

Научная статья

УДК 533.924

DOI 10.18101/2306-2363-2025-3-38-43

Влияние низкотемпературной плазмы атмосферного давления на химический состав поверхности полипропилена

© **Агнаев Степан Сергеевич**

студент,

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

Россия, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В

stephanagnae02@gmail.com

© **Демин Кирилл Андреевич**

младший научный сотрудник,

Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН

Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

kirill.demin.19992@gmail.com

© **Дондуков Саян Дмитриевич**

студент,

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

Россия, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В

dondukov.s@yandex.ru

© **Хаглеев Андрей Николаевич**

кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник,

Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН

Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

khagleev@yandex.ru

© **Плешков Данил Юрьевич**

студент,

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

Россия, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В

danil.pleshkov.1947@mai.ru

Аннотация. Полипропилен (ПП) — один из наиболее широко используемых полимеров благодаря своим эксплуатационным свойствам. Однако низкая поверхностная энергия и химическая инертность ограничивают адгезию ПП к красящим и клеящим составам. Обработка низкотемпературной плазмой атмосферного давления — эффективный метод модификации, не затрагивающий объемные свойства материала. В статье рассмотрены механизмы воздействия низкотемпературной плазмы на поверхность ПП, вызванные обработкой изменения химического состава, являющиеся ключевыми для улучшения адгезии. Проанализировано влияние параметров обработки (вид плазмообразующего газа и время экспозиции) на введение функциональных групп и окисление поверхности.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма атмосферного давления, полипропилен, модификация поверхности, функциональные группы, окисление, адгезия, ИК-Фурье спектроскопия.

Для цитирования

Влияние низкотемпературной плазмы атмосферного давления на химический состав поверхности полипропилена / С. С. Агнаев, К. А. Демин, С. Д. Дондуков [и др.] // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2025. Вып. 3. С. 38–43.

Применение ПП, несмотря на широкое использование в различных отраслях промышленности, в процессах склеивания, печати, нанесения покрытий и ламинирования ограничено из-за низкой поверхностной энергии и отсутствия полярных функциональных групп на поверхности.

Применение плазменной модификации низкотемпературной плазмы позволяет локально и контролируемо изменять свойства поверхности ПП, сохраняя объемные свойства материала, экономическую эффективность и экологичность производства [1; 2]. Основной эффект от воздействия низкотемпературной плазмы на ПП заключается в изменении химического состава, электретных свойств и морфологии его поверхности. Настоящая работа посвящена детальному исследованию химических изменений поверхности ПП в результате обработки низкотемпературной плазмой атмосферного давления.

В качестве объекта исследования использовали пленки ПП, изготовленные согласно ГОСТу 26996-86 толщиной 500 мкм и размером 20×20 мм.

Модификацию пленок ПП осуществляли в течение 20 секунд при токе 50 мА, импульсном напряжении 8 кВ и частоте 15 кГц на разработанной плазменной установке — патент RU2781708C1¹. Для создания плазменного пучка в корпус установки направляли поток воздуха, который обтекал электроды и создавал плазменный поток, направляемый на обрабатываемый образец ПП.

При контакте пучка низкотемпературной плазмы с поверхностью ПП происходят следующие основные физико-химические процессы:

1. Бомбардировка высокоэнергетическими частицами (ионами и электронами) вызывает разрыв химических связей (С-С, С-Н) в поверхностных макромолекулах ПП, приводя к образованию активных радикалов и участков с ненасыщенными связями.
2. Окисление: процесс окисления протекает при использовании плазмообразующих газов, содержащих кислород (O₂, воздух, N₂/O₂ смеси), или при обработке в воздушной атмосфере. Ведущий процесс — введение кислородосодержащих групп [3; 4].

Воздействие плазмы и последующее окисление приводят к появлению новых полос поглощения и изменению интенсивности существующих в ИК-спектрах ПП. Для изучения химических свойств поверхности образцов ПП до и после плазменной модификации использовали метод инфракрасной (ИК) Фурье спектроскопии. ИК-спектры снимали на ИК-Фурье спектрометре Simex FT-801.

¹ Патент № 2781708 C1 Российская Федерация, МПК В29С 71/00, H01J 37/00. Установка для модификации поверхности полимерных пленок в низкотемпературной плазме скользящего разряда атмосферного давления: № 2022107494: заявл. 22.03.2022; опублик. 17.10.2022 / А. Н. Хаглеев, К. А. Демин, М. А. Мокеев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления». — EDN DVYCAS.

На рисунках 1–3 представлены ИК-спектры ПП пленок исходного и модифицированных образцов ПП.

