

Оригинальная статья

УДК 533.924

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-17-26

ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

© 2025 г. К. А. Демин^{1,2}, С. С. Агнаев², С. Д. Дондуков², А. Н. Хаглеев^{1,2}

¹Институт физического материаловедения СО РАН (Россия, 670047, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6)

²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (Россия, 670013, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1)

Аннотация. Полимерные самоклеящиеся материалы находят широкое применение в различных отраслях промышленности (строительстве, медицине, упаковке, автомобилестроении, рекламе, электронике и бытовой сфере). Их популярность обусловлена эксплуатационными характеристиками: устойчивостью к внешним воздействиям и простота использования. Представлены результаты исследований поверхностных свойств полипропиленовых (ПП) пленок, модифицированных с использованием низкотемпературной плазмы тлеющего разряда атмосферного давления. Время обработки составляло 3, 5, 10, 15 с, плазму инициировали в средах технического аргона, воздуха и их смесей в пропорциях 70:30, 50:50 и 30:70. Исследование показывает, что плазменная модификация значительно улучшает адгезионные свойства полипропилена, увеличивая их в два раза по сравнению с исходным образцом. Максимальная работа адгезии (135,5 мДж/м²) ПП достигнута при модификации в аргоне 15 с, что вдвое улучшило адгезионные свойства по сравнению с исходным образцом. Увеличение времени обработки более 15 с не влияет на адгезионные свойства и краевой угол смачивания. Для снижения расхода аргона использована смесь аргона с воздухом. Оптимальное соотношение 50:50 обеспечило краевой угол смачивания $42 \pm 1^\circ$ и работу адгезии 127,9 мДж/м² (близкие к показателям чистого аргона). Отмечено повышение шероховатости поверхности модифицированных ПП пленок с 52,6 до 199,4 нм в аргоне, до 133,1 нм в смеси аргон – воздух (50:50). Повышение шероховатости облегчает нанесение клея и укрепляет адгезионную связь. В исследовании изучали кинетику изменений электростатических свойств ПП пленок и их влияние на адгезионные свойства. Полученные в ходе исследования результаты рекомендуются для разработки базовых материалов для самоклеящихся изделий с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: плазменная модификация, полимеры, полипропилен, адгезия, плазма, краевой угол смачивания, атомно-силовая микроскопия

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, научная тема FWSF-2024-0010.

Для цитирования: Демин К.А., Агнаев С.С., Дондуков С.Д. Хаглеев А.Н. Плазменная модификация поверхности полипропиленовых пленок при атмосферном давлении. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):17–26. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-17-26](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-17-26)

Original article

PLASMA MODIFICATION OF THE SURFACE OF POLYPROPYLENE FILMS AT ATMOSPHERIC PRESSURE

© 2025 K. A. Demin^{1, 2}, S. S. Agnaev², S. D. Dondukov², A. N. Khagleev^{1, 2}¹Institute of Physical Materials Science SB RAS (6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russian Federation)²East Siberian State University of Technology and Management (Bldg. 1, 40V, Klyuchevskaya St., Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670013, Russian Federation)

Abstract. Polymer self-adhesive materials are widely used in various industries (construction, medicine, packaging, automotive, advertising, electronics and consumer goods). Their popularity is due to their operational characteristics: resistance to external influences and ease of use. The results of studies of the surface properties of polypropylene (PP) films modified using low-temperature plasma of atmospheric pressure glow discharge are presented. The treatment time was 3, 5, 10, and 15 seconds, and the plasma was initiated in technical argon, air, and mixtures thereof in the proportions of 70:30, 50:50, and 30:70. The study shows that the plasma modification significantly improves the adhesive properties of polypropylene, doubling them compared to the original sample. The maximum adhesion performance (135.5 MJ/m^2) of PP was achieved with modification in argon for 15 seconds, which doubled the adhesion properties compared to the initial sample. An increase in the processing time of more than 15 seconds does not affect the adhesive properties and the wetting edge angle. A mixture of argon and air was used to reduce argon consumption. The optimal 50:50 ratio ensured an edge wetting angle of $42 \pm 1^\circ$ and an adhesion of 127.9 MJ/m^2 (close to the values of pure argon). An increase in the surface roughness of modified PP films was noted from 52.6 to 199.4 nm in argon, to 133.1 nm in an argon–air mixture (50:50). Increasing the roughness facilitates the application of glue and strengthens the adhesive bond. The study investigated the kinetics of changes in the electret properties of PP films and their effect on adhesive properties. The results obtained during the study are recommended for the development of basic materials for self-adhesive products with improved performance properties.

Keywords: plasma modification, polymers, polypropylene, adhesion, contact angle, atomic force microscopy

Financing. The work was carried out with financial support from the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research topic FWSF-2024-0010.

For citation: Demin K.A., Agnaev S.S., Dondukov S.D., Khagleev A.N. Plasma modification of the surface of polypropylene films at atmospheric pressure. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):17–26. (In Russ.) [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-17-26](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-17-26)

Введение

Плазменная модификация полимерных пленок широко используется для улучшения их свойств, особенно при производстве упаковки и самоклеящихся материалов. Рассматриваемый метод способствует повышению адгезионных свойств, обеспечивая более надежное сцепление материала с другими поверхностями, что минимизирует риск дефектов и разрушения клеевых соединений [1 – 16].

