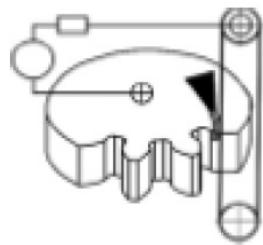


Технологии электро-физико-химической и комбинированной обработки



Наукоёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 12 (174). С. 25-34.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 12 (174). P. 25-34.

Научная статья

УДК 542.06

doi: 10.30987/2223-4608-2025-12-25-34

Синтезирование нанотрубок TiO_2 с ингибитором коррозии гидротермально-ультразвуковым методом

Ван Зунг Ву¹, аспирант

Ба Тханг Фам², магистр

Зюи Фьюок Нгуен³, магистр

Равиль Исламович Нигметзянов⁴, к.т.н.

^{1, 2, 4} ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Россия

³ Московский авиационный институт, Москва, Россия

¹ vandungph2605@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0660-0144>

² Ducthangpham2906@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-0834-2393>

³ nguyenduophuoc201@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0663-1520>

⁴ lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-1443-7584>

Аннотация. В исследовании нанотрубки TiO_2 были синтезированы методом ультразвуковой обработки с последующей гидротермальной реакцией по времени от 4 до 10 ч, что значительно меньше по времени применяемы на данный момент методов. Структуры нанотрубок получены диаметрами от 50 до 300 нм и длинами от 1 до 10 мкм, это подтверждено с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Способность нанотрубок TiO_2 к хранению ингибитора коррозии бензотриазола (БТА) исследовали с использованием современных аналитических методов, включая просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), дифференциальный термический анализом (ДТА), термогравиметрический анализом (ТГА) и Инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье). Спектры ИК-Фурье показали характерные полосы поглощения, соответствующие функциональным группам БТА, что указывает на эффективное абсорбирование молекул ингибитора как на поверхности, так и внутри полостей нанотрубок TiO_2 . Результаты ТГА указывают, что содержание БТА в материалах составляло от 3,7 до 8,7 %. При этом анализ ДТА подтвердил, что процесс адсорбции не оказывает значительного влияния на кристаллическую структуру и термическую стабильность нанотрубок. Благодаря высокой пористости, большой удельной поверхности и интенсивному взаимодействию с органическими молекулами нанотрубки TiO_2 , синтезированные методом гидротермально-ультразвуковой обработки, продемонстрировали управляемое хранение и высвобождение ингибитора коррозии. Полученные нанотрубки TiO_2 благодаря высокому потенциалу могут применяться в интеллектуальных системах защиты от коррозии, но и открывают новые возможности для разработки передовых, устойчивых и экологически безопасных антикоррозионных покрытий в будущем.

Ключевые слова: нанотрубки TiO_2 , бензотриазол, ингибитор коррозии, гидротермально-ультразвуковой синтез, хранение ингибитора коррозии

Для цитирования: Ву В.З., Фам Б.Т., Нгуен З.Ф., Нигметзянов Р.И. Синтезирование нанотрубок TiO_2 с ингибитором коррозии гидротермально-ультразвуковым методом // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2025. № 12 (174). С. 25–34. doi: 10.30987/2223-4608-2025-12-25-34

Synthesis of TiO_2 nanotubes with corrosion inhibitor by hydrothermal ultrasonic method

Van Z. Vu¹, PhD student

Ba T. Pham², Mgr.

Duy P. Nguen³, Mgr.

Ravil I. Nigmetzyanov⁴, PhD. Eng.

^{1, 2, 4} Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, Moscow, Russia

³ Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

¹ vandungph2605@mail.ru

² Ducthangpham2906@gmail.com

³ nguyenduyphuoc201@gmail.com

⁴ lefmo@yandex.ru

Abstract. In the study, TiO_2 nanotubes were synthesized by ultrasonic treatment followed by a hydrothermal reaction within the period of time from 4 to 10 hours, which is significantly shorter than the currently used methods. Nanotube structures were obtained with diameters from 50 to 300 nm and lengths from 1 to 10 microns, this was confirmed using scanning electron microscopy (SEM). The ability of TiO_2 nanotubes to store the corrosion inhibitor benzotriazole (BTA) was studied using modern analytical methods, including transmission electron microscopy (TEM), differential thermal analysis (DTA), thermogravimetric analysis (TGA) and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The IR- Fourier spectra showed characteristic absorption bands corresponding to the functional groups of BTA, which indicates the effective absorption of inhibitor molecules both on the surface and inside the cavities of TiO_2 nanotubes. The TGA results indicate that the content of BTA in the materials ranged from 3,7 to 8,7 %. At the same time, the DTA confirmed that the adsorption does not significantly affect the crystal structure and thermal stability of the nanotubes. Due to their high porosity, large specific surface area, and intense interaction with organic molecules, TiO_2 nanotubes synthesized by hydrothermal ultrasound treatment demonstrated controlled storage and release of the corrosion inhibitor. Due to their high potential, the obtained TiO_2 nanotubes can be used in intelligent corrosion protection systems, but they also open up new opportunities for the development of advanced, sustainable and environmentally friendly anticorrosive coatings in the future.

Keywords: TiO_2 nanotubes, benzotriazole, corrosion inhibitor, hydrothermal-ultrasonic synthesis, corrosion inhibitor storage

For citation: Vu V.Z., Pham B.T., Nguen Z.P., Nigmetzyanov R.I. Wave strain hardening in the additive synthetic process / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 12 (174). P. 25–34. doi: 10.30987/2223-4608-2025-12-25-34

Введение

Бензотриазол (БТА) представляет собой органическое соединение из группы азолов, характеризующееся стабильной кольцевой структурой и высокими химическими свойствами. Благодаря способности образовывать соединения с металлическими поверхностями, особенно с медью и её сплавами. БТА широко применяется в качестве эффективного ингибитора коррозии в различных материалологических системах [1 – 2].

