

Оценка адгезии защитных покрытий к линейным стальным конструкциям при воздействии лазерного наноструктурирования

Никита Игоревич Щегольков^{1*} , Людмила Юрьевна Комарова¹ , Любовь Николаевна Лисиенкова² ,
Ольга Александровна Будникова³ , Виктория Викторовна Варфаловская⁴ , Александр Игоревич Цыбин⁵ 

¹ Московский Политехнический Университет, Москва, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

³ Московский государственный университет технологии и управления им. К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), Москва, Россия

⁴ «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия

⁵ ООО «Техновацинк», Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: shegolkovnicita@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с использованием больших объемов линейных стальных конструкций ужесточаются требования, предъявляемые к поверхности трубопроводов, с помощью которых реализуется добыча нефтяного флюида. Поэтому возникает потребность в изучении межфазной границы при нанесении и закреплении защитных покрытий. Современные исследования подтверждают потенциал лазерного наноструктурирования стальной поверхности перед нанесением полимерного слоя. Для внедрения лазерной технологии в промышленность требуются не только исследования свойств поверхности, но и оценка эксплуатационных качеств. Полуколичественным критерием оценки механической прочности связи полимерного слоя к металлическому субстрату, как правило, выступает адгезионная прочность покрытия. **Методы и материалы.** В исследовании применялись стальные пластины. Для лазерной обработки поверхности пластин использовались два иттербиевых оптоволоконных лазера импульсного типа. Полимерный слой представлял собой эпоксидно-фенольную смолу. Нанесение жидкого состава смолы осуществлялось безвоздушным распылением. Процесс полимеризации происходил в сушильном шкафу при температуре 150 °С. **Результаты и обсуждение.** В ходе исследований поверхность металлических пластин подвергалась лазерному наноструктурированию. После такого воздействия зафиксировано увеличение субмикрощероховатости поверхности в 2,3–4,7 раза по сравнению с исходным состоянием. Адгезионная прочность защитного слоя к стальной поверхности составила от 2,2 до 20,6 МПа в зависимости от вида применяемого лазерного оборудования. **Заключение и выводы.** Результаты испытаний показали, что наноструктурированная поверхность обеспечивает формирование совокупности нанонеровностей, которая усиливает адгезионную связь с полимерным эпоксидно-фенольным слоем и, как следствие, увеличивает адгезионную прочность. Сравнительный анализ результатов испытаний при эксплуатации лазерного оборудования двух типов показал эффективность использования лазера с функциональностью полировки и наноструктурирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наноструктурирование, субмикрощероховатость, стальные конструкции, полировка, адгезионная прочность, металлополимерный композит

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Щегольков Н.И., Комарова Л.Ю., Лисиенкова Л.Н., Будникова О.А., Варфаловская В.В., Цыбин А.И. Оценка адгезии защитных покрытий к линейным стальным конструкциям при воздействии лазерного наноструктурирования. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(5):518–529. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-5-518-529>. – EDN: IJFDZX.

Assessment of protective coatings adhesion on steel linear structures under laser nanostructuring

Nicita I. Shegolkov^{1*} , Lyudmila Yu. Komarova¹ , Lyubov N. Lisienkova² , Olga A. Budnikova³ ,
Victoria V. Varfalovskaya⁴ , Aleksandr I. Tsybin⁵ 

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

² National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

³ Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (First Cossack University), Moscow, Russia

⁴ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

⁵ LLC “Technovatsink”, Moscow, Russia

* Corresponding author: e-mail: shegolkovnicita@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Due to the extensive use of steel linear structures, the standards for the surface quality of pipelines used for oil fluid production have been increased. In this case, studies of the interfacial boundary during the application and bonding of protective coatings are the interesting subjects to do. Recent research describes the potential of laser nanostructuring for steel surface pretreatment prior to polymer layer application. The introduction of laser technology into industry requires not only research on surface properties, but also an evaluation of operational characteristics. Usually, the semi-quantitative criteria of mechanical strength of polymer bonding to metallic substrate is the adhesive strength. **Methods and Materials.** In this study, steel plates were used as a substrate for laser surface treatment with two pulsed ytterbium-doped fiber lasers. The polymer layer was based on epoxy-phenolic resin liquid paint. The liquid paint composition was applied via airless spraying. The curing process was carried out in a drying oven at 150 °C. **Results and Discussion.** In the process of the study, the surface of the metal plates was treated with laser irradiation to form nanostructures on the metallic surface. Following this treatment, increase in submicroscale surface roughness was up to 230–470% compared to the initial condition. Pull-of adhesion tests of polymer coating vary from 2.2 to 20.6 MPa. This depends on the type of laser irradiation and the type of equipment used. **Conclusion.** The test results demonstrated that the nanostructured surface facilitates the formation of an array of nano-scale asperities. This array enhances the adhesive bonding with the epoxy-phenolic polymer layer and, consequently, improves the adhesive strength. A comparative analysis of the test results obtained using two different types of laser equipment confirmed the effectiveness of a laser system to perform combined polishing and nanostructuring of the metallic surface.

KEYWORDS: Nanostructuring, Submicro-roughness, Steel structures, Polishing, Adhesive strength, Metal-polymer composite

FOR CITATION:

Shegolkov N.I., Komarova L.Yu., Lisienkova L.N., Budnikova O.A., Varfalovskaya V.V., Tsybin A.I. Assessment of protective coatings adhesion on steel linear structures under laser nanostructuring. *Nanotechnologies in construction*. 2025;17(5):518–529. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-5-518-529>. – EDN: IJFDZX.

ВВЕДЕНИЕ

Трубопроводы как линейные строительные сооружения в нефтегазовой отрасли являются ключевыми конструкциями, соединяя в себе функции добычи, транспортировки и хранения углеводородных ресурсов. Во всем мире растет спрос на использование подобных инженерно-строительных сооружений. Так как увеличивается объем эксплуатируемых трубопроводов, то есть потребность в оптимизации их проектирования, производства и эксплуатации [1, 2].

Наибольшее число трудностей при эксплуатации связано с коррозионным разрушением линейных строительных сооружений. Этот вид разрушений приводит к экономическим затратам на ремонт и об-

служивание в размере от 2 до 5% от ВВП для стран с развитой экономикой [3–5].

В связи с этим существует потребность в исследовании методов улучшения эксплуатационных качеств защитных покрытий на основе эпоксидных смол. В настоящей научной работе за изучаемый критерий выбраны микрошероховатость стальной поверхности и адгезионная прочность полимерного слоя к металлическому субстрату.

Формирование устойчивых адгезионных связей на границе раздела полимер-сталь требует образования наноразвитой площади поверхности субстрата. Данный процесс основан на удалении поверхностных загрязнений и формировании развитого микро-рельефа, оцениваемого шероховатостью. Степень развития микро-рельефа определяет площадь кон-

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

такта и величину химического и механического сцепления между полимерным покрытием и стальной пластиной, что является существенным фактором, влияющим на адгезионную прочность всей защитной системы в металлополимерных композиционных материалах [6–8].