Традиционно для улучшения адгезии полимерных пленок используется предварительная химическая обработка поверхности с применением кислот, органических и щелочных растворов с высокой окислительной способностью [17]. В качестве реагентов применяются изопропанол ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$), трихлорэтилен (C_2HCl_3), бензол

(C_6H_6), толуол (C_7H_8), этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), акриловая кислота ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2$), ацетон ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), азотная кислота (HNO_3) и ксилол (C_8H_{10}). При обработке полипропиленовых (ПП) пленок хромовой смесью (H_2SO_4) при температуре 70°C в течение 30 мин краевой угол смачивания уменьшается от 98 до 65° [18]. Химическая модификация имеет ряд недостатков: приводит к образованию рыхлости и неровности поверхности, что снижает механическую прочность материала (разрыв, отрыв, расслаивание); ухудшает оптические свойства. Процесс химической обработки требует соблюдения строгих мер безопасности, так как большинство используемых реагентов являются пожаро- и взрывоопасными [19].

В отличие от химической модификации, применение низкотемпературной плазмы позво-

ляет увеличить поверхностную энергию полимерных материалов, улучшая их гидрофильность и адгезионные свойства, не нарушая структурную целостность материала, что позволяет сохранить его механическую прочность при одновременном повышении адгезии.

В работе [20] ПП пленки были модифицированы коронным разрядом в воздушной и азотной средах. В результате обработки краевой угол смачивания уменьшился с 63,0 до 38,1° в азотной и до 38,2° в воздушной средах. В работе [21] описан метод модификации поверхности ПП пленок толщиной 30 мкм с использованием тлеющего разряда постоянного тока при атмосферном давлении. В качестве плазмообразующих газов использовали аргон, кислород и их смесь. После 30 с обработки угол смачивания уменьшился с 90 до 43 – 56°.

В работе [22] для подтверждения изменения адгезионных свойств ПП пленок использовали метод краевого угла смачивания. Обработка низкотемпературной плазмой в среде аргона тлеющего разряда атмосферного давления позволила уменьшить краевой угол смачивания с 59 до 48°, что привело к улучшению адгезионных свойств в 1,2 раза. Время обработки составило 60 с.

Модификация в плазме скользящей дуги позволяет достичь значительного улучшения адгезионных характеристик [23]. Краевой угол смачивания уменьшился с 72,0 до 17,9°, что свидетельствует об улучшении адгезии в 4,0 – 4,5 раза.

Увеличение адгезии объясняется изменением микрорельефа поверхности, а также заклиниванием адгезива в порах материала и разрушением слабых поверхностных слоев, что определяет прочность клеевого соединения [24].

В работе [25] подтверждено, что плазменное травление пленок полипропилена в воздушной плазме тлеющего разряда постоянного тока приводит к увеличению шероховатости поверхности. Это, в свою очередь, способствует улучшению смачиваемости материала и повышению прочности адгезионной связи.

Использование различных плазмообразующих газовых сред позволяет достичь схожих показателей адгезии. Однако применение окружающего атмосферного воздуха в качестве плазмообразующего газа значительно упрощает технологический процесс и снижает стоимость плазменной модификации.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения плазменной модификации ПП пленок при атмосферном давлении для улучшения адгезионных свойств поверхности полимера.

Методы и принципы исследования

Объектом исследования был выбран полипропилен (ГОСТ 26996 – 86) толщиной 45 мкм и размером 30 × 30 мм, модифицированный на плазменной установке (ПУ) в течение 0 – 15 с для достижения максимальной работы адгезии и оптимального времени модификации.

Плазменная модификация полипропиленовых пленок

Образец ПП пленок модифицировали на плазменной установке (рис. 1), состоящей из цилиндрического корпуса эжектора с коаксиальной системой медных электродов, подключенных к высоковольтному источнику питания и системы напуска плазмообразующего газа. Система напуска плазмообразующего газа представляет собой компрессор, работающий от сети переменного тока напряжением 220 В с производительностью 400 л/мин и рабочим давлением 1 МПа. Компрессор оборудован двумя редукторами и манометрами с пределами измерения давления от 0 до 1,6 МПа. Также в систему напуска плазмообразующего газа входит баллон технического аргона объемом 20 л, оборудованный одной горловиной с аргоновым редуктором. Высоковольтный источник питания мощностью 300 Вт, подключенный к системе коаксиальных электродов, подает импульсный сигнал, инициирующий плазменный пучок. В корпус эжектора вдоль электродов из системы напуска поступает плазмообразующий газ. Поток плазмообразующего газа, подаваемый из системы напуска, прижимает плазменный пучок к поверхности образца ПП. Завихритель в плазменной установке создает вращающийся поток плазмы необходимый для удерживания плазменного пучка в центре эжектора, что способствует устойчивому и контролируемому процессу модификации. Завихритель способствует равномерному распределению температуры в инициированном плазменном пучке, что необходимо для предотвращения перегрева поверхности образца ПП.

Эжектор устанавливался перпендикулярно образцу ПП на расстоянии 10 ± 1 мм. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон, воздух и смеси аргон – воздух в соотношениях 70:30, 50:50 и 30:70.

