

Научно-исследовательский журнал «Chemical Bulletin»

<https://cb-journal.ru>

2025, Том 8, № 1 / 2025, Vol. 8, Iss. 1 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 669.017

DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-1-2

Обзор защиты от коррозии с помощью нанонитей TiO₂ и нанотрубок БТА/TiO₂, диспергированных в эпоксидной смоле, и предлагаемый метод получения антикоррозионного покрытия из этого материала с помощью ультразвука

¹ Ву Ван Зунг*,

¹ Нигметзянов Р.И.,

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет «МАДИ»,

* Ответственный автор E-mail: vandungph2605@gmail.com

Аннотация: в данном обзоре рассматривается коррозионная стойкость эпоксидных покрытий, содержащих нанонити TiO₂ и модифицированные нанонити TiO₂, обработанные БТА (бензотриазолом). Целью исследования является изучение того, насколько эффективно эти материалы защищают от коррозии металлические поверхности в различных средах. Синтез нанонитей TiO₂ и нанотрубок БТА/TiO₂ в эпоксидных покрытиях предлагает многообещающий подход к значительному повышению коррозионной стойкости, а также открывает значительный потенциал для применения в отраслях, требующих высокой прочности и защиты материалов.

Ключевые слова: БТА (бензотриазол), нанонити TiO₂, нанотрубки БТА/TiO₂, коррозионная стойкость, эпоксидные покрытия/мембраны

Для цитирования: Ву Ван Зунг, Нигметзянов Р.И. Обзор защиты от коррозии с помощью нанонитей TiO₂ и нанотрубок БТА/TiO₂, диспергированных в эпоксидной смоле, и предлагаемый метод получения антикоррозионного покрытия из этого материала с помощью ультразвука // Chemical Bulletin. 2025. Том 8. № 1. 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-1-2

Поступила в редакцию: 10 ноября 2024 г.; Одобрена после рецензирования: 7 февраля 2025 г.; Принята к публикации: 3 марта 2025 г.

The Review of corrosion protection by nanotubes TiO₂ and BTA/TiO₂ nanotubes dispersed in Epoxy and proposed method for preparation of anti-corrosion coating from this material assisted by ultrasound

¹ Vu Van Zung*,

¹ Nigmatzyanov R.I.,

¹ Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI),

* Corresponding author E-mail: vandungph2605@gmail.com

Abstract: this review presents the corrosion resistance of epoxy coatings containing TiO₂ nanotubes and BTA (benzotriazole)-modified TiO₂ nanotubes. The purpose of the study is to examine how effectively these materials protect against corrosion on metal surfaces in various environments. The synthesis of TiO₂ nanotubes and BTA/TiO₂ nanotubes in epoxy coatings offers a promising approach to significantly enhance corrosion resistance while also opening considerable potential for applications in industries requiring high durability and material protection.

Keywords: BTA (benzotriazole), TiO₂ nanotubes, BTA/TiO₂ nanotubes, corrosion resistance, epoxy coatings/membranes

For citation: Vu Van Zung, Nigmatzyanov R.I. The Review of corrosion protection by nanotubes TiO₂ and BTA/TiO₂ nanotubes dispersed in Epoxy and proposed method for preparation of anti-corrosion coating from this material assisted by ultrasound. Chemical Bulletin. 2025. 8 (1). 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-1-2

The article was submitted: November 10, 2024; Approved after reviewing: February 7, 2025; Accepted for publication: March 23, 2025.

Введение

В данном обзоре рассматривается коррозионная стойкость эпоксидных покрытий, содержащих нанонити TiO₂ и модифицированные нанонити TiO₂, обработанные БТА (бензотриазолом). Целью исследования является изучение того, насколько эффективно эти материалы защищают от коррозии металлические поверхности в различных средах. Синтез нанонитей TiO₂ и нанотрубок БТА/TiO₂ в эпоксидных покрытиях предлагает многообещающий подход к значительному повышению коррозионной стойкости, а также открывает значительный потенциал для применения в отраслях, требующих высокой прочности и защиты материалов.

Коррозия металлов в большинстве случаев происходит в результате электрохимических

реакций на границе раздела металл-электролит. Такие реакции могут наблюдаться, например, при наличии влаги на поверхности металла (атмосферная коррозия) или влажного бетона (коррозия арматурных стержней в бетоне). Скорость коррозии определяется балансом между анодными и катодными реакциями. В анодной реакции металл подвергается окислению с высвобождением электронов, тогда как в катодной реакции растворённые вещества (например, O₂ или H⁺) восстанавливаются, потребляя электроны. Когда анодные и катодные процессы достигают равновесия, поток электронов стабилизируется, и чистый электрический ток отсутствует. Подобные реакции могут происходить как на поверхности одного металла, так и между двумя различными металлами.

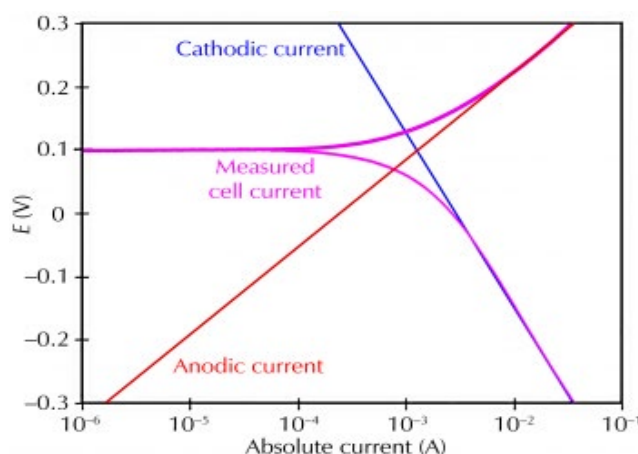


Рис. 1. Процесс коррозии, показывающий анодные и катодные компоненты тока.

Fig. 1. The corrosion process showing the anodic and cathodic current components.