Среди существующих методов подготовки стальной поверхности наибольшее распространение получила струйно-абразивная технология, осуществляемая с применением различных абразивных материалов. Как показывают исследования [9–11], данный метод обеспечивает формирование морфологии стальной поверхности с выраженным углубленным рельефом.

Несмотря на широкое применение, струйно-абразивная технология обладает рядом существенных ограничений, таких как: негативное влияние на окружающую среду, связанное с образованием абразивной пыли; низкая эффективность при обработке поверхностей со сложной геометрией; неоднородность деформации поверхности; зависимость от твердости и дисперсности абразивного материала [12, 13].

Перспективной альтернативой выступает лазерная обработка поверхности – технология, основанная на использовании высокоэнергетического лазерного излучения для одновременного удаления по-

верхностных загрязнений и формирования развитого микрорельефа вплоть до наноразмерного уровня. По сравнению с традиционными методами очистки стальной поверхности, ей свойственны следующие преимущества: экологическая безопасность, высокая точность управляемости и воспроизводимость результатов модификации, возможность обработки поверхностей со сложной геометрией.

Технология лазерной очистки основана на механизме фототермической абляции, при которой металлическая поверхность нагревается до температуры межфазного перехода с последующим частичным испарением поверхностного слоя. В процессе обработки наблюдаются три взаимосвязанных физических явления: локальное лазерное воздействие создает значительное термическое напряжение, одновременно с этим образуется плазменный шлейф, генерирующий зону высокого внутреннего давления, а циклические процессы нагрева и охлаждения способствуют структурной модификации поверхности (рис. 1) [14–18].

В научной литературе [19] рассматривается вопрос перспективности лазерной абляции в среде воздуха и воды. Результаты эксперимента демонстрируют, что наноструктурирование в водной среде способствует формированию поверхностей

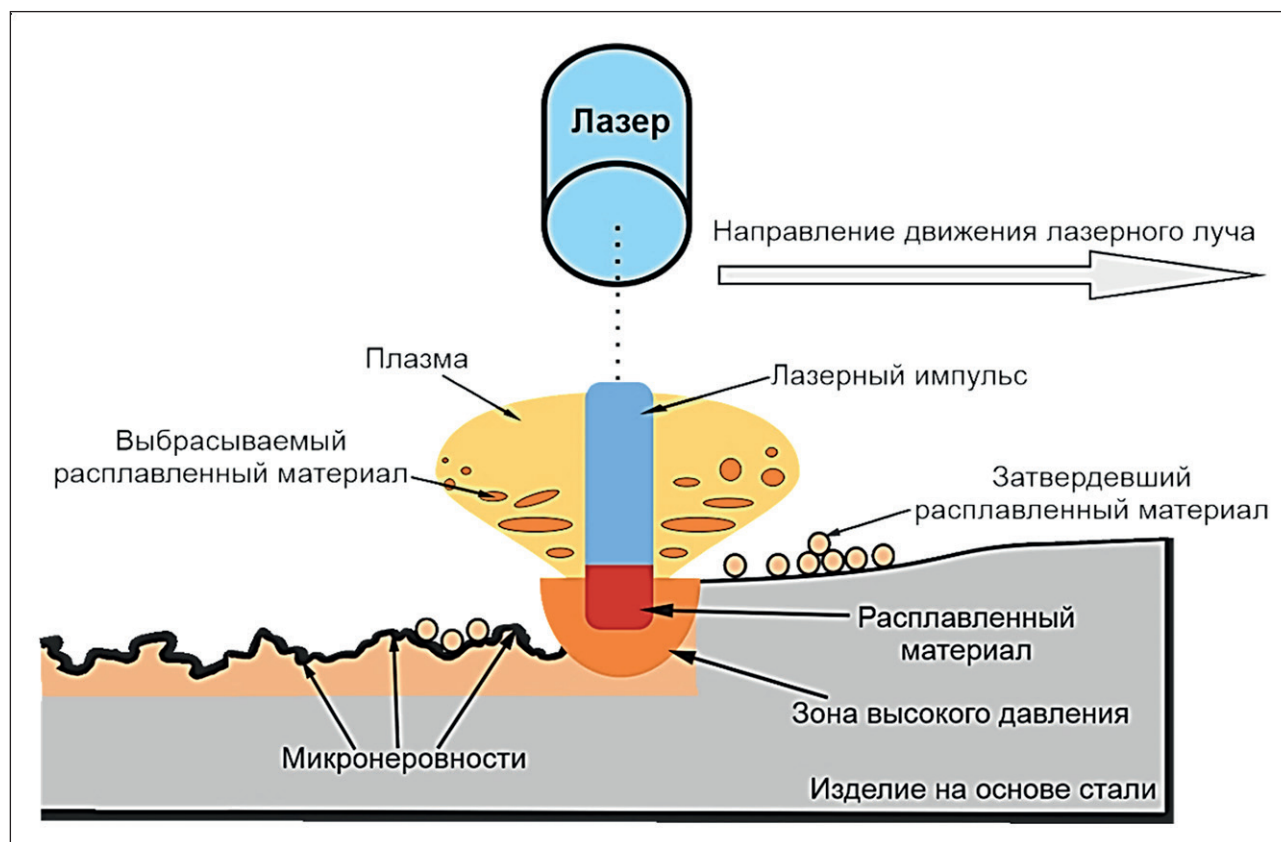


Рис. 1. Принцип работы лазерной абляции

со сложной морфологией, однако данный метод требует дополнительного изучения для оптимизации параметров обработки. В то же время подтверждена высокая эффективность лазерной абляции в воздушной среде, позволяющая создавать контролируемые нанотекстуры на стальных поверхностях.

Как отмечается в исследовании [20, 21], технология лазерной очистки демонстрирует высокую эффективность, однако авторы подчеркивают недостаточность данных о коррозионной стойкости модифицированных поверхностей в условиях агрессивных сред, например, в соленой воде при эксплуатации морского транспорта и при эксплуатации нефтепромысловых трубопроводов.

В исследовании [22] подтверждается эффективность очистки турбинных лопаток с помощью лазера, что позволило подготовить их поверхность без повреждения наноструктуры изделия. Это характеризует потенциал метода, сочетающего высокую эффективность и технологичность очистки с сохранением целостности материала.

В современной промышленности нашли применение два основных типа лазерного оборудования: установки для обработки поверхностей большой площади и специализированные аппараты для маркировки и текстурирования различных материалов.

Установки для очистки больших площадей характеризуются сравнительно низкой мощностью настройки лазерного излучателя, как правило, по следующим параметрам: мощность, частота излучения и скорость сканирования луча. С помощью подобного оборудования возможно реализовать процесс модификации стальной поверхности с высокой производительностью – до $10 \text{ см}^2/\text{с}$.