Атомно-силовая микроскопия

Исследование поверхности ПП пленок выполнено методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием сканирующего зондового микроскопа Multimode 8 (Bruker, США) в Центре коллективного пользования Института физического материаловедения СО РАН. Анализ проводили в полуконтактном режиме с применением

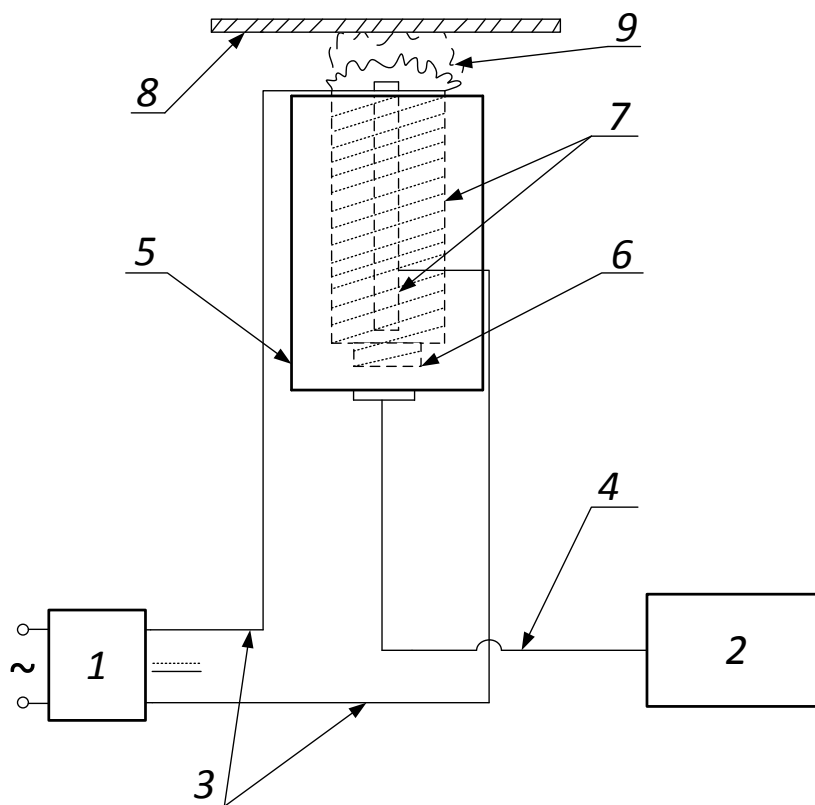


Рис. 1. Схема плазменной установки:

1 – высоковольтный источник питания; 2 – система напуска реакционного газа; 3 – высоковольтные провода; 4 – пневматический шланг; 5 – корпус эжектора; 6 – завихритель; 7 – коаксиальные электроды; 8 – ПП образец; 9 – плазменный разряд

Fig. 1. Plasma system schematic:

1 – high-voltage power supply; 2 – reactive gas injection system; 3 – high-voltage cables; 4 – pneumatic hose; 5 – ejector housing; 6 – swirler; 7 – coaxial electrodes; 8 – PP sample; 9 – plasma discharge

кантилевера из сурьмы, легированной кремнием. Обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью программного обеспечения NanoScore, предназначенного для визуализации и анализа результатов зондовой микроскопии. В рамках обработки изображений были рассчитаны среднестатистические параметры шероховатости поверхности, включая максимальную высоту неровностей $R_{\max}$, среднюю арифметическую R_a и среднюю квадратичную R_q шероховатости. Эти параметры определяли на основе анализа пяти наиболее выраженных пиков и впадин, что позволило получить объективную оценку микрорельефа поверхности.

Смачиваемость поверхности

Краевой угол θ смачивания измеряли методом лежащей капли, который основан на определении угла между поверхностью материала и касательной к границе капли жидкости. Метод широко применяется для количественной оценки смачиваемости поверхности. Образцы ПП фиксировали на стеклянной подложке, что обеспечивало стабильность измерений. Погрешность при определении краевого угла смачивания не превышала $0,5^\circ$. Для исследования адгезионных

свойств ПП использовали цифровой микроскоп DM, оснащенный программным обеспечением Tour View, что позволило провести точный анализ и визуализацию результатов (рис. 2).

Оценку адгезионной способности исходного и модифицированного образцов ПП проводили путем расчета работы адгезии по уравнению Дюпре-Юнга:

$$W_a = \gamma(1 + \cos \theta),$$

где W_a – работа адгезии, мДж/м²; γ – поверхностное натяжение воды на границе с воздухом, мН/м; θ – краевой угол смачивания полимера жидкостью, град.

Основные результаты

При анализе результатов исследования было выявлено, что воздействие низкотемпературной плазмы атмосферного давления, инициированное в среде аргона, в значительной степени изменяет структуру и электретные свойства поверхности образцов ПП, изменяя величину θ ,

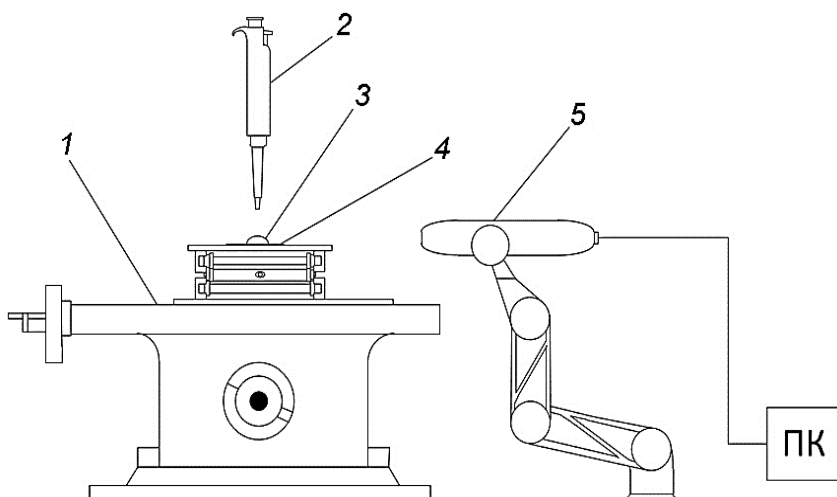


Рис. 2. Схема установки для исследования краевого угла смачивания:

