полученные методом СЭМ. На рисунке 2 а отчетливо видны волокна углепластика, ширина которых составляет около десяти микрометров. Также можно заметить, что с увеличением времени плазменного воздействия границы между волокнами становятся размытыми и в некоторых областях сливаются (рис. 2 б и в). Кроме того, видно, что поверхности становятся менее гладкими.

На рисунке 3 представлены изображения поверхности, полученные методом АСМ для исходного углепластиковой пленки (а) и после плазменной обработки длительностью 40 мин (б), соответственно. На рисунках 3 в и 3 г пока-

заны соответствующие этим неоднородности поверхности. Как видно из изображений глубина канавок между волокнами увеличивается от ~50 нм до нескольких сот нанометров. Кроме того, увеличиваются перепады высот рельефа поверхности волокон (области между глубокими впадинами) при одновременном сглаживании мелких шероховатостей. Если для исходного углепластика неоднородности по высоте составляют в среднем ~10 нм, то после воздействия плазмы наблюдается рост до сотен нанометров (рис. 3 б).



На рисунках 3 д и 3 е показаны изображения поверхности, полученные методом фазового контраста [15,16] в тех же областях, что и на рисунках 3 а и 3 б. Данный метод учитывает различие адгезионных, адсорбционных и других свойств поверхности материала. В результате изображениям областей с различной контрастностью будут соответствовать области с отличающимися свойствами. Как видно из рисунка 3 в, поверхность исходной пленки имела равномерный фазовый контраст, что означает однородность её свойств.

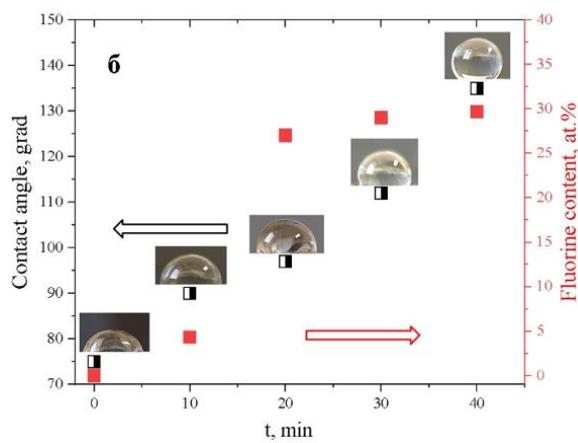


Рис. 1. Спектр РЭДС (а); изменение контактного угла смачивания и зависимость содержания фтора в зависимости от времени обработки в плазме (б).

Fig. 1. X-ray EDS spectrum (a); contact angle change and fluorine content vs. plasma treatment time (b).

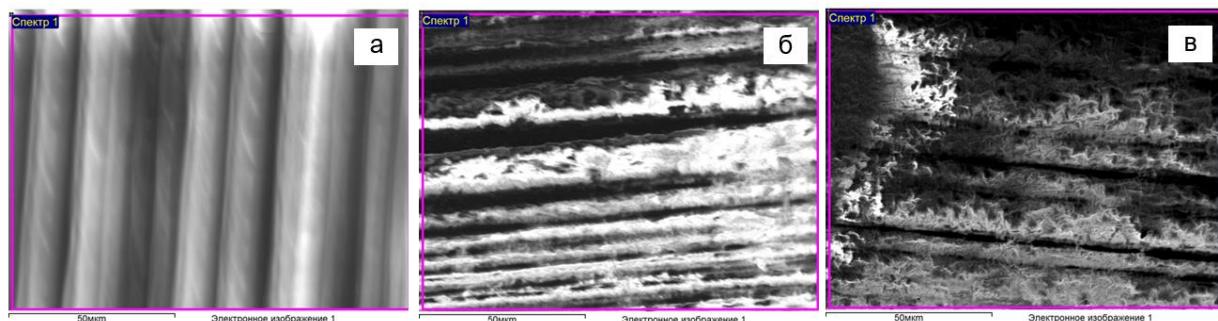


Рис.2. Изображения поверхности исходного углепластика (а) и после обработок в плазме CF_4 длительностями 20 мин (б) и 40 мин (в), полученные методом СЭМ.