Лазерные установки для нанотекстурирования и маркировки характеризуются меньшей мощностью и компактной рабочей зоной. Они обеспечивают высокую степень гибкости в управлении параметрами лазерного излучения, включая точное позиционирование и траекторию движения лазерного пучка [23, 24].

В современных исследованиях [25–30] изучалось влияние настроек лазерного излучателя в процессе поверхностного нанотекстурирования на микрошероховатость, смачиваемость и химический состав поверхности субстрата после модификации, что напрямую влияет на адгезионную прочность полимерного слоя.

Исследователи применяют различные траектории лазера: концентрические восьмиугольные кольца, пересекающиеся эллипсы, упорядоченные кратерные массивы. Каждая из них формирует особую конфигурацию модификаций и зон плавления материала, что в итоге влияет на финальный микрорельеф стальной поверхности.

С увеличением степени перекрытия траекторий луча растет микрошероховатость, однако при чрезмерной степени перекрытия происходит избыточное испарение материала, что приводит к уменьшению степени развития нанорельефа.

Несмотря на детальную проработку вопросов формирования микрорельефа при лазерном наноструктурировании стальной поверхности, научно-информационный поиск позволил выявить отсутствие систематических данных, отображающих влияние лазерного текстурирования на адгезионную прочность полимерного слоя на основе эпоксидных смол как распространенного класса органических соединений, используемых для защиты металлоконструкций от коррозии.

Этот пробел обосновывает актуальность проведенного исследования, направленного на изучение возможности получения защитного полимерного покрытия с повышенной адгезионной прочностью при предварительной подготовке поверхности с использованием лазерного текстурирования.

Цель работы заключалась в исследовании влияния развитого микрорельефа, сформированного после процесса лазерного нанотекстурирования и оцениваемого шероховатостью, на адгезионную прочность полимерного слоя на основе эпоксидно-фенольных смол, сшитых отвердителем полиаминного типа.

В рамках настоящего исследования для оценки адгезионных свойств применялись две разновидности оптоволоконного иттербиевого лазера импульсного типа: промышленная установка для модификации больших площадей и лазерный маркер. Первый используется для изучения влияния лазерного текстурирования с высокой производительностью на образование адгезионных связей на контакте полимер-сталь. Второй вид оборудования позволяет получить наноструктурирование поверхности металла, что должно увеличивать адгезионную прочность при более длительном процессе модификации.

Тематика исследования актуальна, полученные результаты будут полезны при внедрении лазерной технологии модификации поверхности в производство металлополимерных конструкций.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве экспериментальных образцов были выбраны металлические пластины из стали марки «Ст20». Размер пластин: $100 \times 50 \times 3,9 \text{ мм}$.

Исходное состояние изучаемой поверхности относится к типу «А» согласно международному стандарту ISO 8501-1:2007.

В качестве полимерного антикоррозионного слоя использованы двухкомпонентные составы, состо-

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

ящие из основы – эпоксидно-фенольной смолы с функциональными наполнителями и отвердителя полиаминного типа, которые применяются для внутренней защиты труб, транспортирующих агрессивные и абразивные среды.

Для реализации процесса лазерного текстурирования стальной поверхности применялись две разновидности иттербиевого оптоволоконного лазера импульсного излучения. Длина волны излучателей составляет 1064 ± 5 нм.

Лазер № 1 представляет собой промышленную установку для модификации поверхности на больших площадях. Отличается высокой мощностью и ограниченной гибкостью регулировки параметров обработки. Данные особенности делают этот тип оборудования оптимальным вариантом для крупносерийного производства, где требуется обработка поверхностей со стандартными параметрами.

Лазерная система № 2 разработана для маркировки и получения наноструктурированных поверхностей с возможностью тонкой настройки всех параметров излучения. Она характеризуется меньшей мощностью и производительностью.

Характеристики лазерного оборудования представлены в табл. 1.

Каждым видом лазера было обработано по 10 пластин, для более детального изучения произведен отбор 4 образцов.

Для сравнения характеристик в испытаниях принимал участие контрольный образец без модификации поверхности.

Перед лазерной обработкой поверхности каждый образец проходил дополнительную стадию обезжиривания ультразвуком в ванне, наполненной химически чистым ацетоном, в течение 60 секунд.

Образцы № 1–4 модифицированы лазером № 1 при неизменных настройках излучателя:

- мощность излучения: 100 Вт;
- частота излучения: 100кГц;
- площадь лазерного пятна: 180 мм²;
- скорость сканирования: 2500 мм/с;
- длительность импульса: 100 нс.

Схема траектории лазерного пятна для лазера № 1 представлена на рис. 2.

Среднее время процесса модификации поверхности лазером № 1 составляло 16 секунд.

При наноструктурировании поверхности стальных пластин лазером № 2 были опробованы различные режимы модификации. При этом на всех режимах неизменной оставалась траектория лазерного луча, представленная на рис. 3.

Среднее время модификации поверхности лазером № 2 составило 220 секунд.

Ниже приведен алгоритм процесса нанотекстурирования поверхности стальных пластин лазерной системой № 2, а также настройки оборудования.

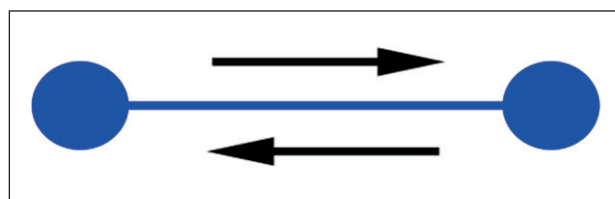


Рис. 2. Траектория движения луча лазера № 1

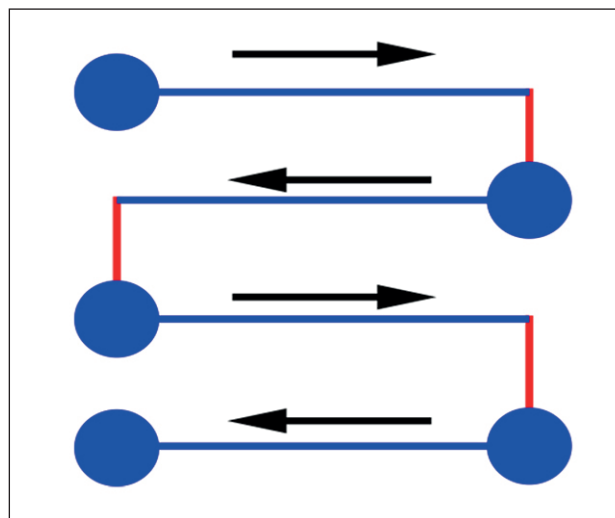


Рис. 3. Траектория движения луча лазера № 2

Таблица 1. Характеристики лазерных систем № 1 и № 2

Характеристика \ Лазер	Лазер № 1	Лазер № 2
Мощность, Вт	100	20
Частота излучения, кГц	100–500	1–4000
Длительность импульса, нс	100	2–350
Энергия импульса, мДж	1	До 4
Скорость сканирования, мм/с	2000–2500	до 8000

Образец № 5. Проведено формирование нанорельефа в виде сетчатой структуры. Три прохода лазером в одном направлении, затем три прохода во взаимно перпендикулярном направлении. Происходит движение луча параллельно граням пластины. Данный образец был нанотекстурирован с использованием параметров лазерного излучения, схожих с применяемыми для последующих экспериментальных поверхностей, что позволяет рассматривать его в качестве базового образца.

