ISSN 2075-8545 (online)

Nanotechnologies in construction
Нанотехнологии в строительстве

2026; 18 (5):
621–626

Nanobuild.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

Научная статья / Original article
УДК 621.793
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-5-621-626

CC BY 4.0

Разработка технологии нанесения изолирующего материала на «холодную» часть патронного электрического нагревателя для эксплуатации в агрессивных средах

Олег Ренатович Латыпов[1]*, Карина Вадимовна Ким[1, 2], Василий Васильевич Лукьянов[1, 2], Дина Ринатовна Латыпова[1], Рустем Рифович Даминев[1], Алиса Фанировна Ахмадуллина[1, 2]

[1] Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450064, Уфа, улица Космонавтов, 1, Российская Федерация

[2] Научно-производственная ассоциация «Технопарк Авиационных Технологий», 450112 г. Уфа, ул. Трамвайная 5, к. 1, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: o.r.latypov@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящий момент фторполимеры получили достаточно широкое распространение в различных отраслях промышленности. Одной из областей применения фторопластовых покрытий в нефтяной промышленности является использование их в качестве защитных покрытий для предотвращения отложения парафиновых пробок на стенках насосно-компрессорных труб и промысловых трубопроводов. Детали из фторопластов находят перспективное применение в машинах и агрегатах нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств, где необходимы высокая коррозионная стойкость, достаточная прочность и высокие триботехнические свойства. Сложностью повсеместного распространения покрытий на основе фторопласта является его низкая адгезия к металлической поверхности. В связи с этим покрытия на основе фторопластов обычно представляют сложные системы, включающие непосредственно фторопластовый полимер, связующие добавки и функциональные наполнители. **Материалы и методы.** В исследовании использовались металлические пластины из титанового сплава ВТ6 и углеродистой стали Ст3 с нанесенным покрытием из водной фторопластовой суспензии с наноразмерными частицами. Фторопластовые полимерные покрытия имеют слабую адгезионную прочность к металлической поверхности, на которую они наносятся. Поэтому для обеспечения высокого уровня адгезии покрытия к металлической подложке необходимо применение комплексных методов предварительной подготовки поверхности. Покрытие наносилось на предварительно подготовленную поверхность металлических пластин методом пневматического распыления с использованием краскопульта и сжатого воздуха. Ключевыми параметрами формирования фторопластовой пленки являлись режимы сушки и спекания. Адгезия оценивалась по методам «Х-образного» надреза (ГОСТ 32702.2-2014) и отрыва в разрывной машине на цилиндрах (ГОСТ 32299-2025). **Результаты.** В работе предложен метод повышения адгезии фторопластовой пленки толщиной 500 мкм к металлической пластине путем нанесения промежуточного грунтовочного слоя из суспензии, содержащей оксид хрома (III), фосфорную кислоту, воду и фторопласт. Промежуточный адгезионный грунтовочный слой наносили пневмораспылением с теми же режимами, что и основное фторопластовое покрытие. За счет этого обеспечивалось соответствие предложенных условий сушки и спекания к основному слою. Применение грунтовки позволяло реализовать градиентный переход от металлической подложки к фторопластовому слою и значительно повысить адгезионные свойства. **Заключение.** Полученные результаты демонстрируют значительное улучшение адгезии по сравнению с контрольными образцами без грунтовки: значение предела прочности по методу отрыва равно 2,56 Н/мм^2, а по методу Х-надреза – с 5 баллов до 1 балла (следы отслаивания или удаления покрытия вдоль надрезов). Метод прост в реализации и перспективен для применения в защитных покрытиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фторопласт, адгезия, грунтовка, оксид хрома (III), фосфорная кислота, метод «Х- образного» надреза, метод отрыва

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ: Работа проводилась в рамках реализации Стратегического проекта «Новые технологии, технические и интеллектуальные системы в машиностроении» программы развития ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» на 2021–2030 годы в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

© Латыпов О.Р., Ким К.В., Лукьянов В.В., Латыпова Д.Р., Даминев Р.Р., Ахмадуллина А.Ф., 2026

ISSN 2075-8545 (online)

Nanotechnologies in construction
Нанотехнологии в строительстве

2026; 18 (5):
621–626

Nanobuild.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку проекта.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Латыпов О.Р., Ким К.В., Лукьянов В.В., Латыпова Д.Р., Даминев Р.Р., Ахмадуллина А.Ф. Разработка технологии нанесения изолирующего материала на «холодную» часть патронного электрического нагревателя для эксплуатации в агрессивных средах. *Нанотехнологии в строительстве.* 2026;18(5):621–626. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-5-621-626. – EDN: MYGYGS.