1 – координатный предметный столик; 2 – лабораторная пипетки переменного объема; 3 – капля дистиллированной воды; 4 – ПП образец; 5 – цифровой микроскоп

Fig. 2. Wetting contact angle measurement setup:

1 – coordinate stage; 2 – adjustable-volume laboratory pipette; 3 – distilled water droplet; 4 – PP sample; 5 – digital microscope

тем самым улучшая смачиваемость. В таблице и на рис. 3 представлены результаты измерения краевого угла смачивания и работы адгезии в зависимости от процентного соотношения смеси плазмообразующего газа и продолжительности плазменной модификации.

Изменение краевого угла смачивания образцов ПП после плазменной модификации свидетельствует об улучшении гидрофильных свойств и увеличении работы адгезии. Наибольшее снижение угла смачивания по сравнению с исходным образцом ПП ($\theta = 76 - 77^\circ$) наблюдалось после модификации в среде технического аргона ($\theta = 30 - 32^\circ$), при этом разброс экспериментальных данных был минимальным.

Максимальное ($135,5 \text{ мДж/м}^2$) значение работы адгезии поверхности ПП при модификации в среде аргона было достигнуто при модификации 15 с. Результатом модификации является улучшение адгезионных свойств поверхности ПП в 2 раза по сравнению с исходным образцом. Увеличение времени модификации свыше 15 с не

приводит к дальнейшему изменению краевого угла смачивания и увеличению работы адгезии.

Для снижения экономических затрат принято решение об использовании смеси аргона и воздуха. Плазменная модификация при различных пропорциях плазмообразующего газа показала, что соотношение аргона и воздуха 50:50 позволяет достичь изменений краевого угла ($42 \pm 1^\circ$) и работы адгезии (более 120 мДж/м^2), что позволяет уменьшить расход аргона без значительного ущерба эффективности процесса плазменной модификации.

Сравнение морфологии образцов при модификации в средах аргон и аргон – воздух

Методом атомно-силовой микроскопии исследована морфология и локальные физико-механические свойства на наноструктурном уровне, что позволило оценить изменение шероховатости и микрорельефа образцов ПП до и

Изменение краевого угла смачивания ПП в зависимости от времени модификации и вида плазмообразующего газа

Dependence of PP wettability contact angle on processing duration and plasma gas type

Время модификации, с	Значение краевого угла смачивания в зависимости от среды плазмообразующего газа				
	аргон	аргон – воздух 30:70	аргон – воздух 50:50	аргон – воздух 70:30	воздух
0	77,52	77,61	76,795	77,71	77,67
3	38,235	60,68	58,45	74,00	73,43
5	33,89	57,75	47,85	51,16	45,65
10	32,23	55,90	46,01	49,80	47,59
15	31,05	48,84	42,91	42,63	43,98

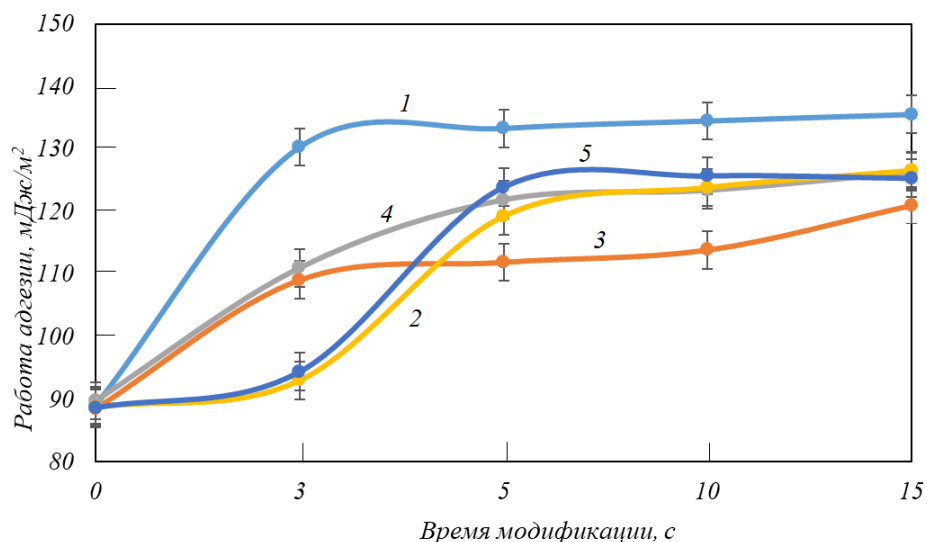


Рис. 3. Изменение работы адгезии поверхности ПП образцов в зависимости от плазмообразующего газа и времени плазменной модификации:

1 – аргон; 2 – 4 – аргон – воздух в пропорциях 70:30, 30:70, 50:50; 5 – воздух

Fig. 3. Change in the adhesion of the surface of the PP samples depending on the plasma-forming gas and the time of plasma modification:

1 – argon; 2 – 4 – argon – air in proportions 70:30, 30:70, 50:50; 5 – the air

после модификации. На рис. 4 представлены АСМ-изображения поверхности исходных ПП пленок и образцов, активированных в средах аргона и аргон – воздух в соотношении 50:50.