Параметры настройки излучателя:

- мощность излучения: 15 Вт;
- частота излучения: 20 кГц;
- площадь лазерного пятна: 0,03 мм²;
- скорость сканирования: 500 мм/с;
- длительность импульса: 200 нс;
- расстояние между линиями траектории: 0,5 мм.

Образец № 6. Настройки излучателя и алгоритм нанотекстурирования аналогичен базовому образцу. Дополнительно было произведено три прохода параллельно граням пластины, таким образом происходило формирование более высокоразвитой сетчатой наноструктуры. Настройки излучателя для дополнительных проходов отличались расстоянием между линиями траектории, которое составляло 0,02 мм.

Образец № 7. Формирование морфологии реализуется аналогично базовому образцу. Отличие заключается в том, что движение луча происходит по диагонали, то есть от одного до противоположного угла прямоугольной пластины.

Образец № 8. Создание структуры, аналогичной образцу № 7. Далее поверх сформированной сетчатой микроstructures был запущен процесс полировки для удаления остаточных загрязняющих соединений, характеризующийся следующими настройками излучателя:

- мощность излучения: 15 Вт;
- частота излучения: 300 кГц;
- площадь лазерного пятна: 0,03 мм²;
- скорость сканирования: 1000 мм/с;
- длительность импульса: 3 нс;
- расстояние между линиями траектории: 0,04 мм.

На каждой пластине после процесса модификации проводилась оценка микрошероховатости поверхности в пяти точках при помощи профилометра «Time Group Inc TR220». Базовая линия измерений составляла 0,8 мм. Результат зафиксирован в виде среднеарифметического значения для параметров R_z и R_a .

Нанесение защитного покрытия производилось на лабораторном оборудовании по принципу безвоздушного распыления, при котором жидкий полимерный состав разбивается в мелкий аэрозоль с помощью механического вращения распылителя, приводимого в движение воздушной турбиной.

Полимеризация защитного слоя происходила в сушильном шкафу с естественной конвекцией при температуре в 150 ± 5 °С в течение 60 минут.

Измерение толщины полимерного покрытия осуществлялось с помощью прибора измерения геометрических параметров «Константа К5». Средняя толщина защитного покрытия на образцах составила 170 ± 5 мкм и соответствует рекомендуемой величине, используемой для лакокрасочных покрытий с высоким сухим остатком.

Величина адгезионной прочности полимерного слоя определялась методом нормального отрыва грибка по ISO 4624:2002. На каждом образце стальной пластины с полимерным покрытием производилось два испытания для определения адгезионной прочности. За результат принималось среднее арифметическое всех измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внешний вид поверхности экспериментальных образцов до и после процесса нанотекстурирования представлен на рис. 4.

Исходное состояние стальной поверхности характеризуется наличием плотно прилегающей прокатной окалины и низким содержанием продуктов коррозии.

На поверхности стальной пластины, подвергнутой нанотекстурированию лазером № 1, наблюдается удаление местных очагов коррозионного процесса и образование неравномерной линейной микроstructures серого оттенка.

После процесса лазерного нанотекстурирования оборудованием № 2 зафиксировано устранение местных коррозионных участков, а также наличие однородной сетчатой микроstructures.

Более детальное рассмотрение и сравнение структуры поверхности после модификации при увеличении фотоснимков в 2,5 раза представлено на рис. 5.

Поверхность образцов, обработанных лазером № 2, приобрела коричнево-желтый оттенок, что, вероятно, связано с образованием оксидных соединений в процессе продолжительной абляции. С целью устранения данных продуктов окисления на образце № 8 была выполнена дополнительная лазерная полировка, результаты которой отображены на рис. 6.

На поверхности образца наблюдается полное удаление коричнево-желтых продуктов окисления, при этом обработанная наноструктурированная поверхность приобрела равномерный серый оттенок.

Исходные и сформированные микрошероховатости поверхности пластин после лазерной модификации отображены в табл. 2.

В среднем, высота неровностей профиля (R_z) увеличивается в 2,3 и в 4,7 раза для лазера № 1 и № 2 соответственно.

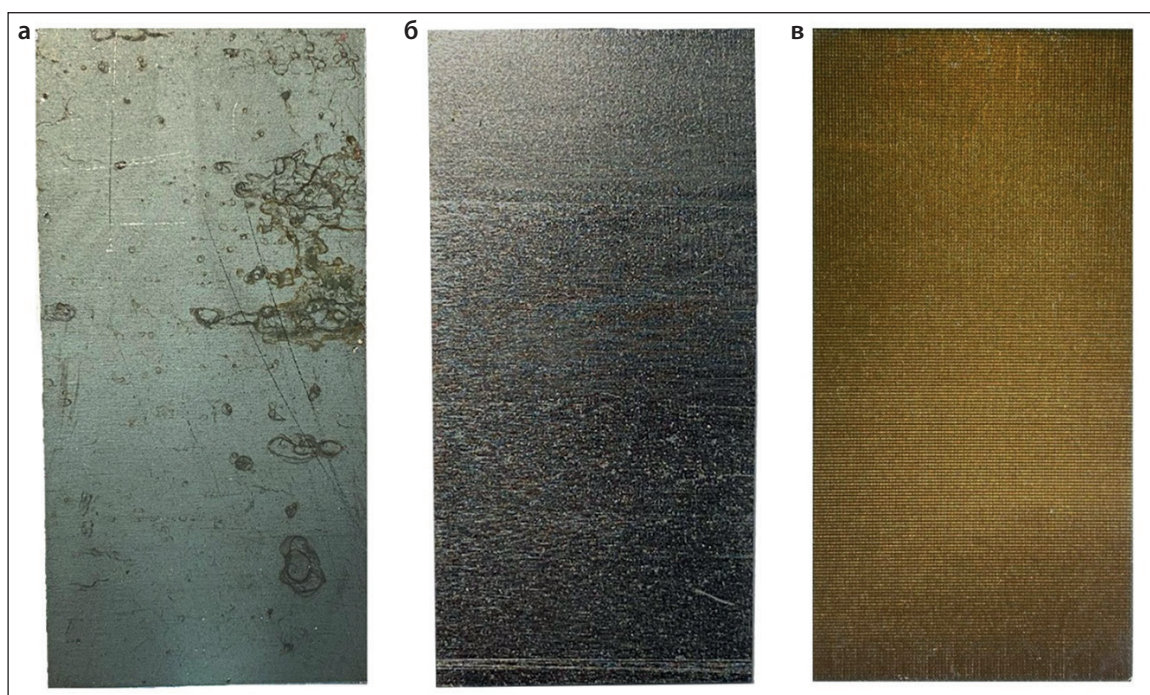


Рис. 4. Фотоснимки внешнего вида поверхности стальных пластин до и после процесса нанотекстурирования: а – без модификации; б – структурирование лазером № 1; в – структурирование лазером № 2

