

Оригинальное исследование

УДК 667.622.1

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_161

EDN: CTNHLX

Исследование антикоррозионных свойств эпоксидного покрытия, армированного графеном

А.В. Иванов¹, Т.Р. Майгельдинов², В.В. Ваганов²¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия;² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Развитие антикоррозионных покрытий для морского судостроения остается важной задачей из-за агрессивного воздействия соленой воды и атмосферных факторов. Традиционные эпоксидные покрытия обладают хорошей адгезией и химической стойкостью, но их защитные свойства могут быть улучшены за счет модификации наноматериалами. Графен, благодаря уникальной структуре и барьерным свойствам, представляет собой перспективную добавку для повышения коррозионной стойкости и механической прочности полимерных покрытий.

Цель работы. Исследование направлено на изучение влияния графенового порошка на структуру, антикоррозионные свойства и адгезионную прочность эпоксидных покрытий. Особое внимание уделено оптимизации концентрации графена для достижения максимального защитного эффекта.

Материалы и методы. Графеновый порошок был получен методом жидкофазного отслаивания графита с последующей сублимационной сушкой, что позволило сохранить его структуру. Эпоксидные покрытия модифицировали графеном в концентрациях 0,0125, 0,025 и 0,05 мас. %. Для оценки защитных свойств проводились испытания в камере солевого тумана, а структура покрытий анализировалась с помощью микроскопических методов.

Результаты. Эксперименты показали, что введение графена снижает количество поверхностных микропор и улучшает структуру покрытия. Наибольшая коррозионная стойкость достигнута при содержании графена 0,025 мас. %, что связано с его равномерной дисперсией в полимерной матрице и эффективным взаимодействием с эпоксидным связующим.

Заключение. Исследование подтвердило, что добавление графена в эпоксидные покрытия значительно повышает их антикоррозионные свойства и адгезионную прочность. Оптимальная концентрация графена (0,025 мас. %) позволяет создавать материалы, перспективные для применения в морском судостроении и других областях, требующих повышенной защиты от коррозии.

Ключевые слова: графен; эпоксидное порошковое покрытие; антикоррозионное покрытие; прочность сцепления; наночастица.

Как цитировать

Иванов А.В., Майгельдинов Т.Р., Ваганов В.В. Исследование антикоррозионных свойств эпоксидного покрытия, армированного графеном // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 161–168. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_161 EDN: CTNHLX

Original study article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_161

EDN: CTNHLX

Corrosion-Resisting Properties of Graphene-Reinforced Epoxy Coating

Alexander V. Ivanov¹, Timur R. Maigeldinov², Vyacheslav V. Vaganov²¹ Saint Petersburg State Maritime Technical University, Saint Petersburg, Russia;² Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The development of anti-corrosion coatings for marine applications is still important due to corrosion caused by salt water and weather factors. Conventional epoxy coatings have good adhesion and chemical resistance, but their protective properties can be improved by nano-based modification. Due to its unique structure and barrier properties, graphene is a promising additive to increase the corrosion resistance and mechanical strength of polymer coatings.

AIM: This study aims to investigate the influence of graphene powder on the structure, corrosion resistance properties, and adhesive strength of epoxy coatings. It is focused on optimization of graphene concentration to achieve the best possible protective effect.

METHODS: Graphene powder was produced by liquid-phase exfoliation of graphite followed by its sublimation dehydration allowing to preserve its structure. Epoxy coatings were modified with 0.0125, 0.025 and 0.05 wt% of graphene. To determine the protective properties, the coatings were tested in a salt spray chamber; the coating structure was analyzed using microscopic methods.

RESULTS: Experiments showed that the introduced graphene reduces the number of surface micropores and improves the coating structure. The highest corrosion resistance was achieved with graphene concentration of 0.025 wt%, which is associated with its uniform dispersion in the polymer matrix and effective interaction with the epoxy binder.

CONCLUSION: The study showed that adding graphene to epoxy coatings significantly improves their corrosion-resisting properties and adhesive strength. The optimum concentration of graphene (0.025 wt%) allows to create promising materials for marine shipbuilding and other applications requiring increased corrosion protection.

Keywords: graphene; epoxy powder coating; anti-corrosion coating; adhesion strength; nanoparticle.