Диоксид титана TiO_2 в наноструктурированной форме, главным образом в виде нанотрубок, зарекомендовал себя как идеальный носитель для контролируемого хранения и высвобождения ингибирующих коррозию молекул. Благодаря

таким выдающимся свойствам, как химическая стабильность, биосовместимость, нетоксичность, экологическая безопасность, высокая удельная поверхность и отличная диспергируемость, нанотрубки TiO_2 находят применение в ряде передовых областей – от катализа и сенсорных технологий до систем доставки лекарств, а также, в особенности, в инновационных антикоррозионных покрытиях [1 – 2].

В настоящем исследовании основное внимание уделяется синтезу нанотрубок TiO_2 методом гидротермальной обработки в сочетании с ультразвуковым воздействием – процессу, разработанному с целью значительного сокращения времени реакции синтеза по сравнению с традиционными гидротермальными методами, которые обычно требуют от 24 до 72 ч [3 – 5]. В данной работе

продолжительность гидротермального синтеза варьируется от 4 до 10 ч, что позволяет снизить энергозатраты и сократить время, при этом обеспечивая формирование хорошо выраженных нанотрубчатых структур. Полученные образцы TiO_2 будут оценены на предмет их способности к хранению БТА с использованием современных методов физико-химического анализа, что создаёт основу для их интеграции в функциональные полимерные покрытия, предназначенные для защиты металлов от коррозии в условиях агрессивной эксплуатации.

Материалы и методика синтеза

В исследовании использовался: диоксид титана (Degussa P25), БТА (99 %) от Химкрафт, гидроксид натрия, соляная кислота и технический этанол.

Нанотрубки TiO_2 были синтезированы с помощью двухэтапного процесса, изображенного на рис. 1.

Процесс загрузки БТА в материалы на основе нанотрубок TiO_2 осуществлялся следующим образом: 0,5 г синтезированных нанотрубок TiO_2 подвергались термической обработке при температуре 300 °C в течение 1 ч.

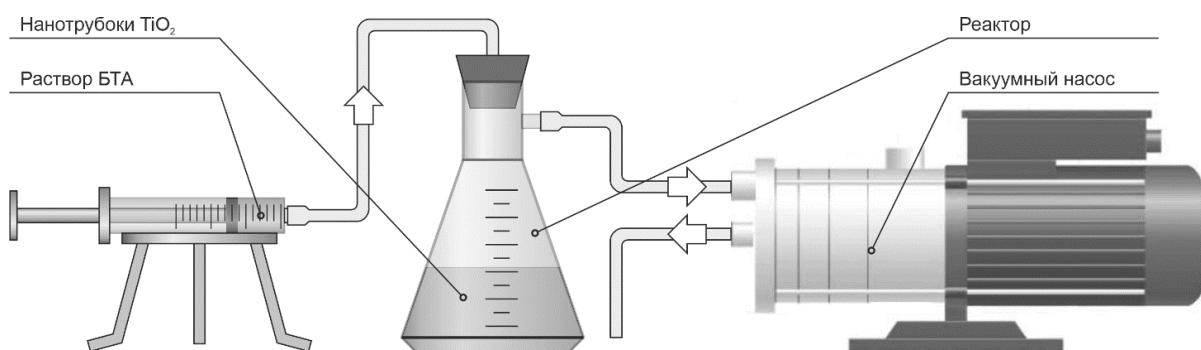


Рис. 2. Схема синтеза наноконтейнеров БТА/ TiO_2

Fig. 2. Scheme of synthesis of BTA/ TiO_2 nanocontainers

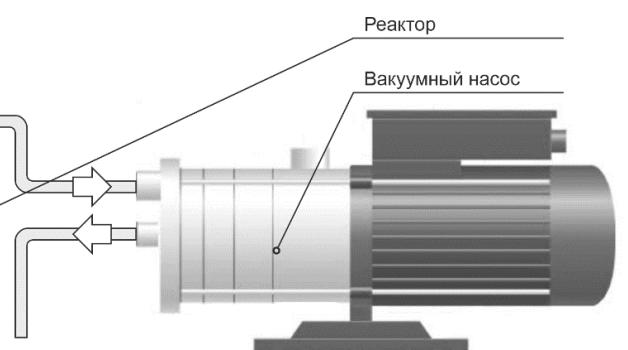
Морфологическая структура материалов на основе TiO_2 в форме нанотрубок была исследована с использованием СЭМ высокого разрешения. Одновременно способность к хранению ингибитора коррозии БТА оценивалась методом ПЭМ с применением микроскопа



Рис. 1. Схема синтеза нанотрубок TiO_2 ультразвуковым гидротермальным методом

Fig. 1. Scheme of synthesis of TiO_2 nanotubes by ultrasonic hydrothermal method

Обработанный образец затем помещали в реактор (рис. 2). Раствор БТА готовили путём растворения 1,5 г БТА в 75 мл этанола, после чего его медленно вводили в реакционную систему. Процесс загрузки ингибитора коррозии проводили в статических условиях в течение 24 ч. По завершении реакции материал отделяли центрифугированием и высушивали при естественных условиях для формирования наноконтейнеров БТА/ TiO_2 .



ДМ-100СХ-П. ТГА и ДТА проводились с использованием прибора Setaram Setsys Evolution 16/18, а ИК-Фурье регистрировались на спектрометре Bruker Vertex 80v в диапазоне 400...4000 cm^{-1} с разрешением 4 cm^{-1} .

Синтез образцов проводились в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете (МАДИ), а оценка комплексных характеристик в Институте физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН), Российской Федерации.