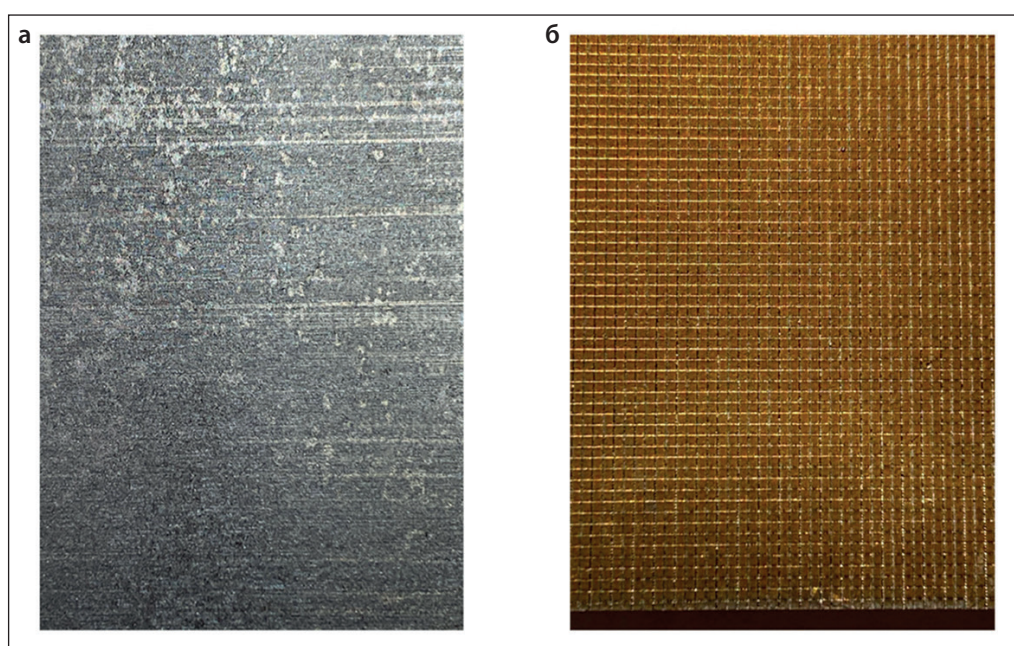


Рис. 5. Структура поверхности стальных пластин после модификации: а – структурирование лазером № 1; б – структурирование лазером № 2

Наблюдается увеличение среднего арифметического отклонения профиля (R_a) на 15,4% после текстурирования лазером № 1, тогда как прирост данного параметра для лазера № 2 составляет значительно больше 76,9%.

Стоит отдельно отметить результат оценки микрорельефа поверхности для образца № 8, подвергнутого дополнительному процессу полировки, микрошероховатость которого составила 13,9 мкм и 2,3 мкм по параметрам R_z и R_a соответственно. При

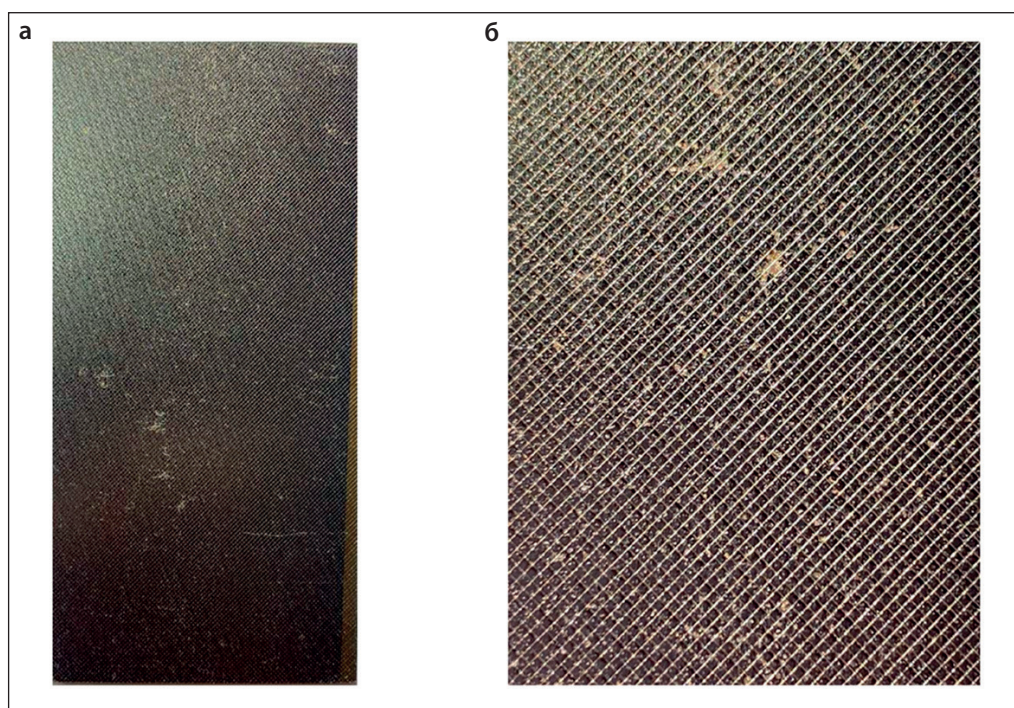


Рис. 6. Внешний вид и структура поверхности образца № 8 после дополнительного процесса лазерной полировки: а – общий вид поверхности образца; б – увеличен масштаб в 1,6 раза этой структуры поверхности

Таблица 2. Исходные и сформированные микрошероховатости поверхности субстрата после лазерной модификации

Лазер \ Шероховатость	R_z , мкм	R_a , мкм
Без модификации	3,1	1,3
Лазер № 1	7,2	1,5
Лазер № 2	14,7	2,3

этом базовый образец характеризуется значениями 13,6 и 1,8 мкм по аналогии.

Таким образом, процесс полировки не оказал существенного влияния на степень развития микро-рельефа. В то же время отсутствие окисного налета на наноструктурированной поверхности способствует увеличению площади и улучшению качества контакта полимер-сталь, что важно для продолжительности эксплуатации композитов.

Подобную разницу в степени развития микро-структуры поверхности субстрата можно объяснить различной интенсивностью излучения обоих лазеров, а также особенностью траектории движения лазерного пучка.

Интенсивность излучения характеризует плотность мощности на единицу площади лазерного луча. От ее величины зависит возможность оказывать влияние на нанорельеф стальной поверхности.