To cite this article

Ivanov AV, Maigeldinov TR, Vaganov VV. Corrosion-Resisting Properties of Graphene-Reinforced Epoxy Coating. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):161–168. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_161 EDN: CTNHLX

ВВЕДЕНИЕ

Коррозия металлов ежегодно наносит ущерб экономике, а также инфраструктуре, что приводит к тому, что научное сообщество разрабатывает и совершенствует методы защиты металлов от этого деструктивного процесса. Особую актуальность эта проблема приобретает в отрасли, где металлоконструкции подвергаются длительному воздействию агрессивных факторов климата, таких как влажность и экстремальные температуры. Например, в морском судостроении повышение износоустойчивости и коррозионной стойкости является одной из главных задач, а именно необходимостью эксплуатации судов в условиях северных широт, где к стандартным коррозионным процессам приводит воздействие низких температур.

На сегодняшний день одной из наиболее простых и доступных технологий создания металлических конструкций из металла является барьерное покрытие, которое изолирует поверхность металла от внешней среды. В широком диапазоне методов защиты органические покрытия достигаются благодаря своей гибкости, универсальности и, возможно, тонким свойствам их свойств в определенных условиях эксплуатации. Такие покрытия могут использоваться в различных понятиях, включая морскую, строительную, автомобильную и авиационную отрасли, что делает их универсальным методом для расширения.

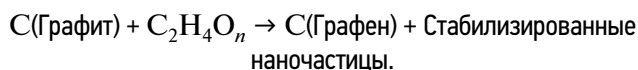
Среди различных полимеров для органических покрытий эпоксидные смолы, разновидность термоактивных полимеров, выделяются своей технологичностью, исключительной механической прочностью и высокой адгезионной прочностью [1]. Однако эксплуатационные характеристики эпоксидных антикоррозионных покрытий всегда снижаются из-за присущих им недостатков, поскольку неполная сшивка между молекулами эпоксидной смолы и отвердителя в сочетании с низкой устойчивостью к распространению трещин всегда вызывают структурные дефекты, такие как поры, полости и трещины в матрице покрытия, образуя пути диффузии агрессивных сред к металлу, что создает серьезную проблему для эпоксидных покрытий, обеспечивающих долговременную защиту от коррозии. С этой целью добавление нанонаполнителей оказывается эффективным для улучшения антикоррозионных характеристик [2]. Таким образом, комбинирование традиционных эпоксидных материалов с нанотехнологиями открывает перспективы для создания более эффективных защитных систем. Это направление уже сейчас активно развивается, предлагая решения для самых сложных задач, связанных с защитой металлов от коррозии, и предполагает ещё больший прогресс в будущем, что позволит значительно снизить материальные и экологические потери от коррозии.

ОПИСАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАФЕНА

Углеродные наноматериалы, такие как фуллерены, углеродные нанотрубки и графен, благодаря своей уникальной атомарной стадии и физико-химическим свойствам, становятся все более популярными в качестве компонентов для модификации нанокомпозитов. Их основные преимущества включают большую площадь поверхности, механическую прочность, легкость, а также способность взаимодействовать с полимерными матрицами на молекулярном уровне. Одним из наиболее важных свойств этих наноматериалов является их способность улучшать свойства материалов даже при низком энергопотреблении (менее 1 мас. %), что позволяет сохранять легкую прочность конечного материала и минимизировать негативное влияние [3].

Графен, как один из представителей углеродных наноматериалов, выделяется среди других благодаря своей двумерной плоской стадии, которая придает ему уникальные свойства. Высокая механическая прочность, достигаемая показателей порядка 130 ГПа, большая площадь поверхности (до 2630 м²/г), отличная теплопроводность и электрическая проводимость делают графен универсальным нанонаполнителем для создания высокоэффективных композитов. Особенно важны его функции в открытой атмосфере, где графеновые свойства позволяют создавать физический барьер и обеспечивают извилистость путей диффузии агрессивных сред, таких как кислород, влага и ионы хлора. Эти свойства значительно повышают характеристики покрытий, что приводит к коррозионным процессам и снижению рисков.