Проведенные исследования демонстрируют, что обработка низкотемпературной плазмой атмосферного давления в средах аргона и смеси аргона с воздухом в пропорции 50:50 изменяет морфологию поверхности образцов ПП пленок. В результате такой обработки наблюдается увеличение шероховатости поверхности, что свидетельствует о формировании более выраженного рельефа. Полученный рельеф способствует улучшению контакта между поверхностью и адгезивом.

Экспериментальные данные показали, что после модификации в аргонной среде максимальная высота неровностей увеличилась с 52,6 до 199,4 нм, а в среде смеси аргона и воздуха – до 133,1 нм. Обработка поверхности в течение 15 с привела к значительному росту шероховатости: параметры R_a и R_q возросли более чем в 4,5 и 3,2 раза по сравнению с исходными значениями.

Было отмечено повышение однородности поверхности и сглаживание микрорельефа. На модифицированных образцах отсутствуют продольные борозды, характерные для исходного материала, а вместо них преобладают рельефные образования большего диаметра. Такие изменения способствуют улучшению смачиваемости поверхности и более эффективному закреплению адгезива в порах, что напрямую влияет на прочность клеевого соединения.

Стоит отметить, что обработка в среде смеси аргона и воздуха приводит к меньшей шерохо-

ватости по сравнению с аргонной средой. Такое явление связано с эффектом термического сглаживания поверхности, вызванного более высокой температурой, генерируемой плазмой в рассматриваемой среде. Использование низкотемпературной плазмы позволяет целенаправленно изменять структуру поверхности ПП, улучшая ее функциональные свойства для адгезионных применений.

Выводы

Модифицированные плазмой ПП пленки характеризуются повышенной гидрофильностью и адгезией поверхности. Наибольшие значения увеличения работы адгезии в два раза в сравнении с исходным образцом были получены при модификации в среде технического аргона в течение 15 с. При этом, модификация в течение 5 с в среде смеси аргона и воздуха в пропорциях 50:50 позволило достичь значения работы адгезии более 120 мДж/м², что позволяет уменьшить расход аргона без значительного ущерба эффективности процесса плазменной модификации. На наноструктурном уровне модифицированные участки поверхности ПП пленок имеют различную шероховатость, зависящую от длительности плазменной модификации и соотношения компонентов плазмообразующего газа.

Модифицированные пленки обладают повышенной работой адгезии, что делает перспективным их дальнейшее применение в качестве материала основы для производства самоклеящихся материалов.