Согласно уравнению (1), интенсивность излучения лазера № 1 равна 0,5 Вт/мм², тогда как для лазера № 2 этот показатель достигает 500 Вт/мм². Несмотря на меньшую среднюю мощность системы № 2, ее высокая интенсивность обеспечивает глубокую и точную модификацию нанорельефа поверхности. Это же способствует увеличению времени обработки из-за малой площади лазерного пятна.

$$I = P/A, \quad (1)$$

где I – интенсивность лазерного излучения, Вт/мм²; P – мощность лазерного излучателя, Вт; A – площадь лазерного пятна, мм².

На рис. 7 представлена гистограмма со средними значениями адгезионной прочности полимерного слоя для рассматриваемых видов лазерных систем.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Наибольшая адгезионная прочность наблюдается на образцах стальных пластин, подвергнутых нанотекстурированию лазером № 2, и составляет 20 МПа. Этот параметр демонстрирует увеличение в 25 раз по сравнению с контрольным образцом.

Зафиксировано увеличение адгезионной прочности после модификации поверхности лазером № 1 в 2,7 раза.

На рис. 8 продемонстрирован характер повреждения покрытий методом нормального отрыва грибка при проведении испытания на определение адгезионной прочности.

При анализе характера отрыва грибков выявлено, что за счет малой степени развития микрорельефа поверхности на образце без модификации и после текстурирования лазером № 1 наблюдается доми-

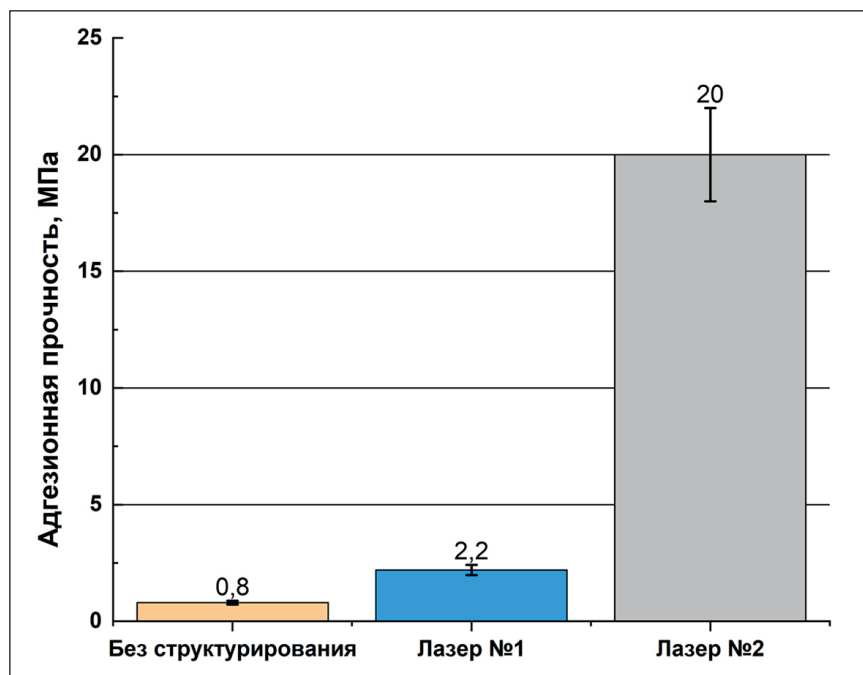


Рис. 7. Адгезионная прочность полимерного слоя к стальной поверхности

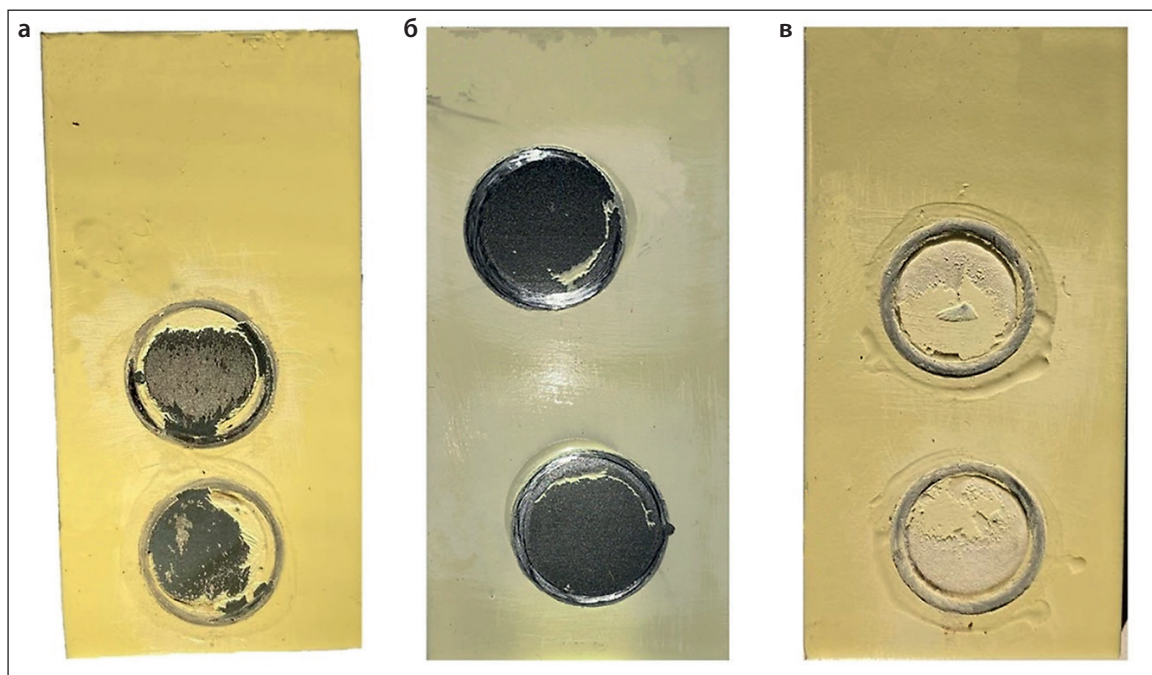


Рис. 8. Характер отрыва грибков при определении адгезионной прочности полимерного слоя: а – без модификации; б – структурирование лазером № 1; в – структурирование лазером № 2