В данном исследовании выбран экологически чистый метод получения графена путем отслаивания графита в водно-этанольном растворе поливинилового спирта (ПВС), где молекулы ПВС были адсорбированы на графене, чтобы действовать как стабилизаторы против агломерации за счет пространственного отталкивания. Процесс можно описать следующей реакцией:



Были исследованы антикоррозионные свойства, а также адгезионная прочность готовых покрытий, результаты показали, что очень небольшое добавление 0,025 мас. % графена значительно улучшило коррозионную стойкость, а также адгезионную прочность эпоксидного порошкового покрытия.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ГРАФЕНА В ПОРОШКОВОМ ПОКРЫТИИ

Подложки из стальной пластины были обезжирены спиртом для удаления загрязнений и масел с поверхности. Подготовленный порошок графена был равномерно

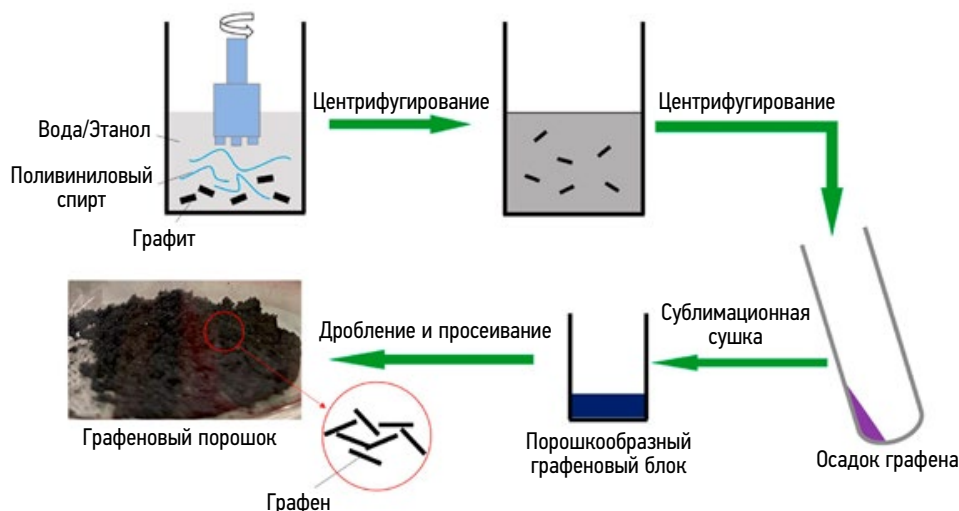
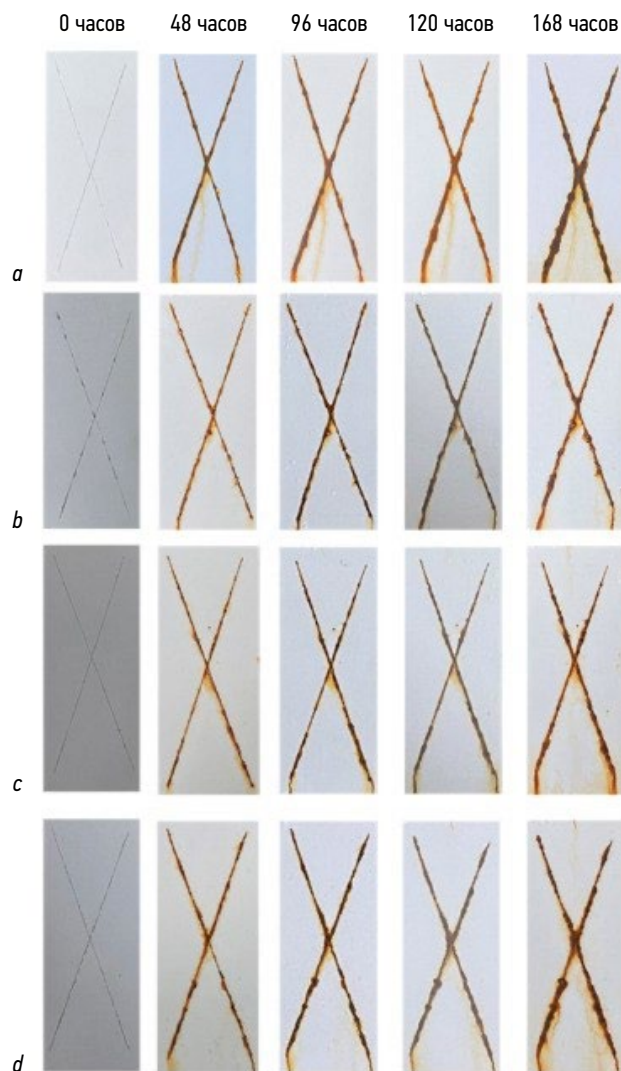


Рис. 1. Изготовление графенового порошка.

Fig. 1. Production of graphene powder.