Исследование морфологии поверхности нанотрубок TiO_2 с помощью СЭМ

Анализ СЭМ на рис. 3 выявляет формирование структур нанотрубок TiO_2 в образцах, синтезированных с использованием комбинированного ультразвукового и гидротермального метода, при относительно коротком

времени гидротермальной реакции от 4 до 10 ч. Результаты показывают, что данный подход позволяет эффективно получать нанотрубки с диаметром от приблизительно 50 до 300 нм и длиной от 1 до 10 мкм. Кроме того, СЭМ-изображения демонстрируют, что образец, подвергнутый 4-часовой гидротермальной обработке (рис. 3, *a*), характеризуется высокой плотностью нанотрубок, тогда как образец с 6-часовой обработкой проявляет выраженную склонность к агломерации (рис. 3, *b*). В отличие от них, образцы, обработанные в течение 8 и 10 ч, демонстрируют более равномерное распределение нанотрубчатых структур (рис. 3, *c*, *d*).

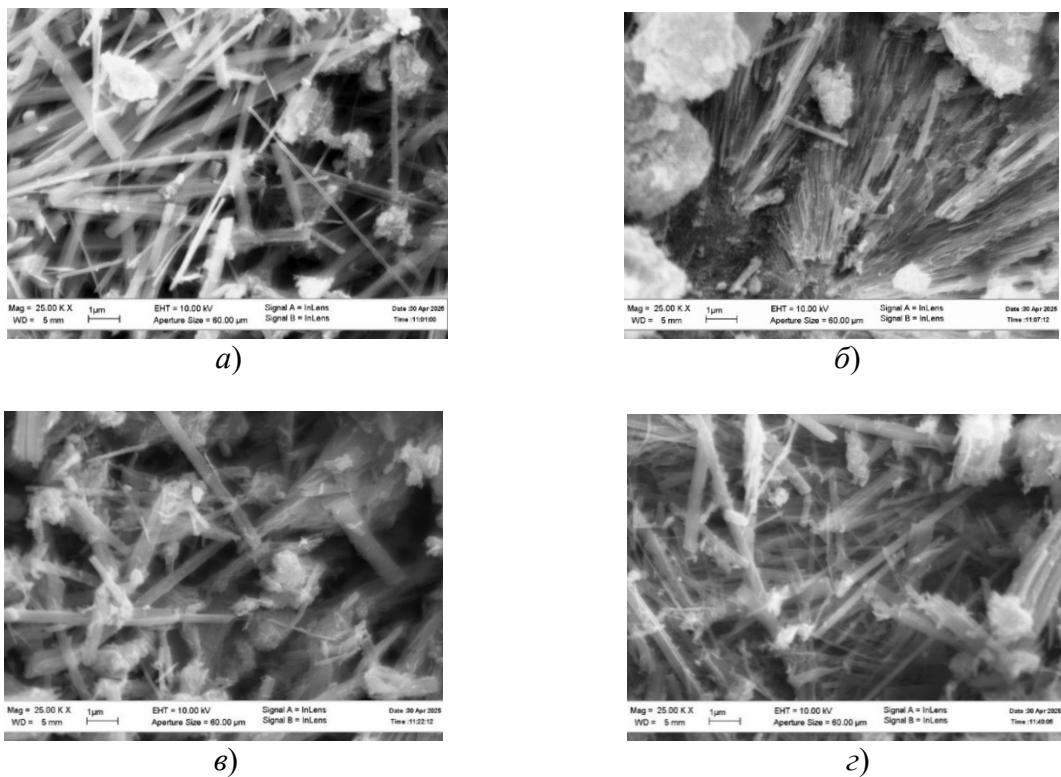


Рис. 3. СЭМ изображения образцов нанотрубок TiO_2 , синтезированных гидротермальным методом в течение: *a* – 4 ч; *b* – 6 ч; *c* – 8 ч; *d* – 10 ч

Fig. 3. SEM images of TiO_2 nanotubes samples synthesized by the hydrothermal method within:
a – 4 hours; *b* – 6 hours; *c* – 8 hours; *d* – 10 hours

Результаты анализа методом ПЭМ (рис. 4) для всех четырёх исследованных образцов демонстрируют полую трубчатую структуру с тонкими и чётко выраженнымными стенками, характерную для нанотрубчатых материалов. Примечательно, что во внутренней

полости трубок во всех образцах наблюдаются тёмные полосы или области с высоким контрастом, что указывает на присутствие посторонних веществ – предположительно молекул ингибитора коррозии, загруженных в мезопористую структуру.