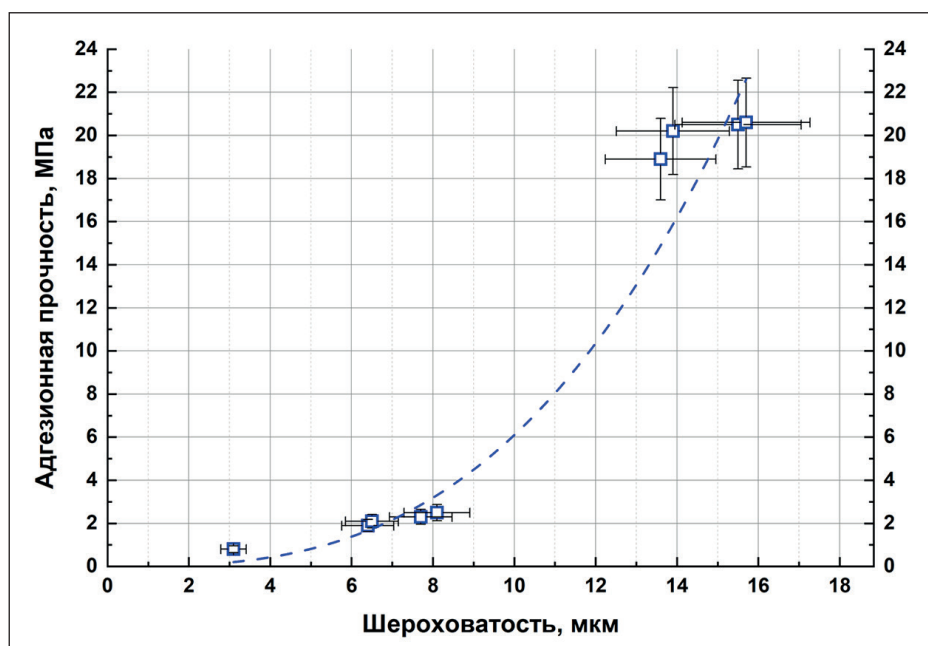


Рис. 9. Влияние микрошероховатости на адгезионную прочность полимерного слоя к стальной поверхности

нирование адгезионной составляющей разрушения межфазной границы.

У полимерного покрытия, сформированного на предварительно нанотекстурированной стальной поверхности лазером № 2, зафиксирован когезионный характер разрушения, что указывает на высокую степень химико-механического сцепления полимерного слоя на испытываемой площади контакта полимер-сталь.

Влияние микрошероховатости на адгезионную прочность полимерного слоя представлено на рис. 9.

Начальные показатели на графике соответствуют контрольному образцу без текстурирования со значениями 3,1 мкм и 0,8 МПа.

Точки на графике, расположенные в пределах микрошероховатости по параметру R_z от 6 до 9 мкм, соответствуют текстурированию лазером № 1. После структурирования лазером № 2 микрошероховатость на графике находится в интервале от 12 до 16 мкм.

Подобная разница в адгезионной прочности объясняется различием в степени разработанности субмикрошероховатости и, как следствие, формированием разной величины поверхностной энергии. Из уравнения (2) видно, что внутренняя энергия поверхностного слоя зависит от площади поверхности раздела фаз, то есть от площади контакта жидкого полимерного состава и микрорельефного состояния стальной поверхности.

$$U_s = \left[\sigma - T \left(\frac{d\sigma}{dT} \right) \right] \cdot S, \quad (2)$$

где σ – энергия образования единицы поверхности, Дж/м²; T – температура, К; $d\sigma/dT$ – температурный коэффициент, Дж/(м² · К); S – площадь поверхности раздела, м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (ВЫВОДЫ)

При реализации текстурирования металлической поверхности лазером № 1, предназначенным для работы с большими площадями, удалось удалить очаги коррозионных включений и достичь увеличения адгезионной прочности в 2,3 раза по сравнению с контрольным образцом.

После обработки поверхности лазером № 2 зафиксирована более тщательная очистка коррозионных участков и точечных дефектов с существенным развитием поверхностной наноструктурированной площади и увеличением параметра шероховатости в 4,7 раза по сравнению с контрольной пластиной. Такое повышение шероховатости приводит к формированию большего количества межмолекулярных связей, которое обеспечило 10-кратное увеличение адгезионной прочности по отношению к аналогичному параметру поверхности после обработки лазером № 1, что позволяет формировать прочное адгезионное взаимодействие полимерного слоя, обеспечивающего долгосрочную антикоррозионную защиту трубопроводным конструкциям.

Установлено, что дополнительный режим полировки для пластин, модифицированных лазером № 2, обладает преимуществом, выраженным в отсутствии коррозионных соединений металлов при сопоставимых величинах микрошероховатости и адгезионной прочности.

Результаты испытаний показали, что развитая текстура микрорельефа стальной поверхности влияет на адгезионную прочность полимерного эпоксидно-фенольного слоя, что позволяет утверждать о потенциальном увеличении срока безаварийной

эксплуатации защищенных металлических конструкций.

По результатам исследований сопоставлены две разновидности оптоволоконного иттербиевого лазера импульсного типа. Показано преимущество