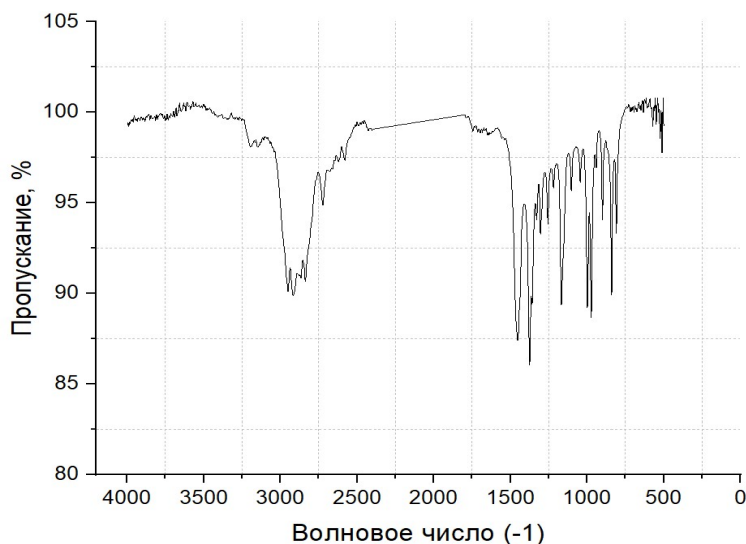


Рис. 1. ИК-спектр исходного образца

Исходный образец демонстрирует характерные для ПП полосы поглощения: $\sim 2800\text{ см}^{-1}$ — 3000 см^{-1} (С-Н валентные колебания в $-\text{CH}_2-$ и $-\text{CH}_3$ группах). $\sim 1450\text{ см}^{-1}$ и $\sim 1375\text{ см}^{-1}$ (деформационные колебания CH_2 и CH_3).

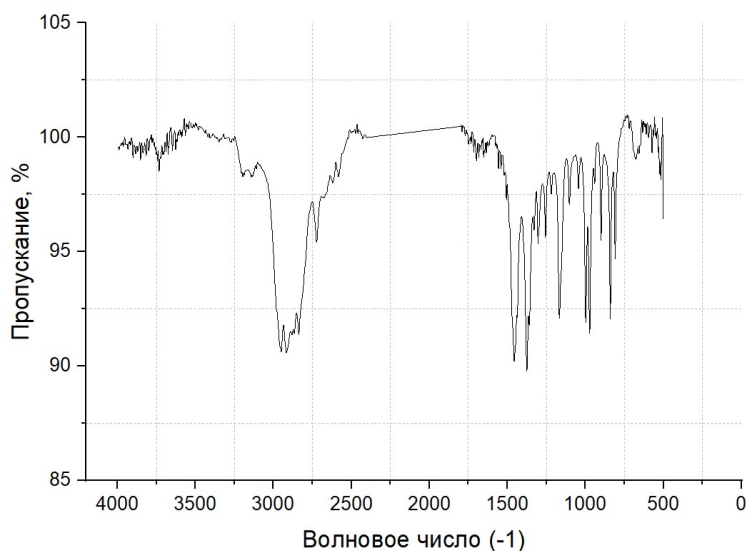


Рис. 2. ИК-спектр ПП пленок, модифицированных низкотемпературной плазменной обработкой в воздушной среде

После обработки ПП воздушной плазмой в спектрах появляются новые пики: около 1700 см^{-1} (карбонильные группы $\text{C}=\text{O}$), а также возможные пики $\text{C}=\text{C}$ при

1 600–1 500 см^{-1} . Исходные пики С-Н (1 350 см^{-1} — 1 450 см^{-1}) не изменяются. Плазменная модификация усиливает пики С=О и С-О, что отражает окисление поверхности, связанное с образованием спиртовых и эфирных групп. Такие изменения повышают полярность поверхности и улучшают адгезию ПП.

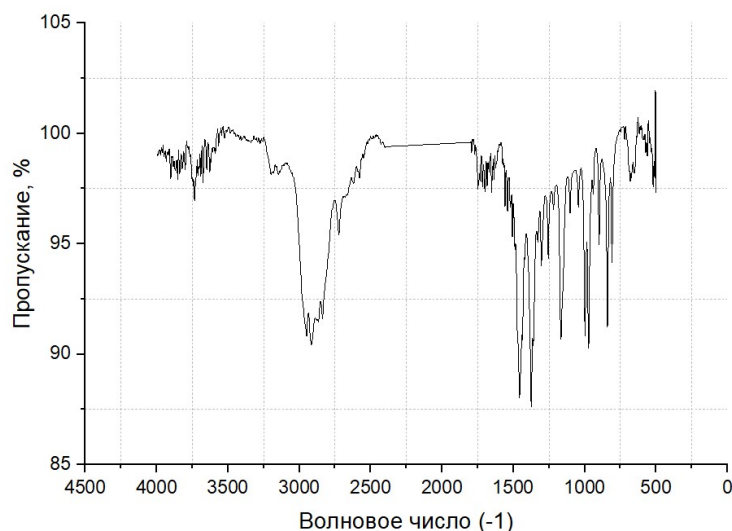


Рис. 3. ИК-спектры ПП пленок, модифицированных низкотемпературной плазменной обработкой в аргоне