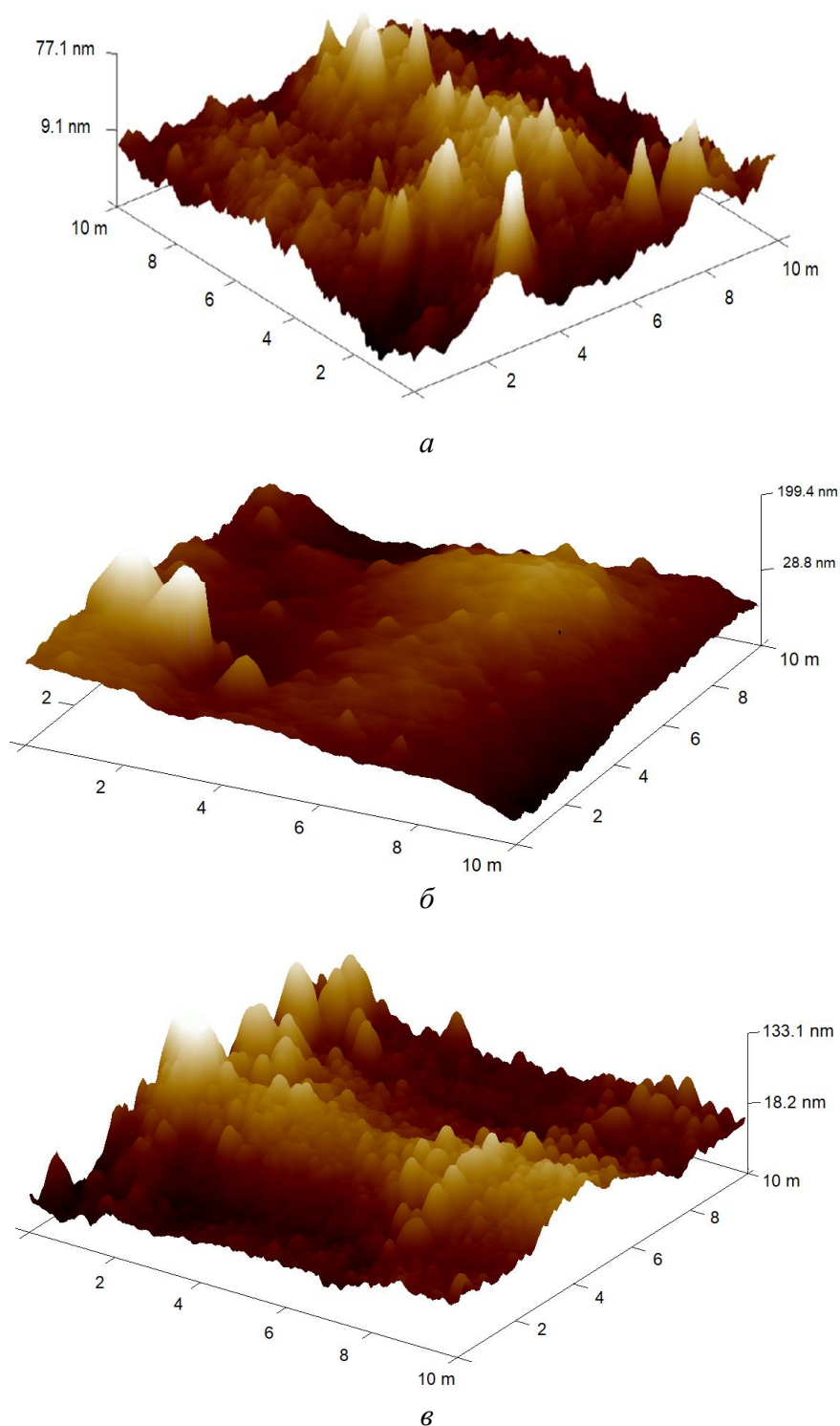


Рис. 4. АСМ-изображение топографической поверхности исходного ПП образца (*a*), активированных в средах аргона (*б*) и в аргон – воздух в соотношении 50:50 (*в*)

Fig. 4. AFM is an image of the topographic surface of the initial sample of PP (*a*) activated in an argon (*b*) medium and in an argon – air medium in a 50:50 ratio (*c*)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kostov K.G., Nishime T.M.C., Castro A.H.R., Toth A., Hein L.R.O. Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet. *Applied Surface Science*. 2014;314:367–375.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.07.009>
2. Nastuta A.V., Asandulesa M., Doroftei F., Dascalu I.-A., Varganici C.-D., Tiron V., Topala I. Atmospheric Pressure Plasma Jet Exposure of Polylactic Acid Surfaces for Better Adhesion: Plasma Parameters towards Polymer Properties. *Polymers*. 2024;16(2):240.
<https://doi.org/10.3390/polym16020240>

3. Дёмин К.А., Хаглеев А.Н., Урханова Л.А., Хардаев П.К., Агнаев С.С., Дондуков С.Д. Модифицированные в плазме скользящей дуги гидроизоляционные полимерные пленки. *Вестник ВСГУТУ*. 2024;1(92):90–96.
https://doi.org/10.53980/24131997_2024_1_90
4. Mozetič M. Aging of Plasma-Activated Polyethylene and Hydrophobic Recovery of Polyethylene Polymers. *Polymers*. 2023;15(24):4668.
<https://doi.org/10.3390/polym15244668>
5. Berczeli M., Hatoss B., Kókai E. Surface treatment of polymer matrix nanocomposites for adhesion enhancement by cold plasma. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022;1246:012028.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012028>
6. Vassallo E., Aloisio M., Pedroni M., Ghezzi F., Cerruti P., Donnini R. Effect of Low-Pressure Plasma Treatment on the Surface Wettability of Poly (butylene succinate) Films. *Coatings*. 2022;12(2):220.
<https://doi.org/10.3390/coatings12020220>
7. Хаглеев А.Н., Урханова Л.А., Буянтуев С.Л., Демин К.А., Мокеев М.А., Агнаев С.С. Влияние плазмы скользящей дуги на физико-механические свойства гидроизоляционного полиэтилена. *Вестник ВСГУТУ*. 2022;4(87):64–70.
https://doi.org/10.53980/24131997_2022_4_64
8. Aydemir C., Altay B.N., Akyol M. Surface analysis of polymer films for wettability and ink adhesion. *Color Research and Application*. 2021;46(2):489–499.
<https://doi.org/10.1002/col.22579>
9. Štěpánová V., Šrámková P., Sihelník S., Stupavská M., Jurmanová J., Kováčik D. The effect of ambient air plasma generated by coplanar and volume dielectric barrier discharge on the surface characteristics of polyamide foils. *Vacuum*. 2021;183:109887.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109887>
10. Григорьев А.Ю., Ефремова А.А., Гарипов Р.М. Изменение свойств поверхности полимерных пленок при кратковременной обработке полем коронного разряда. *Промышленное производство и использование эластомеров*. 2021;3:44–50.
<https://doi.org/10.24412/2071-8268-2021-3-44-50>
11. Kellar J., Shekargoftar M., Krumpolec R., Homola T. Activation of polycarbonate (PC) surfaces by atmospheric pressure plasma in ambient air. *Polymer Testing*. 2018;67:428–434.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.027>
12. Shekargoftar M., Kellar J., Krumpolec R., Jurmanova J., Homola T. A Comparison of the Effects of Ambient Air Plasma Generated by Volume and by Coplanar DBDs on the Surfaces of PP/Al/PET Laminated Foil. *IEEE Transactions Plasma Science*. 2018;46(10):3653–3661.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2861085>
13. Vesel A., Zaplotnik R., Primc G., Mozetič M. Evolution of the Surface Wettability of PET Polymer upon Treatment with an Atmospheric Pressure Plasma Jet. *Polymers*. 2020;12(1):87.
<https://doi.org/10.3390/polym12010087>
14. Noeske M., Degenhardt J., Strudthoff S., Lommatzsch U. Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2004;24:171–177.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.09.006>
15. Hamdi M., Saleh M.N., Poulis J.A. Improving the adhesion strength of polymers: effect of surface treatments. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2020;34(17):1853–1870.
<https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1732750>
16. Qi L., Min W., Gao R., Li Z., Yu M., Sun Z. Optimization of interfacial bonding properties between thermoplastic liners and carbon fiber-reinforced composites by atmospheric-pressure plasma and failure mechanism study. *Polymer Composites*. 2023;44(4):2361–2378.
<https://doi.org/10.1002/pc.27249>
17. Черепанов К.А., Коротков С.Г. Термозащита и энергосбережение на основе использования нанодисперсного связующего. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2015;2(12):88–91.
18. Кравец Л.И., Дмитриев С.Н., Апель П.Ю. Полипропиленовые трековые мембраны для микро- и ультрафильтрации химически агрессивных сред. I. Травление треков высокоэнергетичных ионов в полипропилене. Мембраны. Дубна: Объединенный институт ядерных исследований, 2000:31.
19. Химические свойства и модификация полимеров / Под ред. Г.С. Колесникова. Москва: Наука, 1964:287.
20. Ананьев В.В., Перетокин Т.Н., Заиков Г.Е., Софьина С.Ю. Модификация адгезионных свойств полимерных пленок обработкой коронным разрядом. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;17(5):116–119.
21. Василькин Д.П., Волкова В.П. Изменение свойств поверхности пленки полипропилена при обработке в струе плазмы атмосферного давления на основе тлеющего разряда постоянного тока. В кн.: *Физика, техника и технология сложных систем. Тезисы докладов конференции*. 2020:14–15.