Fig. 2. SEM images of the initial carbon fiber polymer surface (a) and after CF_4 plasma treatments for 20 min (b) and 40 min (c).

Из сравнения рис. 3 б и г можно сделать вывод, что при увеличении времени экспозиции образцов в плазме до 40 мин впадины рельефа поверхности в фазовом изображении становятся более светлыми, чем в остальной области. Это может означать, что в углублени-

ях поверхности происходит увеличение количества фтора, снижающее поверхностную энергию. В результате эти области с низкой адгезией на фазовых изображениях будут отображаться с отличающейся от остальной области контрастностью.

Измерения методом КР света показали, что пленка углепластика до плазменной обработки имеет интенсивность пиков (рис.4), характерную для эпоксидных смол [17,18]. В спектрах наблюдаются широкие полосы поглощения в диапазоне от 1200 cm^{-1} до 1500 cm^{-1} и от 2850 cm^{-1} до 3000 cm^{-1} . Также проявляются пики при 1609 cm^{-1} и 3065 cm^{-1} связанные с колебаниями основной цепи эпоксидного кольца и растяжению ароматической связи C—H, соответственно [17]. Воздействие плазмы CF_4 в течение 5 минут приводит к резкому увеличению интенсивности флуоресцентного свечения образцов в наблюдаемой полосе (рис. 4). Из-за яркости свечения время экспозиции измерения спектров было уменьшено с 1 с до 0,1 с и несмотря на это интенсивность увеличивается на порядок. Также на рисунке видно увеличение интенсивности флуоресценции с ростом длительности обработки в плазме. Максимальное увеличение достигается при времени 20 минут, после этого интенсивность выходит на плато.

Значения краевых углов смачивания дистиллированной водой поверхности углепластика в зависимости от длительности плазменной обработки в CF_4 показаны на рисунке 1 б. На этом рисунке также показаны формы измеренных капель воды. Исходная пленка имеет контактный угол смачивания около $75\text{--}80^\circ$. После 5 мин обработки в плазме CF_4 угол смачивания возрастает до $\sim 90^\circ$. При увеличении времени воздействия плазмы CF_4 до 40 мин наблюдается рост до 135° (рис. 1 б). Таким образом, изменение угла смачивания до и после плазменной обработки составляет $60\text{--}65^\circ$. Кроме того, на этом же рисунке приведена зависимость содержания фтора на поверхности углепластика в зависимости от времени плазменной обработки. Как следует из данного графика, значение краевого угла смачивания и содержание фтора увеличиваются с ростом времени экспозиции образцов в плазме CF_4 . При этом состояние поверхности меняется с гидрофильного до значения близкого к супергидрофобному.

Механизмы смачиваемости поверхности описываются хорошо известными моделями Юнга, модель Венцеля и модель Кэсси-Бакстера [2,8,11,13]. Модель Юнга применима для химически однородных, плоских и гладких поверхностей. Модели Венцеля и Кэсси-Бакстера учитывают наличие текстуры поверхности. В модели Венцеля неподвижная капля

жидкости находится на шероховатой поверхности, которая вся смачивается жидкостью. Шероховатая поверхность имеет большую площадь, чем гладкая, поэтому при низкой поверхностной энергии гидрофобность будет усиливаться. Модель Венцеля применима только к химически однородной твёрдой поверхности [13]. Переход от модели Венцеля к модели Кэсси-Бакстера происходит при коэффициенте шероховатости $\approx 1/\cos\theta \approx 2$ [19], который соответствует углу смачивания $\theta=120^\circ$. В этой модели капля жидкости соприкасается с вершинами неоднородностей и не смачивает углубления поверхности. Это происходит благодаря тому, что воздух задерживается в порах шероховатой поверхности, поэтому