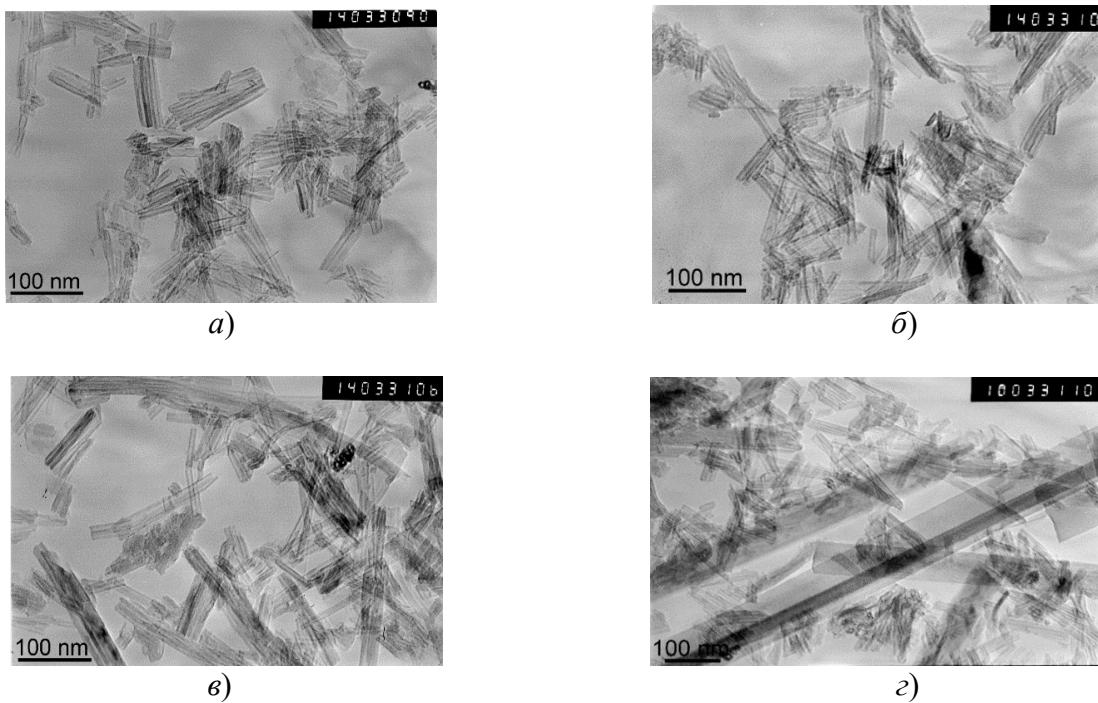


Рис. 4. Образцы БТА/ТiO₂, приготовленные с использованием нанотрубок ТiO₂, синтезированных гидротермальным методом в течение:
a – 4 часов; б – 6 часов; в – 8 часов; г – 10 часов

Fig. 4. BTA/TiO₂ samples prepared using TiO₂ nanotubes synthesized by the hydrothermal method within:
a – 4 hours; b – 6 hours; c – 8 hours; d – 10 hours

Тёмные полосы (рис. 4, а – г) располагаются вдоль всей длины нанотрубок и демонстрируют различия в морфологии и плотности между образцами. Тем не менее, во всех случаях наблюдается отчётливое накопление вещества внутри трубок, что свидетельствует об успешной загрузке ингибиторов коррозии. Эти наблюдения указывают на то, что все образцы обладают эффективной способностью к накоплению ингибиторов коррозии, независимо от продолжительности гидротермального синтеза. Способность адсорбировать и удерживать вещества внутри мезопористых каналов является важной характеристикой, обеспечивающей функционирование нанотрубчатых материалов в качестве «наноемкостей» для ингибиторов коррозии в системах самовосстанавливающихся антикоррозионных покрытий [6].

ДТА-результаты (рис. 5) показывают, что с увеличением времени гидротермальной обработки нанотрубок ТiO₂ повышается степень кристалличности и фазовая стабильность. Во всех образцах отмечен

широкий эндотермический пик при 50...200 °C, связанный с удалением адсорбированной воды [8]; его снижение указывает на уменьшение водопоглощения из-за более плотной структуры. В области 200...400 °C регистрируются более слабые пики дегидроксилирования и разложения органических примесей, интенсивность которых также падает с увеличением времени реакции. Для образцов ТН₁ и ТН₂ (4 и 6 ч) характерны выраженные экзотермические пики при 450...600 °C, отражающие перекристаллизацию, тогда как для ТН₃ и ТН₄ (8 и 10 ч) они слабеют или исчезают, что свидетельствует о формировании стабильного анатаза уже на стадии синтеза (рис. 5, а). Экзотермический пик перехода анатаза в рутил (650...750 °C) [9] явно выражен в ТН₁ и ТН₂, но снижается в ТН₃ и отсутствует в ТН₄, подтверждая рост фазовой стабильности анатаза. Таким образом, увеличение времени гидротермальной обработки улучшает кристалличность и термическую стабильность ТiO₂, что важно для приложений с устойчивой анатазной структурой.

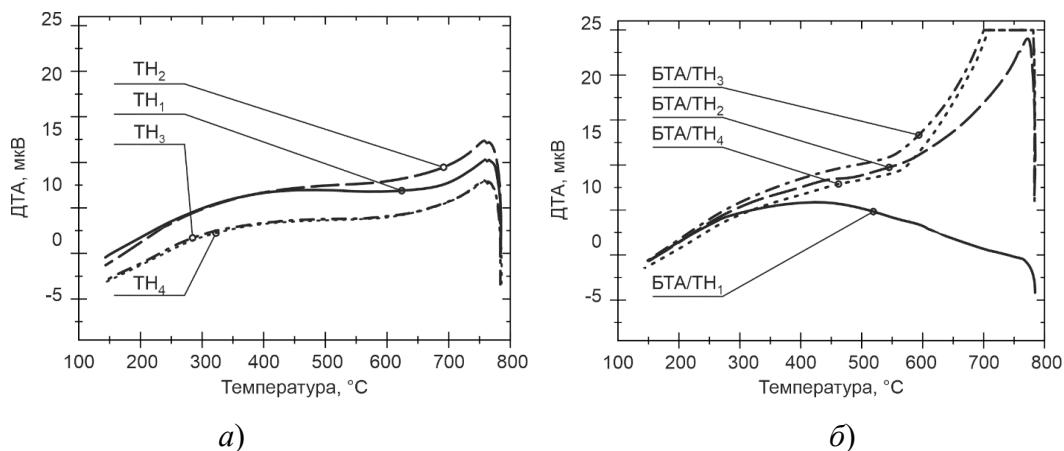


Рис. 5. Результаты анализа ДТА образцов: *а* – нанотрубок TiO_2 ; *б* – нанотрубок TiO_2 с загруженным БТА

Fig. 5. Results of DTA analysis of samples: *a* – TiO_2 nanotubes; *b* – TiO_2 nanotubes with loaded BTA