Creating a technology to coat the insulating material on the "cold" section of a cartridge-style electric heater for operation in aggressive environments

Oleg R. Latypov[1]*, Karina V. Kim[1, 2], Vasily V. Lukyanov[1, 2], Dina R. Latypova[1], Rustem R. Daminev[1], Alisa F. Ahmadullina[1, 2]

[1] Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Kosmonavtov str 1, 450064, Russian Federation
[2] Scientific and Production Association "Technopark of Aviation Technologies", Tramvaynaya str. 5, building 1, 450112, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: o.r.latypov@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Currently, fluorine polymers have become quite widespread in various industries. One of the fields of application of fluoroplastic coatings in the oil industry is their use as protective coatings to prevent the deposition of paraffin plugs on the walls of tubing and field pipelines. Fluoroplastic parts find promising application in machines and units of oil refining and petrochemical industries, where high corrosion resistance, sufficient strength and high tribotechnical properties are required. The complexity of the ubiquity of fluoroplastic coatings is its low adhesion to the metal surface. In this regard, fluoroplastic coatings are typically complex systems comprising directly fluoroplastic polymer, binders and functional fillers. **Materials and methods.** The study used metal plates made of titanium alloy VT6 and carbon steel St3 coated with an aqueous fluoroplastic suspension. Fluoroplastic polymer coatings have poor adhesive strength to the metal surface on which they are applied. Therefore, in order to ensure a high level of adhesion of the coating to the metal substrate, it is necessary to use complex methods of preliminary surface preparation. The coating was applied to the pre-prepared surface of the metal plates by air spraying using a spray gun and compressed air. The key parameters for the formation of the fluoroplastic film were drying and sintering modes. Adhesion was evaluated by the methods of "X-shaped" notch (State Standard 32702.2-2014) and tearing in a tensile machine on cylinders (State Standard 32299-2025). **Results.** Proposed method comprises application of intermediate primer layer from suspension containing chromium (III) oxide, phosphoric acid, water and fluoroplastic. The intermediate adhesive primer layer was applied by air spraying under the same conditions as the base fluoroplastic coating. This ensured that the proposed drying and sintering conditions met the base layer. The use of a primer made it possible to realize a gradient transition from the metal substrate to the fluoroplastic layer and significantly increase the adhesion properties. **Conclusion.** The results show a significant improvement in adhesion compared to the control samples without primer: the tensile strength value by the tear method is 2.56 N/mm^2, and by the X-notch method - from 5 points to 1 point (traces of peeling or removal of the coating along the incisions). The method is easy to implement and promising for use in protective coatings.

KEYWORDS: fluoroplastic, adhesion, primer, chromium (III) oxide, phosphoric acid, "X-notching" method, tearing method

SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION: This work was conducted as part of the Strategic Project "New technologies, technical, and intelligent systems in mechanical engineering" of the Ufa State Petroleum Technological University Development Program for 2021–2030 in accordance with the Priority 2030 Strategic Academic Leadership Program.

ACKNOWLEDGEMENTS: The authors are grateful for the financial support of this project.

FOR CITATION:
Latypov O.R., Kim K.V., Lukyanov V.V., Latypova D.R., Daminev R.R., Ahmadullina A.F. Creating a technology to coat the insulating material on the "cold" section of a cartridge-style electric heater for operation in aggressive environments. *Nanotechnologies in construction.* 2026;18(5):621–626. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-5-621-626. – EDN: MYGYGS.