использования лазера с функциональностью текстурирования и маркировки, который одновременно удаляет крепко связанную окалину и коррозионные микроотложения, а также обеспечивает формирование нанорельефа, увеличивая площадь поверхности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chen X., Wang M., Wang B., Hao H., Shi H., Wu Z., Chen J., Gai L., Tao H., Zhu B., Wang B. Energy Consumption Reduction and Sustainable Development for Oil & Gas Transport and Storage Engineering. *Energies*. 2023;16(4):1775. <https://doi.org/10.3390/en16041775>
2. Zheng X., Shi J., Cao G., Yang N., Cui M., Jia D., Liu H. Progress and Prospects of Oil and Gas Production Engineering Technology in China. *Petroleum Exploration and Development*. 2022;49(3):644–659. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60054-5](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60054-5)
3. Solovyeva V.A., Almuhammadi K.H., Badeghaish W.O. Current Downhole Corrosion Control Solutions and Trends in the Oil and Gas Industry: A Review. *Materials*. 2023;16(5):1795. <https://doi.org/10.3390/ma16051795>
4. Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Nazdracheva T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review. *Construction and Building Materials*. 2021;288:123115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123115>
5. Al-Janabi Y.T. An Overview of Corrosion in Oil and Gas Industry. *Corrosion Inhibitors in the Oil and Gas Industry*. 2020:1–39. <https://doi.org/10.1002/9783527822140.ch1>
6. Sadowski L., Kampa L., Chowanec A., Krolicka A. et al. Enhanced adhesive performance of epoxy resin coating by a novel bonding agent. *Construction and Building Materials*. 2021;301:124078. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124078>
7. Croll S.G. Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review. *Progress in Organic Coatings*. 2020;148:105847. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105847>
8. Van Dam J.P.B., Abrahams S.T., Yilmaz A., Gonzalez-Garcia Y. et al. Effect of surface roughness and chemistry on the adhesion and durability of a steel-epoxy adhesive interface. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020;96:102450. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102450>
9. Kim A., Kainuma S., Yang M. Surface Characteristics and Corrosion Behavior of Carbon Steel Treated by Abrasive Blasting. *Metals*. 2021;11(12):2065. <https://doi.org/10.3390/met11122065>
10. Bechikh A., Klinkova O., Maalej Y., Tawfiq I. et al. Sandblasting parameter variation effect on galvanized steel surface chemical composition, roughness and free energy. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020;102:102653. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102653>
11. Ganesh Kumar P., Prabakaran R., Sakthivadivel D., Thangapandian N., Velraj R., Kim S.C. Effect of Shot Blasting on Droplet Contact Angle of Carbon Aided Phase Change Nanocomposites. *Surface Engineering*. 2021:1–11. <https://doi.org/10.1080/002670844.2021.1873898>
12. Noraini Abdul Malek, Dzuraidah Abd Wahab, Zambri Harun, Nurhasyimah Abd Aziz et al. Assessing Cleaning in Remanufacturing: A Case Study of Shot Blasting Efficiency to Alternator Design. *Jurnal Kejuruteraan*. 2024;36(2):429–437. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(2\)-04](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(2)-04)
13. Basdeki M., Apostolopoulos C. The Effect of the Shot Blasting Process on the Dynamic Response of Steel Reinforcement. *Metals*. 2022;12(6):1048. <https://doi.org/10.3390/met12061048>
14. Cleaning Technology and Its Typical Applications in Industry. *Processes*. 2023;11(5):1445. <https://doi.org/10.3390/pr11051445>
15. Kumar V., Verma R., Kango S., Sharma V.S. Recent progresses and applications in Laser-based surface texturing systems. *Materials Today Communications*. 2020;26:101736. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101736>
16. Moldovan E.R., Concheso Doria C., Ocaña J.L., Baltés L.S. et al. Wettability and Surface Roughness Analysis of Laser Surface Texturing of AISI 430 Stainless Steel. *Materials*. 2022;15(8):2955. <https://doi.org/10.3390/ma15082955>
17. Min J., Wan H., Carlson B.E., Lin J. et al. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics and Laser Technology*. 2020;128:106188. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106188>
18. Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Laser Obtained Superhydrophobic State for Stainless Steel Corrosion Protection, a Review. *Coatings*. 2023;13(1):194. <https://doi.org/10.3390/coatings13010194>
19. Piccolo L., Wang Z., Lucchetta G., Shen M., Masato D. Ultrafast Laser Texturing of Stainless Steel in Water and Air Environment. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 2022;9:434–453. <https://doi.org/10.1007/s40516-022-00179-1>
20. Fan K., Shi Y., Xu Y., Wang S., Wang Q., Li Y., Zhang C., Li Z. Laser Cleaning Combined with Cladding Improves Cladding Quality for Repairing Steel Plates in Pressure Vessels. *Coatings*. 2024;14(4):508. <https://doi.org/10.3390/coatings14040508>
21. Caraguay S.J., Pereira T.S., Giacomelli R.O., Cunha A., Pereira M., Xavier F.A. The effect of laser surface textures on the corrosion resistance of epoxy coated steel exposed to aggressive environments for offshore applications. *Surface and Coatings Technology*. 2022;437:128371. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128371>

22. Zheleznov V.Yu., Malinsky T.V., Rogalin V.E., Khasaya R.R., Khomich Yu.V., Isakov V.V., Kozlov A.L., Novikov I.A., Nozhnitsky Yu.A., Shibaev S.A. Laser Technologies Accompanying Laser Impact Machining of Parts: Cleaning, Polishing, Surfacing (A Review). *Uspekhi Prikladnoi Fiziki*. 2023;11(4):340–355. <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2023-11-4-340-355>
23. Lazov L., Teirumnieks E., Karadzov T., Angelov N. Influence of power density and frequency of the process of laser marking of steel products. *Infrared Physics & Technology*. 2021;116:103783. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103783>
24. Konchus D.A., Pryakhin E.I., Sivenkov A.V. Structural variations on the surface of metallic products at laser marking. *CIS Iron and Steel Review*. 2021;22:96–101. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2021.02.18>
25. Lou D., Liang E., Chen P., Jiang G., Wang L., Guan L., Wang Y., Liu D. The Effect of Dimple Overlap on Wettability and Corrosion Resistance of Laser-Textured Stainless Steel. *Crystals*. 2022;12(5):695. <https://doi.org/10.3390/cryst12050695>
26. Henriksen N.G., Andersen O.Z., Jellesen M.S., Christiansen T.L., Somers M.A.J. Influence of Laser Marking on Microstructure and Corrosion Performance of Martensitic Stainless Steel Surfaces for Biomedical Applications. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*. 2022;77(3):177–196. <https://doi.org/10.1515/htm-2022-1010>
27. Henriksen N.G., Poullos K., Somers M.A.J., Christiansen T.L. Impact of laser marking on microstructure and fatigue life of medical grade titanium. *Materials Science & Engineering A*. 2023;873:145020. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145020>
28. Dong J., Liu Y., Pacella M. Surface Texturing and Wettability Modification by Nanosecond Pulse Laser Ablation of Stainless Steels. *Coatings*. 2024;14(4):467. <https://doi.org/10.3390/coatings14040467>
29. Liu Z., Niu T., Lei Y., Luo Y. Metal Surface Wettability Modification by Nanosecond Laser Surface Texturing: A Review. *Biosurface and Biotribology*. 2022;8(2):95–120. <https://doi.org/10.1049/bsb2.12039>
30. Zhang L., Tan Z., Zhang C., Tang J., Yao C., You X., Hao B. Research on Metal Corrosion Resistant Bioinspired Special Wetting Surface Based on Laser Texturing Technology: A Review. *Micromachines*. 2022;13(9):1431. <https://doi.org/10.3390/mi13091431>

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

Щегольков Никита Игоревич – аспирант кафедры инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, Москва, Россия, shegolkovnicita@yandex.ru, <http://orcid.org/0009-0002-5422-4061>

Комарова Людмила Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных материалов принтмедиаиндустрии, Московский политехнический университет, Москва, Россия, luknew@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3005-6411>

Лисиенкова Любовь Николаевна – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, LisienkovaLN@mgsu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0897-3387>

Будникова Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры графического дизайна, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского, Москва, Россия, boa333@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6099-8859>

Варфаловская Виктория Викторовна – кандидат экономических наук, доцент кафедры управления инновациями института технологий управления, «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия, varfalovski@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0237-1350>

Цыбин Александр Игоревич – кандидат химических наук, технический директор, ООО «Техновацинк», Москва, Россия, tsybin.a@tnzinc.ru, <https://orcid.org/0009-0008-0457-7460>

ВКЛАД АВТОРОВ

Щегольков Н.И. – проведение исследования, анализ результатов исследования; написание статьи.

Комарова Л.Ю. – разработка концепции и методологии исследования, составление итоговых выводов.

Лисиенкова Л.Н. – литературный обзор; теоретический анализ.

Будникова О.А. – подготовка и написание текста раздела «Методы и материалы»; обработка данных.

Варфаловская В.В. – участие в разработке методологии исследования; доработка текста.

Цыбин А.И. – осуществление общего научного руководства; визуализация экспериментальных данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.09.2025; одобрена после рецензирования 29.09.2025; принята к публикации 06.10.2025.