Рис. 2. Фотографии образцов (a) EP, (b) Gr_{0,0125 %}/EP, (c) Gr_{0,025 %}/EP и (d) Gr_{0,05 %}/EP при испытании в солевом тумане в течение разных часов.Fig. 2. Photographs of samples (a) EP; (b) Gr_{0.0125 %}/EP; (c) Gr_{0.025 %}/EP, and (d) Gr_{0.05 %}/EP tested by salt spray with different test duration.

смешан с эпоксидным порошком путем механического перемешивания. После этого однородная порошковая смесь была нанесена на поверхность стальной пластины посредством электростатического распыления с последующим отверждением в печи при 180 °C в течение 10 минут. Чистое эпоксидное порошковое покрытие и эпоксидные порошковые покрытия, содержащие 0,0125, 0,025 и 0,05 мас. % графенового порошка, были сокращенно обозначены как EP, Gr_{0,0125 %}/EP, Gr_{0,025 %}/EP, Gr_{0,05 %}/EP соответственно.

В качестве метода оценки процесса коррозии стальных подложек, защищенных покрытиями в чрезвычайно суровых условиях, было проведено испытание в солевом тумане, при котором все образцы покрытия были поцарапаны и помещены в 5%-ный раствор NaCl в солевом тестере [4]. Были зафиксированы условия коррозии различных образцов покрытия после нескольких часов, и фотографии показаны на рис. 2. В поцарапанной области покрытия стальная подложка подвергалась воздействию коррозионной среды, где коррозионные агенты могли быстро достичь подложки, инициируя процесс коррозии. Между тем, коррозионные агенты в поцарапанной и открытой области будут диффундировать вдоль интерфейса покрытие-металл в области с обеих сторон под покрытием, которые затем также будут подвергаться коррозии, вызывая накопление большего количества продуктов коррозии в царапинах. В результате все образцы были заржавевшими в царапинах после помещения в испытательную установку для солевого тумана на 48, 96, 120 и 168 часов, в то время как образец EP более явно заржавел в царапине и представлял собой кучу ржавчины, накапливающуюся особенно после 168 часов воздействия, сообщая, что стальная подложка под покрытием была сильно корродирована из-за слабой коррозионной стойкости. Результат испытания в солевом тумане показал, что графен улучшил барьерные свойства покрытия не только для защиты от коррозионных агентов

от металлической подложки, но и для замедления распространения коррозии вдоль интерфейса покрытие-металл, а покрытие Gr_{0,025 %} / EP с меньшим количеством продуктов коррозии в царапине по сравнению с другими образцами покрытий показало его самые высокие барьерные свойства для защиты от коррозии.

АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА

Высокая прочность сцепления с металлической подложкой остается одним из традиционных свойств, определяющих способность покрытия обеспечивать длительную и надёжную защиту от агрессивных сред. Адгезионная прочность рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{адг}} = \frac{F_{\text{отрыв}}}{A_{\text{контакт}}},$$

где $\sigma_{\text{адг}}$ — адгезионная прочность, $F_{\text{отрыв}}$ — сила отрыва, $A_{\text{контакт}}$ — площадь контакта.

Долговечность покрытия зависит от его способности прочно удерживаться на подложке, подвергаться механическим нагрузкам и предотвращать образование пустот или трещин, способствующих проникновению агрессивных агентов. Именно поэтому исследования, направленные на изучение и улучшение адгезионных характеристик покрытий, играют главную роль в разработке современных защитных материалов.

В данном случае прочность сцепления различных типов покрытий с металлической подложкой измерялась с использованием метода испытаний на отрыв. В начальных испытаниях, где покрытия были проанализированы в исходном, нетронутом состоянии, все покрытия включали чистое эпоксидное покрытие (EP) и модифицированные графеном покрытия (Gr 0,0125 % / EP, Gr 0,025 % / EP, Gr 0,05 % / EP), продемонстрированы общие показатели прочности сцепления, достигавшие порядка 4 МПа,

как показано на рис. 3, а. Эти результаты соответствуют высоким адгезионным характеристикам эпоксидных смол, которые обуславливают их химический климат. Эпоксидные смолы содержат активные полярные группы, способные образовывать прочные химические вещества и физические связи с металлической подложкой, что обеспечивает эффективное прилипание покрытия к субстрату.