ISSN 2075-8545 (online)

ВВЕДЕНИЕ

Политетрафторэтилен (фторопласт) относится к числу наиболее перспективных фторполимеров, применяемых в качестве защитных покрытий для металлических конструкций. Благодаря высокой химической стойкости, низкому коэффициенту трения, широкому температурному диапазону эксплуатации и диэлектрическими свойствами фторопластовые пленки находят применение в нефтехимическом оборудовании, авиастроении, машиностроении и ряде других отраслях. При этом низкая поверхностная энергия и высокая кристалличность политетрафторэтилена приводят к его низкой адгезии к большинству материалов, что требует специальной подготовки поверхности и использование соответствующих праймеров или сополимерных связок [1]. В частности, в литературе подробно описываются свойства и особенности применения промежуточного слоя на основе госсиполовой смолы [2], который демонстрирует высокую совместимость с различными лакокрасочными материалами. Большинство исследований посвящены модифицированным эпоксидным составам [3], которые благодаря своей высокой адгезии часто служат основой для грунтовок. Кроме того, проводятся исследования полианилиновой грунтовки как функционального компонента антикоррозионных покрытий, способных влиять на электрохимические процессы на границе раздела фаз [4]. В целом применение грунтовок и адгезионных слоев помогает существенно повысить срок службы покрытия, в том числе в коррозионно-активной среде, где данный подслой выступает в качестве дополнительной защиты от коррозии. В некоторых случая применяется система из грунтовки и дополнительного промежуточного покрытия между грунтом и финишным покрытием для защиты металла от химически агрессивных сред.

В ряде работ показано, что модификация поверхности фторопласта с помощью плазменной обработки, в частности атмосферной азотной плазмы, приводит к повышению смачиваемости, частичной дефторизации поверхности и введению кислород- и азотсодержащих функциональных групп, что улучшает адгезионные характеристики по сравнению с немодифицированным полимером [5, 6]. Аналогичные эффекты наблюдаются при ионно-лучевой обработке пленок фторопласта, когда ионное облучение вызывает изменение химического состава верхних слоев, улучшение сцепления металла с модифицированной поверхностью полимера [7]. Вместе с тем такие методы требуют вакуумного или плазменного оборудования и зачастую ориентированы на тонкие пленки и специфические пары материалов, что ограничивает их использование в массовых технологических процессах. Наряду с модификацией самого полимера важную роль играет подготовка металлической подложки. Фосфатирующие обработки традиционно используются для повышения адгезии лакокрасочных и полимерных покрытий к сталям и оцинкованной стали за счет формирования на поверхности тонкого слоя фосфатов металлов [8, 9]. В обзорах по конверсионным покрытиям подчеркивается, что фосфатные и хроматные пленки выполняют функции промежуточного слоя, повышающего адгезию последующих покрытий [10].

Работы по фосфатированию и применению фосфатных грунтовок показывают, что такие конверсионные слои способны существенно повышать адгезию органических и полимерных покрытий к металлическим подложкам. В ряде исследований установлено, что при предварительном фосфатировании стальных и оцинкованных поверхностей последующие лакокрасочные и полимерные системы формируют более прочное и устойчивое соединение с подложкой по сравнению с немодифицированными поверхностями, при этом наиболее ярко выраженный эффект достигается в системах с эпоксидными, полиэфирными связующими и полимерными пленками, наносимыми на фосфатированный слой [11, 12].

Целью данной работы является экспериментальная оценка адгезии фторопластовой пленки толщиной 500 мкм к металлической подложке при использовании грунтовки, содержащей фторопласт, оксид хрома (III) (Cr_2O_3) в водной среде и фосфорную кислоту (H_3PO_4). Данная грунтовка нацелена на систему «металл-грунтовка-фторопласт(пленка)» и использует фторопласт непосредственно в составе грунтовочного слоя, формируя градиентный переход к основному покрытию.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использовались металлические пластины из титанового сплава ВТ6 (аналог Ti–6Al–4V) и углеродистой стали Ст3, имевшие размеры 120×60×1 мм. Перед нанесением покрытий пластины подвергали очистке от загрязнений и обезжиривали ацетоном х.ч. в ультразвуковой ванне «ODA-MH280» (Китай) мощностью 1100 Вт при частоте 40 кГц в течение 10 минут при температуре 20–22 °C. Данная операция обеспечивала удаление поверхностных органических загрязнений, что является важным условием для формирования равномерного и стабильного адгезионного соединения.