22. Абдуллина В.Х., Сергеева Е.А., Абдуллин И.Ш., Тихонова В.П. Гидрофилизация полипропиленовой пленочной нити низкотемпературной плазмой пониженного давления. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2009;4:129–131.
 23. Kusano Y., Madsen B., Berglund L., Oksman K. Modification of cellulose nanofibre surfaces by He/NH₃ plasma at atmospheric pressure. *Cellulose*. 2019;26(12):7185–7194. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02594-8>
 24. Коновалова О.А., Хайдарова А.Р., Ибрагимов Р.Г., Салахов М.Х. Исследование модифицированных пористых мембран методом атомно-силовой микроскопии. *Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки*. 2018;160(1):81–88.
 25. Pandiyaraj K.N., Selvarajan V., Deshmukh R.R., Gao C. Modification of surface properties of polypropylene (PP) film using DC glow discharge air plasma. *Applied Surface Science*. 2009;255(7):3965–3971. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.10.090>
- REFERENCES**
1. Kostov K.G., Nishime T.M.C., Castro A.H.R., Toth A., Hein L.R.O. Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet. *Applied Surface Science*. 2014;314:367–375. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.07.009>
 2. Nastuta A.V., Asandulesa M., Doroftei F., Dascalu I-A., Varganici C.-D., Tiron V., Topala I. Atmospheric Pressure Plasma Jet Exposure of Polylactic Acid Surfaces for Better Adhesion: Plasma Parameters towards Polymer Properties. *Polymers*. 2024;16(2):240. <https://doi.org/10.3390/polym16020240>
 3. Demin K.A., Khagaleev A.N., Urkhanova L.A., Khardaev P.K., Agnaev S.S., Dondukov S.D. Sliding arc plasma modified waterproofing polymer films. *Vestnik VSGUTU*. 2024;1(92):90–96. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/24131997_2024_1_90
 4. Mozetič M. Aging of Plasma-Activated Polyethylene and Hydrophobic Recovery of Polyethylene Polymers. *Polymers*. 2023;15(24):4668. <https://doi.org/10.3390/polym15244668>
 5. Berczeli M., Hatoss B., Kókai E. Surface treatment of polymer matrix nanocomposites for adhesion enhancement by cold plasma. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022;1246:012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012028>
 6. Vassallo E., Aloisio M., Pedroni M., Ghezzi F., Cerruti P., Donnini R. Effect of Low-Pressure Plasma Treatment on the Surface Wettability of Poly (butylene succinate) Films. *Coatings*. 2022;12(2):220. <https://doi.org/10.3390/coatings12020220>
 7. Khagaleev A.N., Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Demin K.A., Mokeev M.A., Agnaev S.S. The influence of sliding arc plasma on the physical and mechanical properties of waterproofing polyethylene. *Vestnik VSGUTU*. 2022;4(87):64–70. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/24131997_2022_4_64
 8. Aydemir C., Altay B.N., Akyol M. Surface analysis of polymer films for wettability and ink adhesion. *Color Research and Application*. 2021;46(2):489–499. <https://doi.org/10.1002/col.22579>
 9. Štěpánová V., Šrámková P., Sihelník S., Stupavská M., Jurmanová J., Kováčik D. The effect of ambient air plasma generated by coplanar and volume dielectric barrier discharge on the surface characteristics of polyamide foils. *Vacuum*. 2021;183:109887. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109887>
 10. Grigor'ev A.Yu., Efremova A.A., Garipov R.M. Changes in the surface properties of polymer films during short-term treatment with a corona discharge field. *Promyshlennoe proizvodstvo i ispol'zovanie elastomerov*. 2021;3:44–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-8268-2021-3-44-50>
 11. Kellar J., Shekargoftar M., Krumpolec R., Homola T. Activation of polycarbonate (PC) surfaces by atmospheric pressure plasma in ambient air. *Polymer Testing*. 2018;67:428–434. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.027>
 12. Shekargoftar M., Kellar J., Krumpolec R., Jurmanova J., Homola T. A Comparison of the Effects of Ambient Air Plasma Generated by Volume and by Coplanar DBDs on the Surfaces of PP/Al/PET Laminated Foil. *IEEE Transactions Plasma Science*. 2018;46(10):3653–3661. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2861085>
 13. Vesel A., Zaplotnik R., Primc G., Mozetič M. Evolution of the Surface Wettability of PET Polymer upon Treatment with an Atmospheric-Pressure Plasma Jet. *Polymers*. 2020;12(1):87. <https://doi.org/10.3390/polym12010087>
 14. Noeske M., Degenhardt J., Strudthoff S., Lommatzsch U. Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2004;24:171–177. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.09.006>
 15. Hamdi M., Saleh M.N., Poullis J.A. Improving the adhesion strength of polymers: effect of surface treatments. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2020;34(17):1853–1870. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1732750>
 16. Qi L., Min W., Gao R., Li Z., Yu M., Sun Z. Optimization of interfacial bonding properties between thermoplastic liners and carbon fiber-