Эпоксидные смолы выступают в качестве полимерной матрицы благодаря их превосходной термической стабильности, устойчивости к воздействию окружающей среды, а также высоким механическим, химическим и электрическим характеристикам [1-5]. Несмотря на то что органические покрытия создают барьер для диффузии коррозионных агентов, они имеют ряд недостатков, таких как гидролитическая деградация и образование дефектов в процессе

отверждения, что приводит к сокращению срока службы покрытия [6-8]. Одним из подходов к улучшению свойств эпоксидных смол является добавление наполнителей в полимерную матрицу без ухудшения гибкости покрытия.

Материалы и методы исследований

Кроме того, использование нанонаполнителей в полимерной матрице позволяет преодолеть недостатки покрытия за счёт улучшения его способности препятствовать диффузии, заполне-

ния пор, мелких трещин и дефектов в органической матрице [13-16]. Многочисленные исследования показали, что наполнители нанометрового размера, включая как неорганические, так и органические материалы, являются одним из эффективных решений для усиления эпоксидной сети [9-12]. Однако степень улучшения свойств эпоксидной смолы в значительной степени зависит от массового соотношения, типов и характеристик наполнителей. Поэтому важно тщательно выбирать наполнители, чтобы достичь оптимальной производительности и минимизировать негативное влияние на эффективность защиты эпоксидного покрытия от коррозии.

Эпоксидное/титановое покрытие

Исследования неорганических наноматериалов показали заметное различие в сопротивлении коррозии между полимерными покрытиями, содержащими неорганические наноматериалы, и традиционными полимерными покрытиями. Наночастицы TiO_2 считаются перспективными кандидатами благодаря своим исключительным свойствам, таким как химическая стойкость, оптическая стабильность, эффекты защиты от ультрафиолетового излучения и доступность прекурсоров. Исследования показали, что дисперсия наночастиц TiO_2 в полимерной матрице улучшает свойства покрытия, включая стойкость к абразивному износу, твердость и прочность, при этом значительно снижая водонепроницаемость [17].

Эксперименты, исследующие коррозионные свойства композитных покрытий TiO_2 /полипирилл с использованием метода потери

массы и испытаний на соляном тумане [18], показали улучшенную стойкость к коррозии. Результаты свидетельствуют о том, что повышенная коррозионная стойкость покрытий в присутствии наночастиц TiO_2 обусловлена барьерными свойствами пигмента, которые препятствуют проникновению коррозионных агентов из воздуха в покрытие.

Другие исследования подчеркнули значительное улучшение стойкости к коррозии эпоксидных покрытий при добавлении наночастиц TiO_2 [30], а также их внедрении в эпоксидную матрицу [19-20]. Однако дисперсия наночастиц TiO_2 в полимерной сети также является важным фактором. Зоны, где наночастицы локально агломерируются, демонстрируют заметно сниженную стойкость к коррозии. По мере уменьшения размера частиц достижение эффективной дисперсии становится более сложным из-за высокой поверхностной энергии частиц, что способствует агрегации наночастиц.

Результаты и обсуждения

Защитное покрытие с титановыми нанонитями и нанотрубками ВТА/ TiO_2

Самовосстанавливающиеся покрытия были впервые предложены в 2001 году Уайт и соавторами, используя органические или неорганические контейнеры, играющие ключевую роль в функциональности умных покрытий [29]. Механизмы активации самовосстановления включают физические, экологические, химические или электрохимические факторы, такие как вода, pH, металлы, механическое повреждение, температура, сигналы или биологические организмы.

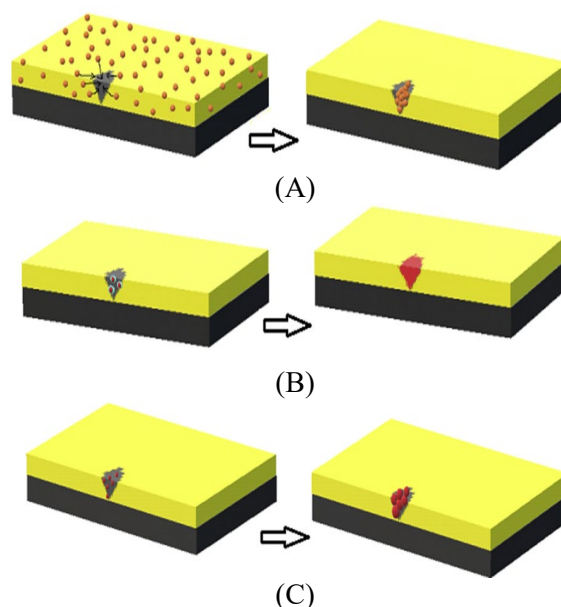


Рис. 2. Самовосстановление с помощью (A) авто-сборки, (B) контейнера с ингибитором и (C) набухания.
Fig. 2. Self-healing using (A) auto-assembly, (B) inhibitor container and (C) swelling.

Новый подход к улучшению производительности наночастиц TiO_2 в полимерных покрытиях заключается в улучшении морфологии через титановые нанотрубки. Благодаря своей большой

площади поверхности, трубчатая структура TiO_2 обеспечивает превосходную химическую стабильность по сравнению с наночастицами TiO_2 [21-22].

Сравнительный анализ защитных механизмов TiO_2 -содержащих покрытий.

Таблица 1

Table 1

Comparative analysis of protective mechanisms of TiO_2 -containing coatings.