ДТА-исследование влияния БТА на термическое поведение TiO_2 показывает, что в области 50...200 °C все образцы с ингибитором демонстрируют более интенсивные эндотермические пики, указывающие на повышенную водоадсорбцию благодаря взаимодействию БТА с поверхностью TiO_2 . Это подтверждает потенциал материала для хранения и контролируемого высвобождения ингибитора. В диапазоне 200...400 °C более выраженные пики связаны с разложением функциональных групп БТА, что свидетельствует об успешной загрузке ингибитора. У BTA/TH_1 и BTA/TH_2 (4 и 6 ч) сохраняются эндотермические пики при 450...600 °C, но их интенсивность снижается из-за наложения процессов разложения органики, указывая на влияние БТА на переクリсталлизацию (рис. 5, *б*). В BTA/TH_3 и BTA/TH_4 (8 и 10 ч) эти пики практически исчезают, сохраняя стабильность анатаза. Сигналы перехода анатаза в рутил (650...750 °C) у всех образцов с БТА слабо выражены, что подтверждает термическую стабильность фазы анатаза даже при модификации ингибитором.

Результаты анализа ДТА показывают, что процесс загрузки БТА с использованием нанотрубок TiO_2 не нарушает кристаллическую структуру анатаза, а, напротив, приводит к появлению дополнительных органических термических характеристик, которые могут быть использованы для управления высвобождением или активацией ингибитора в конкретных условиях эксплуатации. Это представляет собой важное свидетельство

потенциала данного метода синтеза для разработки инновационных материаловых систем, способных к контролируемому высвобождению в агрессивных коррозионных средах.

ТГА-спектр образца БТА (рис. 6) демонстрирует выраженное термическое разложение в температурном диапазоне от 175 до 400 °C. Приблизительно при 170 °C масса образца сохраняется на уровне 100 %. Однако после этой точки наблюдается резкое и почти полное снижение массы: при 350 °C остаётся лишь около 8,5 % от исходной массы. Это свидетельствует о практически полном разложении БТА в указанном температурном интервале. После 400 °C кривая стабилизируется, что указывает на отсутствие значительной потери массы; оставшийся остаток, вероятно, состоит из углеродистых остатков, а также термически устойчивых (невоспаряющихся) примесей.

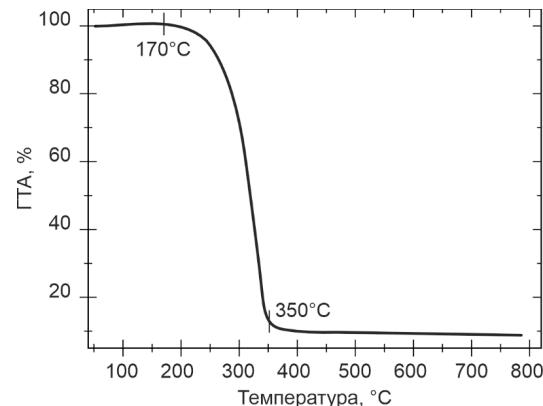


Рис. 6. ТГА-спектр образца БТА

Fig. 6. TGA spectrum of the BTA sample

Оценка способности нанотрубок TiO_2 к хранению ингибитора коррозии с использованием термогравиметрического анализа (рис. 7) указывает, что все образцы демонстрируют значительную потерю массы преимущественно в температурном диапазоне 30...400 °C, что связано с десорбцией адсорбированной влаги и разложением поверхностных функциональных групп, включая, вероятно, ингибитор коррозии БТА. Сравнительный анализ парных образцов – TH_1 -БТА/ТН₁, TH_2 -БТА/ТН₂, TH_3 -БТА/ТН₃ и

ТН₄-БТА/ТН₄ показывает, что образцы, содержащие БТА (БТА/ТН₁, БТА/ТН₂, БТА/ТН₃ и БТА/ТН₄), демонстрируют значительно меньшую степень потери массы по сравнению с исходными нанотрубками, особенно в интервале 100...400 °C, характерном для термического разложения различных органических соединений. Разность в потере массы между каждой парой образцов в данном температурном диапазоне используется для оценки количества вы свобожденного ингибитора коррозии.

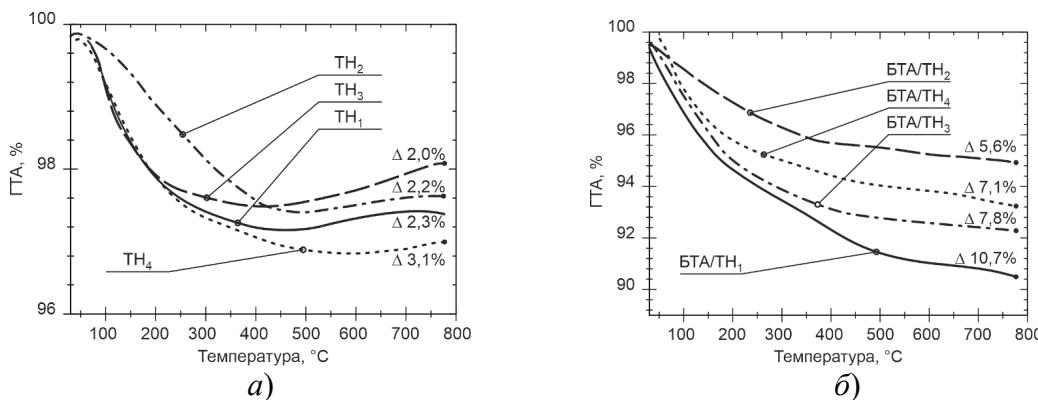


Рис. 7. Результаты анализа ТГА образцов:
а – нанотрубок TiO_2 ; б – наноконтейнеров TiO_2 с загруженным БТА

Fig. 7. The results of the analysis of TGA samples:
a – TiO_2 nanotubes; b – TiO_2 nanocontainers with loaded BTA

На основании результатов ТГА определялась эффективность загрузки БТА в нанотрубки TiO_2 , оценка производилась по следующему соотношению:

$$\alpha_i = \frac{\beta_i - \gamma_i}{\beta_i} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где α – коэффициент загрузки БТА в нанотрубки; i – порядковый номер образца; β – потеря массы образцов БТА/ТН_i в диапазоне температур 30...800 °C; γ – потеря массы образцов ТН_i в диапазоне температур 30...800 °C.