Однако, как показано на рис. 3, б затронутая динамика сцепления значительно изменилась при испытаниях в условиях, моделирующих воздействие агрессивной среды. Для изучения поведения покрытого долгого контакта с коррозионными агентами все переносились в камеру с повторным соляным туманом в течение 240 часов, после чего проводится тест на отрыв. В этих условиях была обнаружена разница в степени ослабления и сохранения адгезионной прочности в различных образцах [5].

Наибольшую степень повреждения показало чистое эпоксидное покрытие (EP). После воздействия в условиях соляного тумана его адгезионная прочность заметно снизилась, площадь отслоения от подложки увеличилась. Результатом такого воздействия является ослабление структуры покрытия из-за проникновения солевого раствора по путям, образовавшимся в микродефектах, трещинах и порах, неизбежно возникающих в процессе эксплуатации. Слабая барьерная защита покрытия EP привела к быстрому повреждению интерфейса «покрытие-металл», что, в свою очередь, вызвало интенсивное разрушение в зоне контакта с металлической подложкой [6].

В отличие от чистого эпоксидного покрытия, покрытия, модифицированные графеном, показали лучшие характеристики. Графен, благодаря двумерной площади и высокой площади, включает функцию армирования наполнителя, которая усиливает адгезионные и барьерные свойства покрытия. Особенно выделяется образец Gr 0,025 % / EP, который показал значительную адгезионную прочность даже после 240 часов воздействия

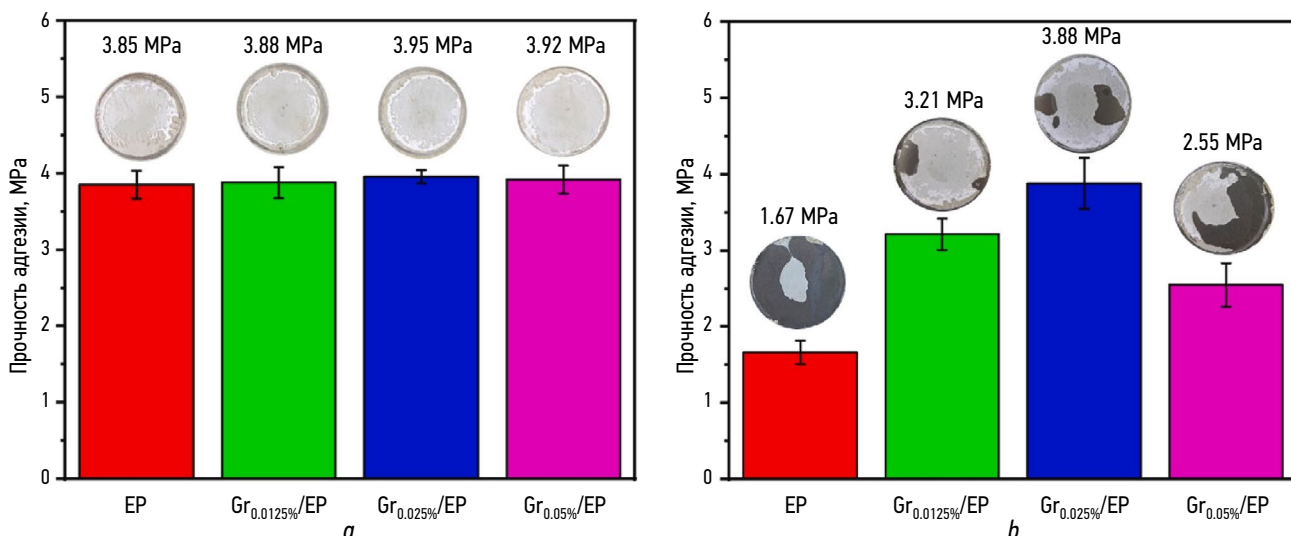


Рис. 3. Прочность сцепления и фотографии образцов покрытий после испытания на отрыв (а) до и (б) после испытания в соляном тумане в течение 240 ч.

Fig. 3. Adhesion strength and photographs of coating samples after peel test (a) before and (b) after 240-hour salt spray test.

агрессивной среды. Его прочность сцепления составила 3,88 МПа, что практически сравнимо с показателями исходного состояния покрытия. Небольшое снижение адгезионных характеристик сопровождалось умеренной степенью отслоения, что свидетельствует о лучшей стойкости данных покрытий к воздействию.