Тип покрытия	Механизм защиты	Особенности функционирования	Преимущества
Нанонити TiO_2 в эпоксидной матрице	Пассивная барьерная защита	Создание физического барьера против коррозионных агентов	Улучшенная химическая стабильность, высокая площадь поверхности
Нанотрубки БТА/ TiO_2	Активная самовосстанавливающаяся защита	Контролируемое высвобождение ингибитора при низких pH	Селективное высвобождение ингибитора, enhanced защита в агрессивных средах
Гибридное покрытие (нанонити + БТА)	Комбинированная защита	Синергетический эф	

Активные методы защиты от коррозии часто включают добавление ингибиторов коррозии в защитные покрытия для снижения скорости коррозии по мере того, как пассивный барьер разрушается. Ранее хроматные соли, такие как хромат и дихромат, были популярны благодаря своей высокой эффективности. Однако, из-за их токсичности и экологической опасности, хроматные соли были запрещены в 2006 году Законом о защите окружающей среды ЕС, Директивой по ограничению опасных веществ (RoHS) и Агентством по охране окружающей среды США (EPA). Экологически чистые органические ингибиторы коррозии рассматриваются как эффективная альтернатива.

Однако растворимость этих ингибиторов должна быть тщательно контролируемой, так как как низкая, так и высокая растворимость могут снизить защитные свойства и ухудшить характеристики покрытия [26-27]. Предложенное решение – это инкапсуляция ингибиторов в контейнерах, чтобы предотвратить прямое взаимодействие с покрытием, обеспечив тем самым сохранение эффективности и стабильности.

В модели, предложенной Аруном Чандром К. и коллегами [28], когда поверхность металла подвергается коррозии, ингибитор коррозии высвобождается из наноконтейнеров и мигрирует в поврежденную область, чтобы восстановить и защитить поверхность.

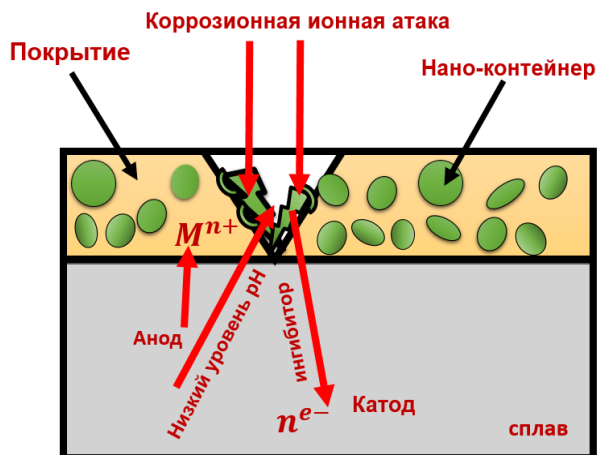


Рис. 3. Миграция ингибитора коррозии для защиты металлической поверхности [28].

Fig. 3. Migration of corrosion inhibitor for protection of metal surface [28].

Самовосстанавливающиеся покрытия, стойкие к коррозии, на основе титановых нанотрубок были изучены и предложены [23]. В этом исследовании титановыми нанотрубками синтезировались и загружались ингибитором коррозии бензотриазолом (БТА). Нанотрубки с ингибитором коррозии равномерно распределялись в пассивном барьерном покрытии из силан-титания. Было исследовано контролируемое и непрерывное

высвобождение ингибитора коррозии из титановых нанотрубок в средах с различными значениями pH, что показало более высокую скорость высвобождения при низких значениях pH [30]. Это демонстрирует, что титаны нанотрубки являются высокоэффективным материалом для хранения и высвобождения ингибиторов по мере необходимости [30].

А) Сравнительный анализ характеристик защитных покрытий

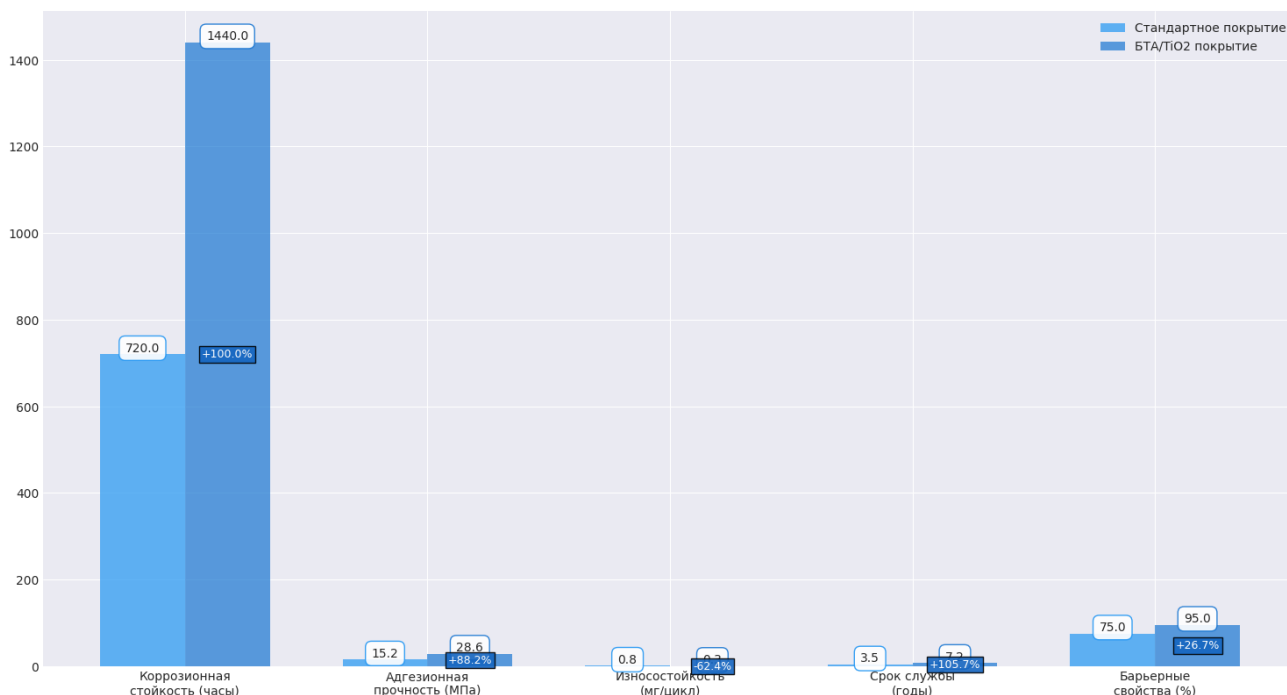


Рис. 4. Анализ эффективности антикоррозионных покрытий с использованием нанотрубок БТА/TiO₂.