1. Данные расчёта эффективность формирования наноконтейнеров БТА/ТН

1. Calculation data on the efficiency of the formation of BTA/TN nanocontainers

| i | $\beta, \%$ | $\gamma, \%$ | $\alpha, \%$ |
|-----|-------------|--------------|--------------|
| 1 | 10,7 | 2,3 | 78,5 |
| 2 | 5,6 | 2,0 | 64,3 |
| 3 | 7,8 | 2,2 | 71,8 |
| 4 | 7,1 | 3,1 | 56,3 |

Данные термогравиметрического анализа (табл. 1) показывают, что исходные нанотрубки TiO_2 теряют 2,0...3,1 % массы при 30...800 °C за счёт испарения

адсорбированной влаги, что отражает их гидрофильность. В то же время образцы БТА/ТН_i демонстрируют более высокие потери массы (5,6...10,7 %) из-за влаги и

термического разложения адсорбированного БТА, где основная потеря массы приходится на диапазон 350...800 °C (рис. 5). Наиболее эффективным является синтез при 4 часах геотермальной реакции $\alpha = 78,5 \%$, с наибольшим содержанием синтезированных наноконтейнеров. Напротив, БТА/TH₂ содержит лишь 3,7 % БТА и характеризуется минимальной суммарной потерей массы, что, вероятно, связано с плотной агрегацией нанотрубок, подтверждённой СЭМ-анализом (рис. 3, б). После 4 часов синтеза, происходит перестроение нанотрубок TiO₂. Размер их уменьшается и затрудняется процесс замещения H₂O на БТА. Этим объясняется дальнейшее снижение количества БТА в наноконтейнерах.

Анализ ИК-Фурье подтверждает успешное включение молекул БТА в структуру нанотрубок TiO₂, синтезированных при различных продолжительностях гидротермального процесса. В спектре чистого БТА чётко выражены полосы поглощения на 891, 996 и 1109 см⁻¹ (рис. 8).

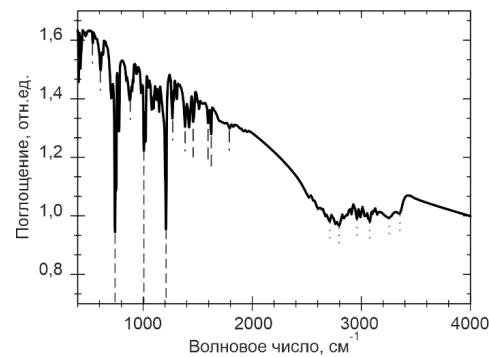


Рис. 8. ИК-Фурье спектра БТА

Fig. 8. IR Fourier spectrum of BTA

Спады при волновом числе 1630 и 3350 см⁻¹ являются характерными колебаниями для триазольного и бензольного колец и связаны с деформационными и валентными колебаниями групп N–H, а также O–H соответственно [10 – 11]. Эти характерные полосы также наблюдаются во всех образцах, что указывает на адсорбцию БТА на поверхности, а также на его возможное взаимодействие с поверхностью наноматериалов (рис. 9).

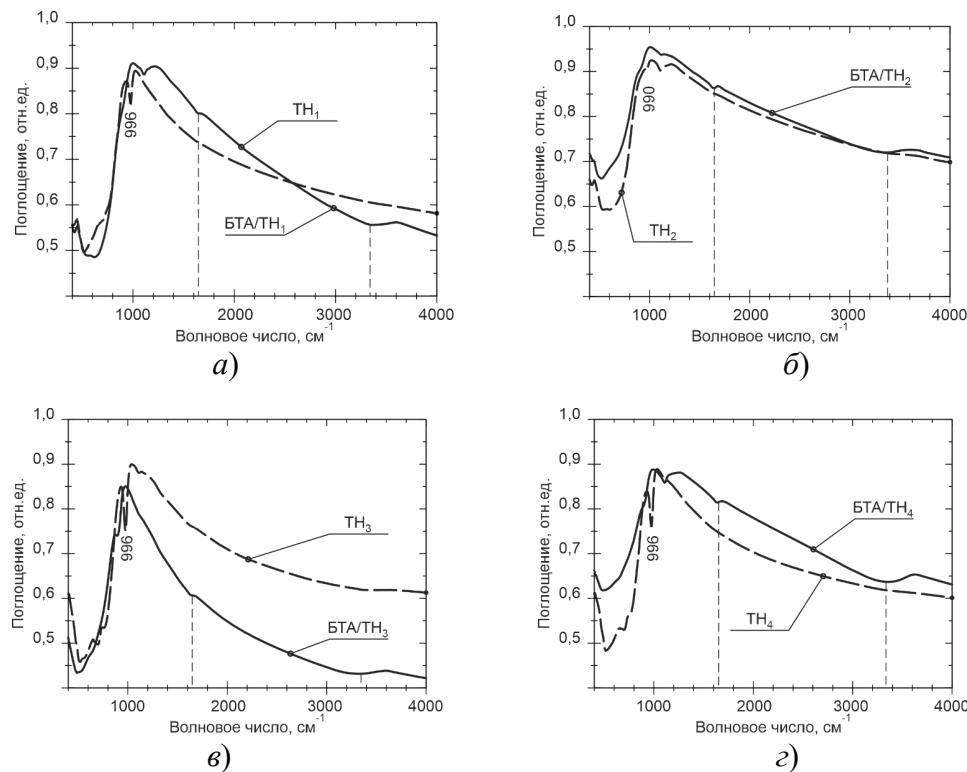


Рис. 9. ИК-Фурье нанотрубок и наноконтейнеров с загруженным БТА:
 а – TH₁ и БТА/TH₁; б – TH₂ и БТА/TH₂; в – TH₃ и БТА/TH₃; г – TH₄ и БТА/TH₄