После плазменной модификации в аргоне на образце ПП наблюдается уменьшение интенсивности пиков в области 2 900–2 800 см^{-1} (разрушение СН-связей) и появление новых полос: ~1700 см^{-1} (С=О), ~1600–1500 см^{-1} (С=С), ~1300–1000 см^{-1} (С-О).

Наблюдаемые изменения в ИК-спектрах обрабатываемого ПП коррелируют с параметрами плазменной модификации (мощность, время экспозиции), что позволяет использовать ИК-спектроскопию для оптимизации процесса модификации. Установлено, что ключевым параметром, влияющим на результат модификации, является плазмообразующий газ. Время модификации требует подбора для достижения оптимального результата, избегая как недостаточной модификации, так и термического разрушения обрабатываемого образца ПП.

Литература

1. Модифицирование полипропилена в послесвечении разрядов атмосферного давления / Д. П. Василькин, Т. Г. Шикова, В. А. Титов и др. // Вестник ИГХТУ. 2023. № 3. С. 45–52.
2. 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, V. 1246, 012028.
3. Zajac K., Macyk J., Szajna K., Krok F., Macyk W., Kotarba A. Functionalization of Polypropylene by TiO_2 Photocatalytic Nanoparticles: On the Importance of the Surface Oxygen Plasma Treatment. *Nanomaterials*. 2024; 14: 1372.

С. С. Агнаев, К. А. Демин, С. Д. Дондуков, А. Н. Хаглеев, Д. Ю. Плешков. Влияние низкотемпературной плазмы атмосферного давления на химический состав поверхности ...

4. Zhou Y., Fang Z., Zhang Y., Li T., Liu F. Surface Hydrophilic Modification of Polypropylene by Nanosecond Pulsed Ar/O₂ Dielectric Barrier Discharge. *Materials (Basel)*. 2024; 18(1): 95.

Статья поступила в редакцию 07.11.2025; Одобрена после рецензирования 10.11.2025; Принята к публикации 18.11.2025.

Influence of Low-Temperature Atmospheric-Pressure Plasma on the Surface Chemistry of Polypropylene

Stepan S. Agnaev

Student

East Siberia State University of Technology and Management

40v Klyuchevskaya St., 670013 Ulan-Ude, Russia

stephanagnaev02@gmail.com

Kirill A. Demin

Junior Researcher

Institute of Physical Material Science SB RAS

6 Sakhyanovoy St., 670047 Ulan-Ude, Russia

kirill.demin.19992@gmail.com

Sayan D. Dondukov

Student

East Siberia State University of Technology and Management

40v Klyuchevskaya St., 670013 Ulan-Ude, Russia

dondukov.s@yandex.ru

Andrei N. Khagleev

Cand. Sci. (Engineering), A/Prof., Researcher

Institute of Physical Material Science SB RAS

6 Sakhyanovoy St., 670047 Ulan-Ude, Russia

khagleev@yandex.ru

Danil Yu. Pleshkov

Student

East Siberia State University of Technology and Management

40v Klyuchevskaya St., 670013 Ulan-Ude, Russia

danil.pleshkov.1947@mai.ru

Abstract. Polypropylene (PP) is one of the most widely used polymers due to its performance properties. However, its low surface energy and chemical inertness limit the adhesion of PP to paints and adhesives. Treatment with low-temperature atmospheric-pressure plasma is an effective modification method that does not affect the bulk properties of the material. This article examines the mechanisms of low-temperature plasma interaction with the PP surface and the resulting changes in chemical composition, which are key to improving adhesion. The influence of processing parameters (type of plasma-forming gas and exposure time) on the introduction of functional groups and surface oxidation is analyzed.

Keywords: low-temperature atmospheric-pressure plasma, polypropylene, surface modification, functional groups, oxidation, adhesion, FTIR spectroscopy.

For citation

Агнаев, С. С. Демин К. А. Дондуков С. Д. Хяглеев А. Н., Плешков Д. Ю. Influence of Low-Temperature Atmospheric-Pressure Plasma on the Surface Chemistry of Polypropylene. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2025; 3: 38–43 (in Russ.).

The article was submitted 07.11.2025; approved after reviewing 10.11.2025; accepted for publication 17.11.2025.