Fig. 4. Analysis of the effectiveness of anti-corrosion coatings using BTA/TiO₂ nanotubes.

Таблица 2

Технологические параметры ультразвукового метода нанесения защитных покрытий.

Table 2

Technological parameters of the ultrasonic method of applying protective coatings.

Этап процесса	Технологические параметры	Достижимый эффект
Подготовка поверхности	Очистка, обезжиривание, шершавление	Оптимальная адгезия покрытия
Приготовление смеси	Смешивание эпоксидной смолы, отвердителя и нано-наполнителей	Улучшенная долговечность и износостойкость
Ультразвуковая обработка	Кавитационное воздействие на смесь	Равномерное распределение наполнителя, разрушение агломератов
Нанесение покрытия	Распыление, нанесение кистью или погружение с УЗ воздействием	Увеличение проникновения, равномерное покрытие
Отверждение	Контролируемые температурные условия	Оптимальные

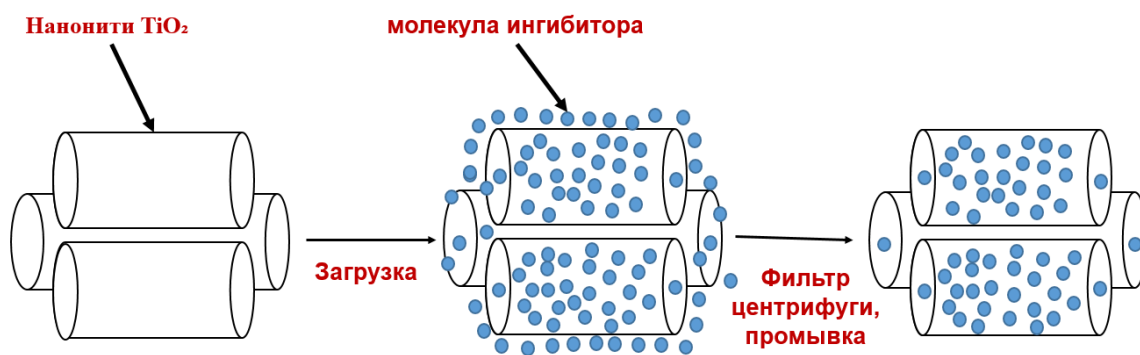


Рис. 5. Схематическое изображение процесса загрузки ингибитора в нано-контейнер TiO₂.

Fig. 5. Schematic representation of the process of loading the inhibitor into the TiO₂ nano-container.

Слияние нанонитей TiO₂, загруженных ингибитором, в гибридные покрытия на основе сол-геля значительно улучшает стойкость металлических сплавов к коррозии, защищая их от окисления, образования ржавчины и химической деградации. Особенно важно, что загрузка БТА в нанонити, а не прямое его смешивание с гибридным покрытием на основе сол-геля, предотвращает нежелательные взаимодействия [31] между БТА и сетью сол-геля, что оптимизирует антикоррозионные свойства покрытия.

Метод с ультразвуковым воздействием для антикоррозионных эпоксидных покрытий

Метод ультразвукового воздействия применяется для диспергирования нанонитей TiO₂ и БТА/TiO₂ нанотрубок в эпоксидной смоле, что улучшает однородность и повышает эффективность покрытия [24]. Ультразвуковые волны создают кавитационные эффекты, разрушая агломераты частиц и обеспечивая равномерное распределение нанотрубок в полимерной матрице. Этот процесс не только усиливает защитные свойства покрытия, но и минимизирует дефекты поверхности металлического подложки, улучшая адгезию между покрытием и подложкой [25].