Fig. 9. IR Fourier of nanotubes and nanocontainers with loaded BTA:
 a – TN1 and BTA/TN1; b – TN2 and BTA/TN2; c – TN3 and BTA/TN3; d – TN4 and BTA/TN4

Результаты ИК-Фурье-анализа показывают влияние хранения БТА в структуре нанотрубок TiO_2 . Образцы с ингибитором демонстрируют характерные полосы поглощения органических групп ($\text{N}-\text{H}$, $\text{C}-\text{H}$, $\text{C}=\text{N}$) при сохранении полос $\text{O}-\text{H}$, связанных с адсорбированной водой и водородными связями с TiO_2 [12], что подтверждает адсорбцию БТА на поверхности и внутри нанотрубок. Напротив, исходные образцы TiO_2 (TH_1 – TH_4) не содержат органических полос и имеют выраженную полосу около 976 cm^{-1} и колебания $\text{Ti}-\text{O}$ в диапазоне $400\ldots700 \text{ cm}^{-1}$ [13], отражающие чистую неорганическую структуру.

Для образца БТА/ TH_2 отмечены интенсивные полосы поглощения, указывающие на высокую поверхностную концентрацию БТА, тогда как у БТА/ TH_3 эти сигналы слабее, что связано с меньшей адсорбцией. При этом изменение интенсивности ИК-Фурье не полностью соответствует данным ТГА (рис. 7), поскольку метод фиксирует преимущественно молекулы БТА на поверхности, а не внутри структуры. Ослабление или смещение полос может быть вызвано удержанием БТА в полостях нанотрубок, экранированием, а также ориентацией молекул и сильными поверхностными взаимодействиями, включая хемосорбцию [14].

Заключение

Метод ультразвуково-гидротермального синтеза оказался эффективным для синтеза нанотрубок TiO_2 с отчетливой морфологией нанотрубок с однородным размером, а также способностью хранить ингибиторы коррозии. Результаты анализа СЭМ, ПЭМ, ДТА, ТГА и ИК-Фурье подтвердили наличие ингибитора коррозии БТА в структуре материала, что указывает на то, что процесс интеграции БТА в нанотрубку был успешным. Тепловые характеристики и колебательные спектры указывают, что БТА адсорбировался не только на поверхности, но и внутри нанотрубок, способствуя повышению эффективности хранения с контролируемой возможностью высвобождения в реальных условиях. Эти результаты демонстрируют потенциальное применение нанотрубок TiO_2 в эффективных, устойчивых и самовосстановляющихся защитных покрытиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **By B.3., Нигметзянов Р.И.** Increasing the anti-corrosion protection of metal surfaces using a composite

eroxy coating with BTA- TiO_2 nanotubes treated with ultrasound: A review // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 9. С. 131–135. DOI 10.24412/2500-1000-2024-9-1-131-135

2. **By B.3., Нигметзянов Р.И.** Обзор защиты от коррозии с помощью нанонитей TiO_2 и нанотрубок БТА/ TiO_2 , диспергированных в эпоксидной смоле, и предлагаемый метод получения антакоррозионного покрытия из этого материала с помощью ультразвука // Chemical Bulletin. 2025. Т. 8. № 1. <https://doi.org/10.58224/2619-0575-2025-8-1-2>

3. **Alkanad K., Magdy Y., Masoud M., Al-Bogami A.S.** One-step hydrothermal synthesis of anatase TiO_2 nanotubes for efficient photocatalytic CO_2 reduction // ACS Omega. 2022. Vol. 7. No. 43. Pp. 38686–38699. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04211>

4. **Исаев А.Б., Оруджев Ф.Ф., Шабанов Н.С., Ильканаев Р.В., Касумов М.А.** Гидротермальный синтез нанотрубок анатаза и исследование их фотокаталитической активности под давлением кислорода // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. 1: Естественные науки. 2018. № 33 (1). С. 92–102. DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-92-102

5. **Arunchandran K., Karthikeyan P., Madhusudan T.** Self-healing corrosion resistant coatings based on inhibitor-loaded TiO_2 nanocontainers // J. Electrochem. Soc. 2012. Vol. 159. No. 11. Pp. 552–559. <https://doi.org/10.1149/2.020212jes>

6. **Arunchandran K., Karthikeyan P., Madhusudan T.** Storage and release of corrosion inhibitor in TiO_2 nanotube powder synthesized by fast anodic oxidation // Mater. Res. Bull. 2013. Vol. 48. Pp. 635–639. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.11.034>

7. **Li H., Liu X., Deng Y., Wei J., Huang X.** Kinetics of dehydration of titanium dioxide as catalyst carrier for denitrification // Metals. 2023. Vol. 13. No. 8. P. 1486. <https://doi.org/10.3390/met13081486>

8. **Chahroud K.M., Yam F.K., Eid A.M.** Water-splitting properties of bi-phased TiO_2 nanotube arrays subjected to high-temperature annealing // Ceram. Int. 2020. Vol. 46. No. 13. Pp. 21471–21481. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.246>

9. **Roth W., Spangenberg D., Janzen C., Westphal A., Schmitt M.** The relative stabilities of benzotriazole tautomers determined by a rotational band contour analysis of the N–H stretching vibration // Chem. Phys. 1999. Vol. 248. No. 1. Pp. 17–25. [https://doi.org/10.1016/S0301-0104\(99\)00262-1](https://doi.org/10.1016/S0301-0104(99)00262-1)