В качестве основного материала для покрытия применялась водная суспензия фторопласта с наноразмерными частицами производителя АО «ГалоПолимер Пермь». Покрытие наносилось на предварительно подготовленные пластины методом пневмораспыления с использованием краскопульта и сжатого

ISSN 2075-8545 (online)

воздуха. Рабочее давление сжатого воздуха составляло 0,2–0,3 МПа, расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности находилось в диапазоне 300–400 мм, что обеспечивало равномерное формирование монослоя суспензии без брызгообразования и стекания.

Ключевыми параметрами формирования фторопластовой пленки являлись режимы сушки и спекания. Сушка проводилась при температуре не выше 90 °С в течении 45 минут для завершения удаления свободной и связанной влаги из водной суспензии, при этом контролировалось отсутствие образования трещин и пузырей в высохшем слое. Спекание осуществлялось при температуре 370 °С в течении 8–10 минут с последующим охлаждением в печи до комнатной температуры. Для достижения заданной толщины покрытия (500 мкм) процесс последовательно повторяли многократно, обеспечивая накопление слоев с контролем их толщины и сплошности. Все операции сушки и спекания выполнялись в лабораторной электрической печи «KS-18» (Россия), оснащенной термоконтролем и равномерным распределением температуры по рабочему объему.

Адгезионную прочность сформированных фторопластовых пленок оценивали с использованием двух стандартных методов: методом «Х-образного» надреза по ГОСТ 32702.2-2014 и методом нормального отрыва по ГОСТ 32299-2025 на образцах размерами 50×50×1 мм. Ввиду выраженных антиадгезионных свойств и сложности приклеивания разрывных цилиндров к поверхности фторопластовой пленки применение классических методов оценки отрывной прочности оказалось затруднительным. В связи с этим была разработана модифицированная методика, позволяющая проводить измерения без нарушения целостности покрытия. Пленки формировали на торцевых поверхностях пары пластин, обеспечивали их контакт и осуществляли термопластичное соединение при температуре 330 °С (близкой к температуре расплавления фторопласта) в течение 5–7 минут. В результате между торцами формировался непрерывный слой фторопласта, служащий адгезионным швом. На подготовленные таким образом склеенные пластины устанавливали металлические разрывные цилиндры, закрепленные эпоксикаучуковым клеем КДС-19. Испытание на адгезию методом отрыва проводились на универсальной испытательной машине «РЭМ-У-А» (Россия) при фиксированной скорости нагружения. Схема предложенной методики представлена на рисунке 1.

В ряде работ показано, что для улучшения адгезионной прочности фторопластовых пленок к металлическим подложкам целесообразно предварительное нанесение промежуточного адгезионного слоя. В рамках данной работы в качестве такого промежуточного слоя применялась суспензия, содержащая фторопласт с наноразмерными частицами, оксид хрома (III) (Cr_2O_3) в водной среде и фосфорную кислоту (H_3PO_4). Данное промежуточное покрытие формировало тонкий грунтовочный слой, наносимый пневмораспылением с теми же режимами, что и основное фторопластовое покрытие, за счет чего обеспечивалось соответствие условий сушки и спекания основному слою. Применение грунтовки позволяло реализовать градиентный переход от металлической подложки к фторопластовому слою и повысить адгезионные свойства.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При оценке адгезии фторопластовых пленок толщиной 500 мкм по методу «Х-образного» надреза [13] было установлено существенное различие в поведении покрытий на образцах с грунтовкой и без нее. Для пленок, сформированных без предварительного грун-