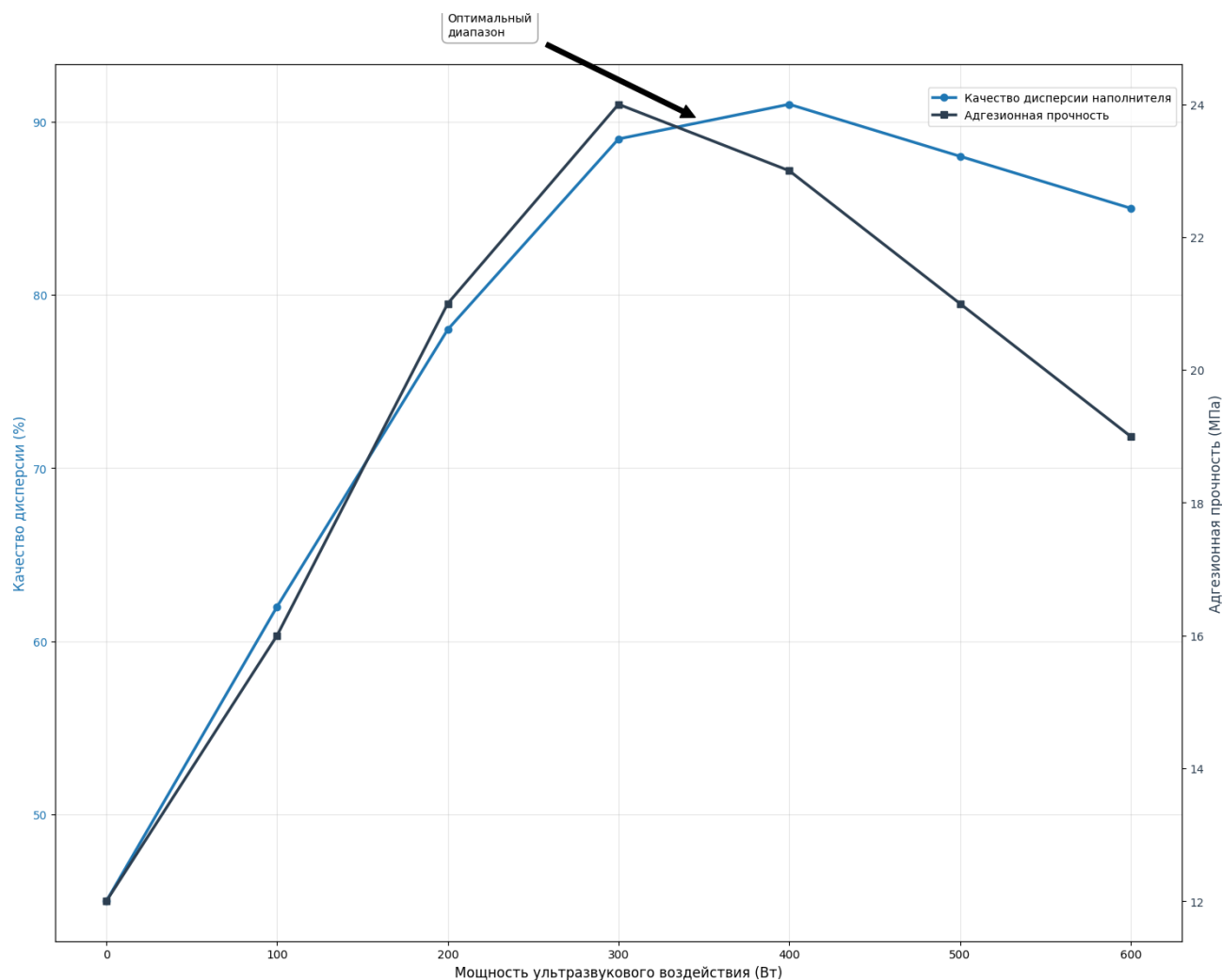


Рис. 6. Влияние технологических параметров ультразвуковой обработки на свойства БТА/TiO₂ покрытий.
Fig. 6. Influence of technological parameters of ultrasonic treatment on the properties of BTA/TiO₂ coatings.

Кроме того, ультразвуковой метод способствует созданию гладких эпоксидных покрытий, значительно улучшая стойкость к абразивному износу и коррозии. Эта перспективная техника открывает возможности для применения в различных отраслях, включая защиту металлических поверхностей, нефтегазовую промышленность и другие экстремальные условия. Улучшая долговечность материалов и оптимизируя их производительность, данный метод также способствует снижению затрат и повышению качества продукции.

Процесс нанесения покрытия начинается с подготовки металлической поверхности, которая включает очистку, обезжиривание и шершавление для обеспечения оптимальной адгезии. Очистка и обезжиривание удаляют примеси и загрязнения, в то время как шершавление создает микрорельефную поверхность, которая улучшает сцепление между металлом и покрытием. Эпоксидная смесь, состоящая из смолы,

отвердителя и нано-наполнителей, тщательно подготавливается для достижения требуемых свойств, таких как улучшенная долговечность и стойкость к износу. Ультразвуковое оборудование используется для равномерного распределения нано-наполнителя в полимерной матрице, разрушая агломераты частиц и обеспечивая однородную смесь. Этот этап улучшает консистенцию и характеристики конечного покрытия. Подготовленная эпоксидная смесь затем наносится на металлическую поверхность с использованием методов распыления, нанесения кистью или погружения. Во время нанесения ультразвуковые колебания способствуют увеличению проникновения и обеспечению равномерного покрытия поверхности. После этого покрытие отверждается в контролируемых температурных условиях, чтобы оно затвердело и приобрело оптимальные механические и химические свойства. Этот процесс отверждения является необходимым для обеспечения

долговременной защиты покрытия от износа, коррозии [30] и других экологических факторов, тем самым улучшая долговечность и срок службы металлической поверхности.

Выводы

Этот обзор демонстрирует, что внедрение титановых нанонитей и модифицированных бензотриазолом (БТА) титановыми нанотрубками в эпоксидные покрытия может значительно повысить стойкость к коррозии. Структура титановых нанотрубок с большой площадью поверхности и превосходной химической стабильностью улучшает защитные свойства

покрытия. Сочетание с БТА способствует контролируемому высвобождению ингибитора коррозии, особенно в средах с низким pH. Для равномерного распределения нанотрубок в эпоксидной смоле был использован ультразвук, что улучшает однородность, адгезию и уменьшает дефекты поверхности металла. Результаты показывают, что эпоксидные покрытия, содержащие нанонитей TiO₂ и БТА/TiO₂ нанотрубки, обладают высоким потенциалом для защиты металлов от коррозии, предлагая перспективные приложения в отраслях, требующих материалов с отличной долговечностью и защитой.