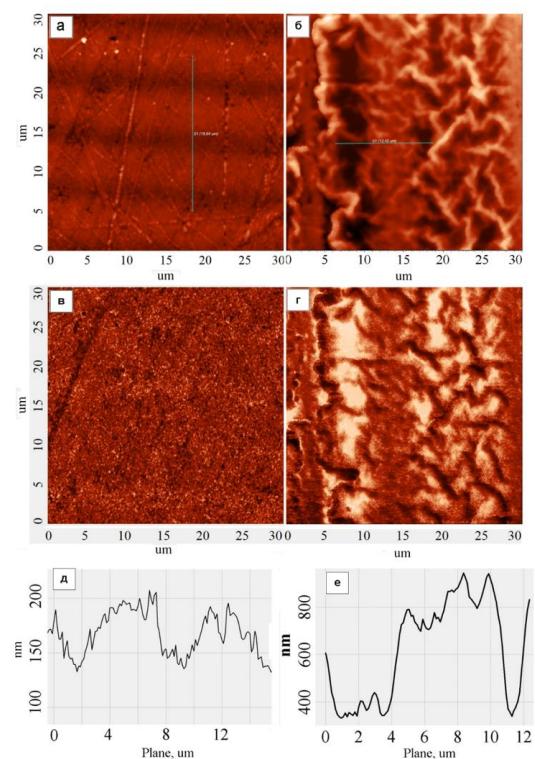


Рис.3. Изображения поверхности, полученные методом АСМ, исходной углепластиковой пленки (а), после обработки в плазме CF_4 в течение 40 мин (б). Соответствующие им фазовые изображения поверхностей исходной (в) и после обработки в плазме в течение 40 мин (д). Изображения профилей поверхности для исходной углепластиковой пленки (е) и после обработки в плазме в течение 40 мин (ф).

Fig. 3. AFM images of the surface of the original carbon fiber film (a), after CF_4 plasma treatment for 40 min (b). Corresponding phase images of the surfaces of the original film (c) and after plasma treatment for 40 min (d). Surface profile images for the original carbon fiber film (e) and after plasma treatment for 40 min (f).

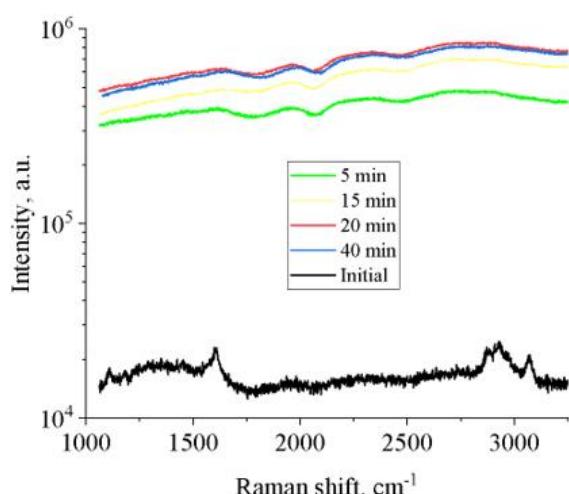


Рис.4. Спектр комбинационного рассеяния света исходной пленки углепластика и флуоресцентного свечения после обработки в плазме CF_4 различной длительности.

Fig. 4. Raman spectra of the initial carbon fiber polymer film and fluorescence after CF_4 plasma treatment of various durations.

жидкость в капле не может проникнуть туда [20]. Поверхностная энергия системы твердое тело-пар меньше поверхностной энергии твердое тело-жидкость. В результате общая поверхностная энергия становится меньше при образовании пузырьков газа на границе раздела жидкость/твердое тело [13]. Существует также смешанная модель Мармуря, согласно которой капля жидкости частично смачивает поверхность и удерживается воздушными пузырьками [11,13].