Успешные результаты покрытия Gr 0,025 % /EP объясняются ограничением содержания графенового порошка, что обеспечивает максимальный эффект структуры покрытия, не нарушая его технологические характеристики [7]. Частицы графена, распределённые в полимерной матрице, образуют трещину и минимизируют проникновение агрессивных веществ в подложку. Благодаря этим свойствам графен также обеспечивает более равномерное распределение напряжений на границах «металлического покрытия», предотвращающее механическое разрушение.

Таким образом, экспериментальные данные подтвердили, что добавление графена в небольших количествах (около 0,025 мас. %) значительно повышает адгезионные и антикоррозионные свойства эпоксидных покрытий. Этот результат подчёркивает перспективность графенового наполнителя для создания высокоэффективных защитных покрытий, способных успешно поддерживать длительное воздействие агрессивных сред.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании была проведена комплексная оценка использования графенового порошка в составе эпоксидных порошковых покрытий для улучшения их антикоррозионных и адгезионных характеристик. Полученные результаты используют потенциал графена в качестве инновационного нанонаполнителя для защитных покрытий.

Одним из ключевых достижений работы стало определение оптимальных условий предотвращения дисперсии графена методом высокосдвигового отслаивания. Установлено, что использование водно-этанольного раствора в объемном соотношении 6:4 в составе поливинилового спирта (ПВС) в качестве стабилизатора позволяет получать графен с высокой степенью диспергирования и стойкостью к агломерации. Это открывает широкие перспективы для метода масштабирования и его применения в производстве.

Композитные покрытия Gr/EP показали улучшенные антикоррозионные и адгезионные свойства по сравнению с чистым эпоксидным покрытием. Испытания в соляном тумане подтвердили, что добавление графена может создать барьерную защиту покрытия, замедляя процесс установки металлической подложки и тем самым проникая в агрессивные вещества. Электрохимические измерения, что покрытие Gr 0,025 % /EP устойчиво устойчиво к защите от покрытия: его сопротивление выше порядка, чем у чистого эпоксидного покрытия, даже после длительного возгорания.

Кроме того, покрытия Gr/EP улучшают механические характеристики. Испытания на прочность сцепления показали, что графен эффективно влияет на степень отслоения покрытия после длительного пребывания в агрессивной среде. Наибольшая прочность адгезии до 3,88 МПа у покрытий Gr 0,025 % /EP обеспечивает его возможность надежно сохранять связь с металлической подложкой даже в экстремальных условиях.

Таким образом, результаты исследования доказывают, что использование графена в составе эпоксидных порошковых покрытий обеспечивает комплексное улучшение их свойств. Улучшение антикоррозионных свойств можно описать следующим уравнением:

$$R_{\text{корр}} = R_0 \times e^{-k \cdot C_{\text{графен}}},$$

где $R_{\text{корр}}$ — сопротивление коррозии, R_0 — начальное сопротивление коррозии без графена, k — коэффициент, зависящий от свойств графена, $C_{\text{графен}}$ — концентрация графена.

Покрытие Gr 0,025 % /EP, содержащее допустимое количество графена, показало уменьшение характеристик, сочетание превосходной антикоррозионной стойкости, использования и механической прочности.

Полученные данные подчеркивают перспективность применения графена в качестве нанонаполнителя для создания устойчивых защитных механизмов, что особенно актуально в таких отраслях, как судостроение, нефтегазовая промышленность и энергетика, где металлические конструкции подвергаются интенсивным воздействиям агрессивных сред. Последующие исследования должны быть продолжены. Они будут нести в себе комплексные исследования других параметров эксплуатации, таких как температурная стойкость и совместимость с различными подложками, а также по разработке гибридных материалов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: А.В. Иванов — концепция и дизайн исследования; В.В. Ваганов — составление плана проведения исследования; Т.Р. Майгельдинов — сбор и обработка материалов.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Author contributions. All authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication. Personal contribution: A.V. Ivanov: conceptualization, methodology; V.V. Vaganov: methodology; T.R. Maigeldinov: data curation, formal analysis.

Funding sources. The authors declare no external funding was received for conducting the study.