Финансирование

Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № FFSM-2024-0001

Список источников

1. Lin J., Ottenbrite R.M. Surface modification of inorganic oxide particles with silane coupling agent and organic dyes // *Polym Adv Technol*. 2001. Vol. 12. № 5. P. 285 – 292. <https://doi.org/10.1002/pat.64>
2. Tsai C.C., Teng H. Regulation of the physical characteristics of titania nanotube aggregates synthesized from hydrothermal treatment // *Chemistry of Materials*. 2004. Vol. 16. № 22. P. 4352 – 4358. <https://doi.org/10.1021/cm049643u>
3. Kim J.Y., Sekino T., Park D.J., Tanaka S.I. Morphology modification of TiO₂ nanotubes by controlling the starting material crystallite size for chemical synthesis // *Journal of Nanoparticle Research*. 2011. Vol. 13. P. 2319 – 2327. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-9990-6>
4. Chen Quan, Yakovlev N.L. Adsorption and interaction of organosilanes on TiO₂ nanoparticles // *Applied Surface Science*. 2010. Vol. 257. № 5. P. 1395 – 1400. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.08.036>
5. Kasuga T., Hiramatsu M., Hoson A., Sekino T., Niihara K. Titania nanotubes prepared by chemical processing // *Advanced materials*. 1999. Vol. 11. № 15. P. 1307 – 1311. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(199910\)11:15<1307::AID-ADMA1307>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(199910)11:15<1307::AID-ADMA1307>3.0.CO;2-H)
6. Shen M., Almallahi R., Rizvi Z., Gonzalez-Martinez E., Yang G., Robertson M.L. Accelerated hydrolytic degradation of ester-containing biobased epoxy resins // *Polymer Chemistry*. 2019. Vol. 10. № 23. P. 3217 – 3229. <https://doi.org/10.1039/C9PY00240E>
7. Njoku D.I., Cui M., Xiao H., Shang B., Li Y. Understanding the anticorrosive protective mechanisms of modified epoxy coatings with improved barrier, active and self-healing functionalities: EIS and spectroscopic techniques // *Scientific reports*. 2017. Vol. 7. № 1. P. 15597. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15845-0>
8. Atta A.M., El-Saeed A.M., El-Mahdy G.M., Al-Lohedan H.A. Application of magnetite nano-hybrid epoxy as protective marine coatings for steel // *RSC advances*. 2015. Vol. 5. № 123. P. 101923 – 101931. [\[https://doi.org/10.1039/C5RA20730D\]](https://doi.org/10.1039/C5RA20730D)
9. Wang C., Mao H., Wang C., Fu S. Dispersibility and hydrophobicity analysis of titanium dioxide nanoparticles grafted with silane coupling agent // *Industrial & engineering chemistry research*. 2011. Vol. 50. № 21. P. 11930 – 11934. <https://doi.org/10.1021/ie200887x>
10. Lenz D.M., Delamar M., Ferreira C.A. Application of polypyrrole/TiO₂ composite films as corrosion protection of mild steel // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2003. Vol. 540. P. 35 – 44. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(02\)01272-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(02)01272-X)
11. Kobayashi K., Takewaka K. Experimental studies on epoxy coated reinforcing steel for corrosion protection // *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1984. Vol. 6. № 2. P. 99 – 116. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(84\)90039-3](https://doi.org/10.1016/0262-5075(84)90039-3)
12. Reeta Gupta, Subhash Chandra Evaluation of acoustical characteristics of ultrasonic transducer backing materials at high hydrostatic pressures // *Ultrasonics*. 1998. Vol. 36. № 1-5. P. 37 – 40. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00153-4](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00153-4)

13. Palanivelu, Saravanan, Duraibabu Dhanapal, Ananda Kumar Srinivasan Palanivelu. Studies on silicon containing nanohybrid epoxy coatings for the protection of corrosion and bio-fouling on mild steel // *Silicon*. 2017. Vol. 9. № 3. P. 447 – 458. <https://doi.org/10.1007/s12633-014-9202-6>
14. Pour Z.S., Ghaemy M., Bordbar S., Karimi-Maleh H. Effects of surface treatment of TiO₂ nanoparticles on the adhesion and anticorrosion properties of the epoxy coating on mild steel using electrochemical technique // *Progress in Organic Coatings*. – 2018. –Vol.119. P. 99 – 108. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.02.01>
15. Rahmani Pooria, Akbar Shojaei, Nahid Pirhady Tavandashti Nanodiamond loaded with corrosion inhibitor as efficient nanocarrier to improve anticorrosion behavior of epoxy coating // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020. Vol. 83. P. 153 – 163. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.11.023>
16. Aboorvakani R., John S. Kennady Vethanathan, Madhu K.U. Aboorvakani. Influence of Zn concentration on zinc oxide nanoparticles and their anti-corrosion property // *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 834. P. 155078. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155078>
17. Fadl A.M., Abdou M.I., Al-Elaa S.A., Hamza M.A., Sadeek S.A. Fadl. Evaluation the anti-corrosion behavior, impact resistance, acids and alkali immovability of nonylphenol ethoxylate/TiO₂ hybrid epoxy nanocomposite coating applied on the carbon steel surface // *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 136. P. 105263. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105263>
18. Lenz Denise M., Michel Delamar, Carlos A. Ferreira Lenz. Application of polypyrrole/TiO₂ composite films as corrosion protection of mild steel // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2003. Vol. 540. P. 35 – 44. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(02\)01272-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(02)01272-X)
19. Shen G.X., Chen Y.C., Lin C.J. Corrosion protection of 316 L stainless steel by a TiO₂ nanoparticle coating prepared by sol-gel method // *Thin Solid Films*. 2005. Vol. 489. № 1-2. P. 130 – 136. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.05.016>
20. Mahulikar Pramod P., Rajendra S. Jadhav, Dilip G. Hundiware. Performance of polyaniline/TiO₂ nanocomposites in epoxy for corrosion resistant coatings. 2011.
21. Neville E.M., MacElroy J.D., Thampi K.R., Sullivan J.A. Neville. Visible light active C-doped titanate nanotubes prepared via alkaline hydrothermal treatment of C-doped nanoparticulate TiO₂: photoelectrochemical and photocatalytic properties // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2013. Vol. 267. P. 17 – 24 [<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.06.008>]
22. Ranjitha A., Muthukumarasamy N., Thambidurai M., Velauthapillai D., Agilan S., Balasundaraprabhu R.A. Ranjitha. Effect of reaction time on the formation of TiO₂ nanotubes prepared by hydrothermal method // *Optik*. 2015. Vol. 126. № 20. P. 2491 – 2494. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.06.022>
23. Arunchandran C., Ramya S., George R.P., Mudali U.K. Arunchandran. Self-healing corrosion resistive coatings based on inhibitor loaded TiO₂ nanocontainers // *Journal of the electrochemical Society*. 2012. Vol. 159. № 11. P. 552 – 559. <https://doi.org/10.1149/2.020212jes>
24. Kumar K., Ghosh P.K., Kumar A. Improving mechanical and thermal properties of TiO₂-epoxy nanocomposite // *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 97. P. 353 – 360. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.080>
25. Sakthipandi K., Sethuraman B., Venkatesan K., Alhashmi B., Purushothaman G., Ansari I.A. Ultrasound-Based Sonochemical Synthesis of Nanomaterials / *Handbook of Vibroacoustics, Noise and Harshness*. Springer, Singapore. 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4638-9_58-1
26. Brooman E.W. Modifying organic coatings to provide corrosion resistance: Part II – Inorganic additives and inhibitors // *Metal Finishing*. 2002. Vol. 100. № 5. P. 42 – 53. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(02\)80382-8](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(02)80382-8)
27. Zheludkevich M.L., Shchukin, D.G., Yasakau, K.A., Möhwald H., Ferreira M.G. Anticorrosion coatings with self-healing effect based on nanocontainers impregnated with corrosion inhibitor // *Chemistry of Materials*. 2007. Vol. 19. № 5. P. 402 – 411. <https://doi.org/10.1021/cm062066k>
28. Chen X., Mao S.S. Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications // *Chemical reviews*. 2007. Vol. 107. № 7. P. 2891 – 2959. <https://doi.org/10.1021/cr0500535>
29. White S.R., Sottos N.R., Geubelle P.H., Moore J.S., Kessler M.R., Sriram S.R., Viswanathan S. Autonomic healing of polymer composites // *Nature*. 2001. Vol. 409. № 6822. P. 794 – 797. <https://doi.org/10.1038/35057232>