Опираясь на вышеизложенные результаты, можно считать, что основной причиной увеличения контактного угла смачивания является уменьшение поверхностной энергии при плазменном фторировании. Дополнительным фактором, приводящим к повышению гидрофобности исследуемой поверхности является формирование микро- и наноструктурной неоднородностей. Эти неоднородности связаны как с углублением канавок между волокнами углепластика, так и увеличением высот выступов непосредственно на поверхности волокон. Оценка средней шероховатости из ACM изображений показывает увеличение от ~20 нм для контрольного образца до ~200 нм после 40-минутного плазменного фторирования.

Заключение

Данные элементного анализа и результаты исследования морфологии поверхности показывают, что плазменное фторирование поверхности карбонового углепластика приводит к гидрофобизации поверхности. Этот процесс связан с двумя механизмами. Первый связан с плазменным фторированием поверхности и формированием C-F-связей, приводящие к снижению поверхностной энергии. Второй обусловлен изменением морфологии поверхности фторсодержащей плазмой, в результате которой формируются неоднородности поверхности. Увеличение контактного угла смачивания в этом случае согласуется с теоретической моделью Кэсси-Бакстера и её модификацией, предложенной Мармуром.

Список литературы

1. Nemanic, S. K., Annavarapu, R. K., Mommadian, B., Raiyan, A., Heil, J., Haque, M. A., Abdelaal, A., Sojoudi, H. Surface modification of polymers: methods and applications // Advanced Materials Interfaces. 2018. V.5. № 2. P.1801247.
2. Ma, C., Nikiforov, A., Hegemann, D., De Geyter, N., Morent, R., Ostrikov, K. Plasma-controlled surface wettability: Recent advances and future applications // International Materials Reviews. 2023. V.68. № 1. P. 82-119.
3. Ahmad, D., Van Den Boogaert, I., Miller, J., Presswell, R., Jouhara, H. Hydrophilic and hydrophobic materials and their applications // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2018. V.4. № 2. P.2686-2725.
4. Raza, Z.A., Khatoon, R., Banat, I.M. Altering the Hydrophobic/Hydrophilic Nature of Bioplastic Surfaces for Biomedical Applications. In: Kuddus, M., Roohi (eds). Bioplastics for Sustainable Development. Springer: Springer Singapore. 2021. P.431-466.
5. Reddy, A. B., Reddy, G. S. M., Sivajinayulu, V., Jayaramudu, J., Varaprasad, K., Sadiku, E. R. Hydrophobic/hydrophilic nanostructured polymer blends. In: Thomas, S., Shanks, R., Chandrasekharaku S. (eds). Design and applications of nanostructured polymer blends and nanocomposite systems. Norwich: William Andrew Publishing. 2016. P.385-411.
6. Phan, L. T., Yoon, S. M., Moon, M. W. Plasma-based nanostructuring of polymers: A review // Polymers. 2017. V.9. № 9. P.417.