- reinforced composites by atmospheric-pressure plasma and failure mechanism study. *Polymer Composites*. 2023;44(4):2361–2378. <https://doi.org/10.1002/pc.27249>
17. Cherepanov K.A., Korotkov S.G. Thermal protection and energy saving based on the use of nanodispersed binder. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2015;2(12):88–91. (In Russ.).
 18. Kravets L.I., Dmitriev S.N., Apel' P.Yu. Polypropylene track membranes for micro- and ultrafiltration of chemically aggressive media. I. Etching of high-energy ion tracks in polypropylene. *Membrany*. Dubna: Ob"edinennyi institut yadernykh issledovaniy, 2000:31 (In Russ.).
 19. Kolesnikov G.S. ed. *Chemical properties and modification of polymers: Collection of articles: editor-in-chief*. Moscow: Nauka, 1964:287. (In Russ.).
 20. Anan'ev V.V., Peretokin T.N., Zaikov G.E., Sof'ina S.Yu. Modification of adhesive properties of polymer films by corona discharge treatment. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014;17(5):116–119. (In Russ.).
 21. Vasil'kin D.P., Volkova V.P. Changes in the properties of the surface of polypropylene film during processing in a plasma jet at atmospheric pressure based on a direct current glow discharge. In: *Physics, engineering and technology of complex systems. Abstracts of the conference reports*. 2020:14–15. (In Russ.).
 22. Abdullina V.Kh., Sergeeva E.A., Abdullin I.Sh., Tikhonova V.P. Hydrophilization of polypropylene film thread by low-temperature, low-pressure plasma. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2009;4:129–131. (In Russ.).
 23. Kusano Y., Madsen B., Berglund L., Oksman K. Modification of cellulose nanofibre surfaces by He/NH₃ plasma at atmospheric pressure. *Cellulose*. 2019;26(12):7185–7194. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02594-8>
 24. Konovalova O.A., Khaidarova A.R., Ibragimov R.G., Salakhov M.Kh. Study of modified porous membranes by atomic force microscopy. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki*. 2018;160(1):81–88. (In Russ.).
 25. Pandiyaraj K.N., Selvarajan V., Deshmukh R.R., Gao C. Modification of surface properties of polypropylene (PP) film using DC glow discharge air plasma. *Applied Surface Science*. 2009;255(7):3965–3971. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.10.090>

Сведения об авторах:

Кирилл Андреевич Демин, старший преподаватель, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, младший научный сотрудник, Институт физического материаловедения
E-mail: kirill.demin.19992@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5102-7789
SPIN-код: 9090-8016

Степан Сергеевич Агнаев, студент, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

E-mail: stephanagnaev02@gmail.com
ORCID: 0009-0003-6155-957X
SPIN-код: 4032-7829

Саян Дмитриевич Дондуков, студент, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

E-mail: dondukov.s@yandex.ru
ORCID: 0009-0005-5745-9626
SPIN-код: 3868-3460

Андрей Николаевич Хазлеев, к.т.н., доцент, старший преподаватель, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, научный сотрудник, Институт физического материаловедения

E-mail: khagleev@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-6540-7088
SPIN-код: 4394-0590

Information about the authors:

Kirill A. Demin, Senior Lecturer, East Siberian State University of Technology and Management, Junior Researcher, Institute of Physical Materials Science

E-mail: kirill.demin.19992@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5102-7789
SPIN-код: 9090-8016

Stepan S. Agnaev, student, East Siberian State University of Technology and Management

E-mail: stephanagnaev02@gmail.com
ORCID: 0009-0003-6155-957X
SPIN-код: 4032-7829

Sayan D. Dondukov, student, East Siberian State University of Technology and Management

E-mail: dondukov.s@yandex.ru
ORCID: 0009-0005-5745-9626
SPIN-код: 3868-3460

Andrey N. Khagleev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Senior Lecturer, East Siberian State University of Technology and Management, Researcher, Institute of Physical Materials Science

E-mail: khagleev@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-6540-7088
SPIN-код: 4394-0590

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

Поступила в редакцию 05.05.2025

После доработки 21.05.25

Принята к публикации 26.05.25

Received 05.05.2025

Revised 21.05.25

Accepted 26.05.25