30. Dung Vu.V., Nigmatzyanov R.I. Increasing the anti-corrosion protection of metal surfaces using a composite epoxy coating with BTA-TiO₂ nanotubes treated with ultrasound: a review // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024. No. 9-1 (96). P. 131 – 135. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-9-1-131-135>

31. Ван З., Кольдюшов В.К., Нигметзянов Р.И. Перспективы использования ультразвука при нанесении защитных композиций с нанонитями БТА-TiO₂ // *Научный аспект*. 2024. Т. 7. № 5. С. 859 – 867.

References

1. Lin J., Ottenbrite R.M. Surface modification of inorganic oxide particles with silane coupling agent and organic dyes. *Polym Adv Technol*. 2001. Vol. 12. No. 5. P. 285 – 292. <https://doi.org/10.1002/pat.64>
2. Tsai C.C., Teng H. Regulation of the physical characteristics of titania nanotube aggregates synthesized from hydrothermal treatment. *Chemistry of Materials*. 2004. Vol. 16. No. 22. P. 4352 – 4358. <https://doi.org/10.1021/cm049643u>
3. Kim J.Y., Sekino T., Park D.J., Tanaka S.I. Morphology modification of TiO₂ nanotubes by controlling the starting material crystallite size for chemical synthesis. *Journal of Nanoparticle Research*. 2011. Vol. 13. P. 2319 – 2327. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-9990-6>
4. Chen Quan, Yakovlev N.L. Adsorption and interaction of organosilanes on TiO₂ nanoparticles. *Applied Surface Science*. 2010. Vol. 257. No. 5. P. 1395 – 1400. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.08.036>
5. Kasuga T., Hiramatsu M., Hoson A., Sekino T., Niihara K. Titania nanotubes prepared by chemical processing. *Advanced materials*. 1999. Vol. 11. No. 15. P. 1307 – 1311. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(199910\)11:15<1307::AID-ADMA1307>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(199910)11:15<1307::AID-ADMA1307>3.0.CO;2-H)
6. Shen M., Almallahi R., Rizvi Z., Gonzalez-Martinez E., Yang G., Robertson M.L. Accelerated hydrolytic degradation of ester-containing biobased epoxy resins. *Polymer Chemistry*. 2019. Vol. 10. No. 23. P. 3217 – 3229. <https://doi.org/10.1039/C9PY00240E>
7. Njoku D.I., Cui M., Xiao H., Shang B., Li Y. Understanding the anticorrosive protective mechanisms of modified epoxy coatings with improved barrier, active and self-healing functionalities: EIS and spectroscopic techniques // *Scientific reports*. 2017. Vol. 7. No. 1. P. 15597. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15845-0>
8. Atta A.M., El-Saeed A.M., El-Mahdy G.M., Al-Lohedan H.A. Atta. Application of magnetite nano-hybrid epoxy as protective marine coatings for steel. *RSC advances*. 2015. Vol. 5. No. 123. P. 101923 – 101931. [<https://doi.org/10.1039/C5RA20730D>]
9. Wang C., Mao H., Wang C., Fu S. Dispersibility and hydrophobicity analysis of titanium dioxide nanoparticles grafted with silane coupling agent // *Industrial & engineering chemistry research*. 2011. Vol. 50. No. 21. P. 11930 – 11934. <https://doi.org/10.1021/ie200887x>
10. Lenz D.M., Delamar M., Ferreira C.A. Application of polypyrrole/TiO₂ composite films as corrosion protection of mild steel. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2003. Vol. 540. P. 35 – 44. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(02\)01272-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(02)01272-X)
11. Kobayashi K., Takewaka K. Experimental studies on epoxy coated reinforcing steel for corrosion protection. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. 1984. Vol. 6. No. 2. P. 99 – 116. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(84\)90039-3](https://doi.org/10.1016/0262-5075(84)90039-3)
12. Reeta Gupta, Subhash Chandra Evaluation of acoustical characteristics of ultrasonic transducer backing materials at high hydrostatic pressures. *Ultrasonics*. 1998. Vol. 36. No. 1-5. P. 37 – 40. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00153-4](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00153-4)
13. Palanivelu, Saravanan, Duraibabu Dhanapal, Ananda Kumar Srinivasan Palanivelu. Studies on silicon containing nanohybrid epoxy coatings for the protection of corrosion and bio-fouling on mild steel. *Silicon*. 2017. Vol. 9. No. 3. P. 447 – 458. <https://doi.org/10.1007/s12633-014-9202-6>
14. Pour Z.S., Ghaemy M., Bordbar S., Karimi-Maleh H. Effects of surface treatment of TiO₂ nanoparticles on the adhesion and anticorrosion properties of the epoxy coating on mild steel using electrochemical technique. *Progress in Organic Coatings*. – 2018. – Vol.119. P. 99 – 108. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.02.01>
15. Rahmani Pooria, Akbar Shojaei, Nahid Pirhady Tavandashti Nanodiamond loaded with corrosion inhibitor as efficient nanocarrier to improve anticorrosion behavior of epoxy coating. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020. Vol.83. P. 153 – 163. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.11.023>
16. Aboorvakani R., John S. Kennady Vethanathan, Madhu K.U. Aboorvakani. Influence of Zn concentration on zinc oxide nanoparticles and their anti-corrosion property. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020. Vol. 834. P. 155078. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155078>