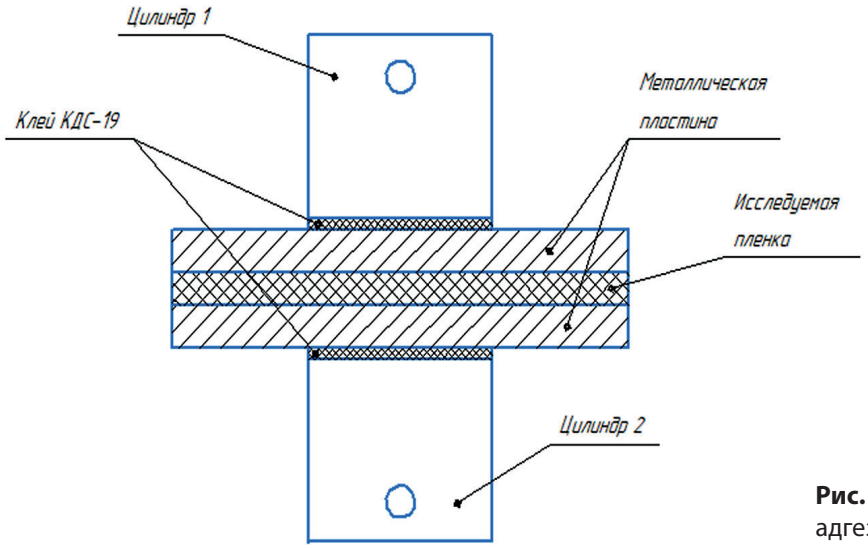


Рис. 1. Схема методики проверки адгезии ПТФЭ-пленки

ISSN 2075-8545 (online)

товочного слоя, наблюдалось интенсивное и сплошное отслоение покрытия по периметру надреза. В визуальной оценке по пятибалльной шкале это соответствовало 5 баллам, что указывает на полное отсутствие адгезии фторопластовых пленок к металлической подложке в условиях прямого контакта. Для пленок, наносимых с слоем грунтовки, отслоение по периметру надреза было выражено в минимальной степени. В большинстве случаев наблюдалось лишь локальное, фрагментное отслаивание, при этом визуальная оценка соответствовала 1 баллу. Это свидетельствует о значительном улучшении адгезионной прочности и формировании достаточно устойчивого соединения, способного противостоять механическим воздействиям, приложенным по методу «Х-образного» надреза.

При оценке адгезии по методу нормального отрыва с использованием разработанной методики было установлено, что отсутствие грунтовочного слоя приводит к систематическим дефектам формирования адгезионного шва. Для пленок, сформированных из суспензии фторопласта с наноразмерными частицами без грунтовки и при последующем термопластическом соединении торцевых поверхностей пластины, наблюдалось самопроизвольное отслаивание покрытия от обоих торцов. Дефект проявлялся в виде отделения фторопластовой пленки на границе контакта с торцами металлических пластин, что приводило к разрушению целостности системы «металл-фторопласт (пленка)». В результате такие образцы не могли использоваться для количественной оценки адгезионной прочности по методу отрыва, поскольку разрушение происходило на стадии подготовки и не являлось следствием внешнего нагружения.

Для пленок, сформированных с применением грунтовочного слоя, адгезионный шов на торцах пластин сохранял целостность, и разрушение происходило под действием внешней нагрузки на испытательной машине (рис. 2).

По результатам серии испытаний для системы «металл-грунт-фторопласт (пленка)» были получены средние значения, представленные в таблице 1.

Эти значения свидетельствуют о формировании физически корректного и стабильного адгезионного соединения, при котором происходит когезионное разрушение в пределах фторопластовой матрицы или прилегающей к ней зоне, а не в виде самопроизвольного отслоения покрытия от подложки.

ВЫВОДЫ

1. Применение грунтовочного слоя из суспензии, содержащей фторопласт, оксид хрома (III) (Cr_2O_3) в водной среде и фосфорную кислоту (H_3PO_4), поднимает адгезионную прочность фторопластовой пленки толщиной 500 мкм к металлическим подложкам, что подтверждается как визуальной оценкой по методу «Х-образного» надреза, так и количественными данными по методу нормального отрыва. В системе с грунтовочным слоем степень отслоения снижается до 1 балла по ГОСТ 32702.2-2014, а при испытаниях на отрыв регистрации под нагрузкой фиксируются стабильные значения: средняя максимальная нагрузка составляет 1807,35 Н, максимальная деформация – 4,39 мм, предел прочности – 2,56 Н/мм^2, что свидетельствует о формировании физически корректного адгезионного соединения.