7. Vandenabeele, C. R., Lucas, S. Technological challenges and progress in nanomaterials plasma surface modification—a review // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2020. V.139. P.100521.
8. Tsougeni, K., Tserepi, A., Boulousis, G., Constantoudis, V., Gogolides, E. Control of Nano-texture and Wetting Properties of Polydimethylsiloxane from Very Hydrophobic to Super-Hydrophobic by Plasma Processing // Plasma Processes and Polymers. 2007. V.4. № 4. p. 398-405.
9. Wei, X., Zhao, B., Li, X. M., Wang, Z., He, B. Q., He, T., Jiang, B. CF₄ plasma surface modification of asymmetric hydrophilic polyether-sulfone membranes for direct contact membrane distillation. Journal of membrane science. 2012. V.407. P.164-175.
10. Pitt, M., Fiedler, H., Kim, N. K., Verbeek, C. J. R., Allen, T. D., Bickerton, S. Carbon fibre surface modification by plasma for enhanced polymeric composite performance: A review // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2024. V.180. P.108087.
11. Aktas, C., Polat, O., Beitollahpoor, M., Farzam, M., Pesika, N. S., Sahiner, N. Force-based characterization of the wetting properties of LDPE surfaces treated with CF₄ and H₂ plasmas // Polymers. 2023. V.15. № 9. P.2132.
12. Peng, H. Synthesis and application of fluorine-containing polymers with low surface energy // Polymer Reviews. 2019. V.59. No4. P.739-757.
13. Iqbal, M., Dinh, D. K., Abbas, Q., Imran, M., Sattar, H., Ahmad, U. A. Controlled surface wettability by plasma polymer surface modification. Surfaces, 2019. V.2. № 2. P.349-371.
14. Broeke, J., Pérez, J. M. M., Pascau, J. Image processing with ImageJ. Birmingham: Packt Publishing Ltd. 2015. 256 p.
15. Scott, W. W., Bhushan, B. Use of phase imaging in atomic force microscopy for measurement of viscoelastic contrast in polymer nanocomposites and molecularly thick lubricant films // Ultramicroscopy. 2003. V.97. № 1-4. P.151-169.
16. Zhao, Y., Cheng, Q., Qian, M., Cantrell, J. H. Phase image contrast mechanism in intermittent contact atomic force microscopy // Journal of Applied Physics. 2010. V.108. № 9. P.094311.
17. Vašková, H., Křesálek, V. Quasi real-time monitoring of epoxy resin crosslinking via Raman microscopy // International journal of mathematical models and methods in applied sciences. 2011. V.5. № 7. P. 1197-1204.
18. Martin, B., Puentes, J., Wruck, L., Osswald, T. A. Degree of cure of epoxy/acrylic photopolymers: Characterization with Raman spectroscopy and a modified phenomenological model // Polymer Engineering & Science. 2018. V.58. № 2. P.228-237.
19. Sun, C., Min, J., Lin, J., Wan, H. Effect of atmospheric pressure plasma treatment on adhesive bonding of carbon fiber reinforced polymer // Polymers. 2019. V.11. № 1. P.139.
20. Satulu, V., Ionita, M. D., Vizireanu, S., Mitu, B., Dinescu, G. Plasma processing with fluorine chemistry for modification of surfaces wettability // Molecules. 2016. V.21. № 12. P.1711.

Информация об авторах

Е.П. Неустроев – кандидат физико-математических наук, доцент Физико-технического института Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

References

1. Nemani, S. K., Annavarapu, R. K., Mohammadian, B., Raiyan, A., Heil, J., Haque, M. A., Abdelaal, A., Sojoudi, H. (2018) Surface modification of polymers: methods and applications. Advanced Materials Interfaces, 5(2), 1801247.
2. Ma, C., Nikiforov, A., Hegemann, D., De Geyter, N., Morent, R., Ostrikov, K. (2023) Plasma-controlled surface wettability: Recent advances and future applications. International Materials Reviews, 68(1), 82-119.
3. Ahmad, D., Van Den Boogaert, I., Miller, J., Presswell, R., Jouhara, H. (2018) Hydrophilic and hydrophobic materials and their applications. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 4(2), 2686-2725.
4. Raza, Z.A., Khatoon, R., Banat, I.M. (2021). Altering the Hydrophobic/Hydrophilic Nature of Bioplastic Surfaces for Biomedical Applications. In: Kuddus, M., Roohi (eds) Bioplastics for Sustainable Development. Springer, Singapore. 431-466.
5. Reddy, A. B., Reddy, G. S. M., Sivajineyulu, V., Jayaramudu, J., Varaprasad, K., Sadiku, E. R. (2016). Hydrophobic/hydrophilic nanostructured polymer blends. In: Thomas, S., Shanks, R., Chandrasekharaku S. (eds) Design and applications of nanostructured polymer blends and nanocomposite systems. William Andrew Publishing. Norwich. USA. 385-411.