17. Fadl A.M., Abdou M.I., Al-Elai S.A., Hamza M.A., Sadeek S.A. Fadl. Evaluation of the anti-corrosion behavior, impact resistance, acids and alkali immovability of nonylphenol ethoxylate/TiO₂ hybrid epoxy nanocomposite coating applied on the carbon steel surface. *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 136. P. 105263. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105263>
18. Lenz Denise M., Michel Delamar, Carlos A. Ferreira Lenz. Application of polypyrrole/TiO₂ composite films as corrosion protection of mild steel. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2003. Vol. 540. P. 35 – 44. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(02\)01272-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(02)01272-X)
19. Shen G.X., Chen Y.C., Lin C.J. Corrosion protection of 316 L stainless steel by a TiO₂ nanoparticle coating prepared by sol-gel method. *Thin Solid Films*. 2005. Vol. 489. No. 1-2. P. 130 – 136. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.05.016>
20. Mahulikar Pramod P., Rajendra S. Jadhav, Dilip G. Hundiware. Performance of polyaniline/TiO₂ nanocomposites in epoxy for corrosion resistant coatings. 2011.
21. Neville E.M., MacElroy J.D., Thampi K.R., Sullivan J.A. Neville. Visible light active C-doped titanate nanotubes prepared via alkaline hydrothermal treatment of C-doped nanoparticulate TiO₂: photoelectrochemical and photocatalytic properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2013. Vol. 267. P. 17 – 24 [<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.06.008>]
22. Ranjitha A., Muthukumarasamy N., Thambidurai M., Velauthapillai D., Agilan S., Balasundaraprabhu R.A. Ranjitha. Effect of reaction time on the formation of TiO₂ nanotubes prepared by hydrothermal method. *Optik*. 2015. Vol. 126. No. 20. P. 2491 – 2494. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.06.022>
23. Arunchandran C., Ramya S., George R.P., Mudali U.K. Arunchandran. Self-healing corrosion resistive coatings based on inhibitor loaded TiO₂ nanocontainers. *Journal of the electrochemical Society*. 2012. Vol. 159. No. 11. P. 552 – 559. <https://doi.org/10.1149/2.020212jes>
24. Kumar K., Ghosh P.K., Kumar A. Improving mechanical and thermal properties of TiO₂-epoxy nanocomposite. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 97. P. 353 – 360. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.080>
25. Sakthipandi K., Sethuraman B., Venkatesan K., Alhashmi B., Purushothaman G., Ansari I.A. Ultrasound-Based Sonochemical Synthesis of Nanomaterials. *Handbook of Vibroacoustics, Noise and Harshness*. Springer, Singapore. 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4638-9_58-1
26. Brooman E.W. Modifying organic coatings to provide corrosion resistance: Part II – Inorganic additives and inhibitors. *Metal Finishing*. 2002. Vol. 100. No. 5. P. 42 – 53. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(02\)80382-8](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(02)80382-8)
27. Zheludkevich M.L., Shchukin, D.G., Yasakau, K.A., Möhwald H., Ferreira M.G. Anticorrosion coatings with self-healing effect based on nanocontainers impregnated with corrosion inhibitor. *Chemistry of Materials*. 2007. Vol. 19. No. 5. P. 402 – 411. <https://doi.org/10.1021/cm062066k>
28. Chen X., Mao S.S. Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications // *Chemical reviews*. 2007. Vol. 107. No. 7. P. 2891 – 2959. <https://doi.org/10.1021/cr0500535>
29. White S.R., Sottos N.R., Geubelle P.H., Moore J.S., Kessler M.R., Sriram S.R., Viswanathan S. Autonomic healing of polymer composites. *Nature*. 2001. Vol. 409. No. 6822. P. 794 – 797. <https://doi.org/10.1038/35057232>
30. Dung Vu.V., Nigmatzyanov R.I. Increasing the anti-corrosion protection of metal surfaces using a composite epoxy coating with BTA-TiO₂ nanotubes treated with ultrasound: a review. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024. No. 9-1 (96). P. 131 – 135. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-9-1-131-135>
31. Wang Z., Koldyushov V.K., Nigmatzyanov R.I. Prospects for the use of ultrasound in the application of protective compositions with BTA-TiO₂ nanowires. *Scientific aspect*. 2024. Vol. 7. No. 5. P. 859 – 867.

Информация об авторах

Ву Ван Зунг, аспирант, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет «МАДИ», vandungph2605@gmail.com

Нигметзянов Р.И., кандидат технических наук, доцент, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет «МАДИ», lefmo@yandex.ru

Vu Van Zung, Postgraduate Student, Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI), vandungph2605@gmail.com

Nigmatzyanov R.I., Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI), lefmo@yandex.ru

© Ву Ван Зунг, Нигметзянов Р.И., 2025