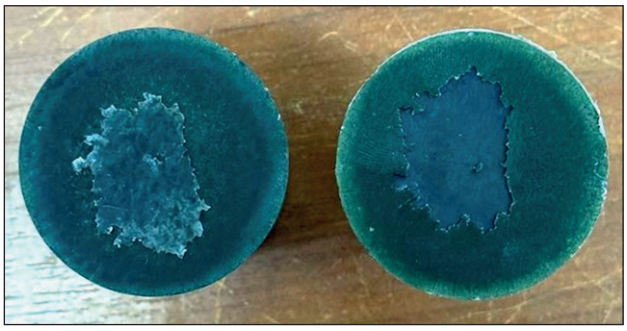


Рис. 2. Внешний вид покрытия с грунтовочным слоем после испытания методом нормального отрыва (модифицированная методика)

Таблица 1. Результаты испытания на адгезию методом отрыва

Максимальная нагрузка при разрушении, Н	Максимальная деформация, мм	Предел прочности (на разрыв), Н/мм^2
1807,35	4,39	2,56

2. Механизм повышения адгезии связан с комплексным действием фосфатно-оксидного слоя и градиентного перехода. Фосфорная кислота совместно с оксидом хрома формирует на металлической поверхности пористую структуру с развитой фактической площадью контакта, улучшая механическую зацепку с последующими полимерными и фторопластовыми покрытиями. Наличие фторопласта в составе грунтовки обеспечивает градиентный переход от металлической подложки через промежуточный слой к основной фторопластовой пленке, что снижает скачок физико-механических свойств и уменьшает концентрацию напряжений в зоне контакта.

3. Полученные результаты демонстрируют, что разработанная грунтовочная суспензия может быть рекомендована для применения в технологиях нанесения фторопластовых покрытий на металлические конструкции, где требуются одновременно высокая химическая стойкость, низкий коэффициент трения и достаточная адгезионная прочность.

ISSN 2075-8545 (online)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Patent US7462667B2. Primer coating of PTFE for metal substrates /3M Innovative Properties Company*; applicant: Klaus Hintzer, Michael C. Dadalas, Tilman Zipplies, Gernot Loehr. Application numbers: 11/172345; declared. 30.06.2005; publ. 09.12.2008.

2. Nadirov K.S., Zhantasov M.K., Sakybayev B.A. The study of the gossypol resin impact on adhesive properties of the intermediate layer of the pipeline three-layer rust protection coating. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2017;78:195-199. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.07.001

3. Baby M. Universal adhesion promoters for enhanced adhesion on metal and polymeric substrates. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2025;140:104103. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2025.104013

4. Ali M.R.R., Tigno D., Honeyman Ja.S., Caldona E.B. Adhesion-Diffusional-Based Corrosion Protection Mechanisms of Polyaniline-Primed Fluoropolymer Coatings. *Applied Polymer Materials*. 2024;6(5):2719-2732. https://doi.org/10.1021/acsapm.3c02944

5.Caceres-Ferreira W.-M., Destrieux A., Profili J., Guay-Bégin A.-A., Ravichandran S., Laurent M., Nolan M., Smith A., Wang H., Laroche G. Alternative Surface Treatment for the Enhanced Adhesion of Polytetrafluoroethylene Films via Atmospheric Pressure Nitrogen Plasma. *ACS Applied Polymer Materials*. 2024;6(20):12585–12597. https://doi.org/10.1021/acsapm.4c02152

6. Miyake E., Nishino M., Seto Y., Komatsu I., Endo K., Yamamura K., Ohkubo Y. Surface modification and adhesive-free adhesion of polytetrafluoroethylene (PTFE) and silicone gel containing oleophilicSiO_2 powder by plasma treatment.*RSC Advances*. 2023;13(3):1500–1510. https://doi.org/10.1039/D2RA05749B