6. Phan, L. T., Yoon, S. M., Moon, M. W. (2017) Plasma-based nanostructuring of polymers: A review. *Polymers*, 9(9), 417.
7. Vandenabeele, C. R., Lucas, S. (2020) Technological challenges and progress in nanomaterials plasma surface modification—a review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 139, 100521.
8. Tsougeni, K., Tserepi, A., Boulousis, G., Constantoudis, V., Gogolides, E. (2007) Control of Nanotexture and Wetting Properties of Polydimethylsiloxane from Very Hydrophobic to Super-Hydrophobic by Plasma Processing. *Plasma Processes and Polymers*, 4(4), 398-405.
9. Wei, X., Zhao, B., Li, X. M., Wang, Z., He, B. Q., He, T., Jiang, B. (2012). CF_4 plasma surface modification of asymmetric hydrophilic polyethersulfone membranes for direct contact membrane distillation. *Journal of membrane science*, 407, 164-175.
10. Pitto, M., Fiedler, H., Kim, N. K., Verbeek, C. J. R., Allen, T. D., Bickerton, S. (2024) Carbon fibre surface modification by plasma for enhanced polymeric composite performance: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 180, 108087.
11. Aktas, C., Polat, O., Beitollahpoor, M., Farzam, M., Pesika, N. S., Sahiner, N. (2023) Force-based characterization of the wetting properties of LDPE surfaces treated with CF_4 and H_2 plasmas. *Polymers*, 15(9), 2132.
12. Peng, H. (2019). Synthesis and application of fluorine-containing polymers with low surface energy. *Polymer Reviews*, 59(4), 739-757.
13. Iqbal, M., Dinh, D. K., Abbas, Q., Imran, M., Sattar, H., Ahmad, Ul. A. (2019). Controlled surface wettability by plasma polymer surface modification. *Surfaces*, 2(2), 349-371.
14. Broeke, J., Pérez, J. M. M., & Pascau, J. (2015). *Image processing with ImageJ*. Packt Publishing Ltd. 256 p.
15. Scott, W. W., Bhushan, B. (2003). Use of phase imaging in atomic force microscopy for measurement of viscoelastic contrast in polymer nanocomposites and molecularly thick lubricant films. *Ultramicroscopy*, 97(1-4), 151-169.
16. Zhao, Y., Cheng, Q., Qian, M., Cantrell, J. H. (2010). Phase image contrast mechanism in intermittent contact atomic force microscopy. *Journal of Applied Physics*, 108(9), 094311.
17. Vašková, H., Křesálek, V. (2011) Quasi real-time monitoring of epoxy resin crosslinking via Raman microscopy. *International journal of mathematical models and methods in applied sciences*, 5(7), 1197-1204.
18. Martin, B., Puentes, J., Wruck, L., Osswald, T. A. (2018). Degree of cure of epoxy/acrylic photopolymers: Characterization with Raman spectroscopy and a modified phenomenological model. *Polymer Engineering & Science*, 58(2), 228-237.
19. Sun, C., Min, J., Lin, J., Wan, H. (2019) Effect of atmospheric pressure plasma treatment on adhesive bonding of carbon fiber reinforced polymer. *Polymers*, 11(1), 139.
20. Satulu, V., Ionita, M. D., Vizireanu, S., Mitu, B., Dinescu, G. (2016) Plasma processing with fluorine chemistry for modification of surfaces wettability. *Molecules*, 21(12), 1711.

Information about the authors

E.P. Neustroev, PhD, associate professor at the Physics and Technology Institute of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

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

Статья поступила в редакцию 25.06.2025; одобрена после рецензирования 24.11.2025; принятая к публикации 01.12.2025.

The article was received by the editorial board on 25 Jun. 2025; approved after reviewing 24 Nov. 2025; accepted for publication 01 Dec. 2025.