10. **Хайни Я., Ма Л., Чжан Д., Ань С., Цуй Ч., Андреев Н.Н.** Влияние имидазолинового каркаса ZIF-8 на ингибирующий эффект аспартатов при атмосферной коррозии низкоуглеродистой стали // Коррозия: защита материалов и методы исследований. 2025. № 1. С. 137–163. <https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-1-137-163>

11. **Selmani A., Brendlé J., Lahcene M., Boukoussa B., Chikouche A., Souami N.** Adsorption of cations on TiO_2 nanotubes: application for water purification // ACS Appl. Nano Mater. 2023. Vol. 6. No. 14. Pp. 12711–12725. <https://doi.org/10.1021/acsannm.3c00916>

12. **Niu L., Shi W., Sun X., Deng H.** Differences in efficiency and mechanism of methylene blue between TiO_2 nanoparticles and nanotubes // J. Clean. Prod. 2021. Vol. 297. Article 126498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126498>

13. **Chen Y., Zou C., Mastalerz M., Hu S., Gasaway C., Tao X.** Applications of micro-fourier

transform infrared spectroscopy (FTIR) in the geological sciences – a review // Int. J. Mol. Sci. 2015. Vol. 16. No. 12. Pp. 30223–30250. <https://doi.org/10.3390/ijms161226227>

14. Baudot C., Tan C.M., Kong J.C. FTIR spectroscopy as a tool for nano-material characterization // Infrared Phys. Technol. 2010. Vol. 53. No. 6. Pp. 434–438. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.09.002>

REFERENCES

1. Wu V. Z., Nigmetzyanov 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, vol. 9–3 (96), 2024, pp. 131–135. DOI 10.24412/2500-1000-2024-9-1-131-135

2. Wu V.Z., Nigmetzyanov 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. vol. 8. no. 1. <https://doi.org/10.58224/2619-0575-2025-8-1-2>

3. Alkanad K., Magdy Y., Masoud M., Al-Bogami A.S. One-step hydrothermal synthesis of anatase TiO₂ nanotubes for efficient photocatalytic CO₂ reduction // ACS Omega. 2022. Vol. 7. No. 43. Pp. 38686–38699. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04211>

4. Isaev A.B., Orudzhev F.F., Shabanov N.S., Ilkanaev R.V., Kasumov M.A. Hydrothermal synthesis of anatase nanotubes and investigation of their photocatalytic activity under oxygen pressure // Bulletin of Dagestan State University. Ser. 1: Natural Sciences. 2018. No. 33 (1). pp. 92–102. DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-92-102

5. Arunchandran K., Karthikeyan P., Madhusudan T. Self-healing corrosion resistant coatings based on inhibitor-loaded TiO₂ nanocontainers // J. Electrochem. Soc. 2012. Vol. 159. No. 11. Pp. C. 552–C559. <https://doi.org/10.1149/2.020212jes>

6. Arunchandran K., Karthikeyan P., Madhusudan T. Storage and release of corrosion inhibitor in TiO₂ nanotube powder synthesized by fast anodic oxidation

// Mater. Res. Bull. 2013. Vol. 48. Pp. 635–639. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.11.034>

7. Li H., Liu X., Deng Y., Wei J., Huang X. Kinetics of dehydration of titanium dioxide as catalyst carrier for denitrification // Metals. 2023. Vol. 13. No. 8. P. 1486. <https://doi.org/10.3390/met13081486>

8. Chahroud K.M., Yam F.K., Eid A.M. Water-splitting properties of bi-phased TiO₂ nanotube arrays subjected to high-temperature annealing // Ceram. Int. 2020. Vol. 46. No. 13. Pp. 21471–21481. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.246>

9. Roth W., Spangenberg D., Janzen C., Westphal A., Schmitt M. The relative stabilities of benzotriazole tautomers determined by a rotational band contour analysis of the N–H stretching vibration // Chem. Phys. 1999. Vol. 248. No. 1. Pp. 17–25. [https://doi.org/10.1016/S0301-0104\(99\)00262-1](https://doi.org/10.1016/S0301-0104(99)00262-1)

10. Haini Ya., Ma L., Zhang D., An S., Cui Ch., Andreev N.N. The effect of the ZIF-8 imidazolate framework on the inhibitory effect of aspartates in atmospheric corrosion of low-carbon steel // Corrosion: protection of materials and research methods. 2025. no. 1, pp. 137–163. <https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-1-137-163>

11. Selmani A., Brendlé J., Lahcene M., Boukoussa B., Chikouche A., Souami N. Adsorption of cations on TiO₂ nanotubes: application for water purification // ACS Appl. Nano Mater. 2023. Vol. 6. No. 14. Pp. 12711–12725. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c00916>

12. Niu L., Shi W., Sun X., Deng H. Differences in efficiency and mechanism of methylene blue between TiO₂ nanoparticles and nanotubes // J. Clean. Prod. 2021. Vol. 297. Article 126498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126498>

13. Chen Y., Zou C., Mastalerz M., Hu S., Gasaway C., Tao X. Applications of micro-fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) in the geological sciences – a review // Int. J. Mol. Sci. 2015. Vol. 16. No. 12. Pp. 30223–30250. <https://doi.org/10.3390/ijms161226227>

14. Baudot C., Tan C.M., Kong J.C. FTIR spectroscopy as a tool for nano-material characterization // Infrared Phys. Technol. 2010. Vol. 53. No. 6. Pp. 434–438. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.09.002>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 24.06.2025; принятая к публикации 14.07.2025.

The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 24.06.2025; accepted for publication 14.07.2025.