7. LeeS.W., HongJ.W., WyeM.Y., KimJ.H., KangH.J., LeeY.S. Surface modification and adhesion improvement of PTFE film by ion beam irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2004;219–220:963-967. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.197

8. Kubo Y., Sonohara Y., Uemura S., Saito Y. High-Energy Electron-Irradiated Fluorinated Ethylene Polypropylene Copolymer Coatings on Al Substrates for Enhanced Metal Adhesion and Protection.*ACS Applied Nano Materials*. 2022;5(5):6750–6758. https://doi.org/10.1021/acsanm.2c00766

9. Mequanint K., Sanderson R., Pasch H. Adhesion properties of phosphate- and siloxane-containing polyurethane dispersions to steel: An analysis of the metal-coating interface. *Journal of Applied Polymer Science*. 2003;88(4):900–907. https://doi.org/10.1002/app.11680

10. Saran D., Kumar A., Bathula S., Klaumünzer D., Sahu K. K. Review on the phosphate-based conversion coatings of magnesium and its alloys. International *Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022;29(7):1435–1452.https://doi.org/10.1007/s12613-022-2419-2

11. Lukosiute I., Aniuniene J., Levinskas R. Effect of phosphate coatings on the performance of epoxy polyamide red oxide primer on galvanized steel.*Progress in Organic Coatings*. 2005;54(1):5–9. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2004.03.012

12. Jayaganthan A., Surya P., Teja P. J. Performance and Characterization Study of Zinc Phosphate Coating over Steel for Automotive Application. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2022;9(3):1014–1018.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Латыпов Олег Ренатович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и защита от коррозии» Института нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация, o.r.latypov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4487-1516

Ким Карина Вадимовна – магистрант кафедры «Материаловедение и защита от коррозии» Института нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета, Уфа, Россия; инженер Центра интеллектуального машиностроения Уфимского государственного нефтяного технического университета, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация; лаборант Технопарк АТ, 450112, Уфа, ул. Трамвайная 5, к. 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация, vadimovnakk@gmail.com, https://orcid.org/0009-0004-9434-0408

Лукьянов Василий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Интеллектуальные системы, технологии и оборудование в машиностроении» Института нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета, Уфа, Россия; старший научный сотрудник центра интеллектуального машиностроения Уфимского государственного нефтяного технического университета, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация; начальник отдела Управления разработками специальных технологий и оборудований Технопарк АТ, 450112, Уфа, ул. Трамвайная 5, к. 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация, lukianovv@bk.ru, https://orcid.org/0009-0006-3621-3966

Латыпова Дина Ринатовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Материаловедение и защита от коррозии» Института нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация, d.r.latypova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0637-3313

Даминев Рустем Рифович – доктор технических наук, профессор, директор Института нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий Уфимского государственного нефтяного технического университета, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация, daminew@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8673-5240

Ахмадуллина Алиса Фанировна – инженер-исследователь Центра интеллектуального машиностроения Уфимского государственного нефтяного технического университета, 450064, Уфа, ул. Космонавтов, 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация; ведущий инженер-конструктор Технопарк АТ, 450112, Уфа, ул. Трамвайная 5, к. 1, Республика Башкортостан, Российская Федерация, alisa_fanirovna@mail.ru, https://orcid.org/0009-0007-0911-0731

ВКЛАД АВТОРОВ

Латыпов О.Р. – научное руководство, анализ результатов исследования, написание статьи, составление итоговых выводов.

Ким К.В. – редактирование и обработка данных.

Лукьянов В.В. – научное руководство, разработка концепции и методологии исследования**.**

Латыпова Д.Р. – научное руководство, научное редактирование текста, научная дискуссия.

Даминев Р.Р. – научное руководство, научное редактирование текста, научная дискуссия.

Ахмадуллина А.Ф. – редактирование и обработка данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.07.2026; одобрена после рецензирования 02.10.2026; принята к публикации 08.10.2026.