Disclosure of interests. The authors have no explicit or potential conflicts of interest associated with the publication of this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стукач А.В. Изменение эксплуатационных свойств резины под действием температуры // Труды СПбГМТУ. 2024. № 1. С. 126–132. EDN: YTNRVC
2. Ваганов В.В., Ваганов Г.В. Наноматериалы и нанотехнологии в полиграфии: монография. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. ISBN: 978-5-7422-6471-2 EDN: YZPMMP
3. Маркевич И.Е., Ваганов В.В. Исследование преимуществ красок с добавлением нанопигментов для цифровой печати. В кн.: Полиграфия: технология, оборудование, материалы. IX Международная научно-практическая конференция. Омск, 2018. С. 101–107. EDN: XRGDHF
4. Бельский Д.И., Балаханов Д.М., Добровольский В.И., Магомедов Т.М. Метрологическое обеспечение испытаний фильтров и фильтрующих. В кн.: Метрология физико-химических измерений. Материалы III Международной научно-технической конференции. Морозовка, 2019. С. 121–134.
5. Калиниченко М.Л., Долгий Л.П. Испытания на условный сдвиг и отрыв замкнутых конструкций. В кн.: Беларусь-Китай: контуры инновационно-технологического сотрудничества: сборник материалов научно-практической конференции. Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». Минск: БНТУ, 2023. С. 82–83. EDN: FWYZAU
6. Иванов А.В., Петров, С.Н. Нанотехнологии в защите от коррозии: монография. Москва: Наука, 2021.
7. Сидоров В.И., Кузнецов Д.А. Графен и его применение в композиционных материалах: монография. Санкт-Петербург: Химия, 2020.
8. Блинов Л.Н., Иванов А.В. Физико-химические основы полиграфического производства. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2010. ISBN: 978-5-7422-2875-2 EDN: UNQDWF

REFERENCES

1. Stukach AV. Changes in the performance properties of rubber under the influence of temperature. *Trudy SPbGMTU*. 2024;1:126–132. (In Russ.) EDN: YTNRVC
2. Vaganov VV, Vaganov GV. *Nanomaterials and nanotechnology in printing*. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekh. un-ta; 2019. (In Russ.) ISBN: 978-5-7422-6471-2 EDN: YZPMMP
3. Markevich IE, Vaganov VV. Issledovanie preimushchestv krasok s dobavleniem nanopigmentov dlya cifrovoy pechati. In: *Printing: technology, equipment, materials*. IH International scientific and practical conference. Omsk; 2018:101–107. (In Russ.) EDN: XRGDHF
4. Belen'kij DI, Balahanov DM, Dobrovol'skij VI, Magomedov TM. Metrological safety of filters and flow filtrates. In: *Metrology of physical and chemical measurements. Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference*. Morozovka; 2019:121–134. (In Russ.)
5. Kalinichenko ML, Dolgij LP. Experiments on the smooth movement and attempts of closed structures. In: *Belarus-China: outlines of innovative-technological cooperation: collection of materials from a scientific-practical conference. Republican Innovative Unitary Enterprise "Scientific-Technological Park BNTU" «Politekhnik»*. Minsk: BNTU; 2023:82–83. (In Russ.) EDN: FWYZAU
6. Ivanov AV, Petrov SN. *Nanotechnology in corrosion protection*. Moscow: Nauka, 2021. (In Russ.)
7. Sidorov VI, Kuznetsov DA. *Graphene and its application in composite materials*. Saint Petersburg: Himiya; 2020. (In Russ.)
8. Blinov LN, Ivanov AV. *Physicochemical foundations of printing production*. Saint Petersburg; St. Petersburg State Polytechnical University; 2010. (In Russ.) ISBN: 978-5-7422-2875-2 EDN: UNQDWF

ОБ АВТОРАХ

***Тимур Рушанович Майгельдинов**, магистрант высшей школы автоматизации и робототехники, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет имени Петра Великого; адрес: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29; e-mail: maygeldinov@gmail.com

AUTHORS' INFO

***Timur R. Maygeldinov**, Master's student of the Higher School of Automation and Robotics, Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University; address: 29 Polytechnic str., Saint Petersburg, 195251, Russia; e-mail: maygeldinov@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Вячеслав Владимирович Ваганов, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент высшей школы автоматизации и робототехники, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет имени Петра Великого; eLibrary SPIN: 8051-7768; e-mail: prvaganov_spb@mail.ru

Александр Васильевич Иванов, д-р техн. наук, директор издательства, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: iptranspb@gmail.com

Vyacheslav V. Vaganov, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Associate Professor of the Higher School of Automation and Robotics, Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University; eLibrary SPIN: 8051-7768; e-mail: prvaganov_spb@mail.ru

Alexander V. Ivanov, Dr. Sci. (Engineering), Director of Publishing House, Saint Petersburg State Marine Technical University; e-mail: iptranspb@gmail.com