

УДК 546.824+546.49:544.478

doi:10.20998/2413-4295.2025.04.10

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОТРИМАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ДИСПЕРСНИХ ТИТАНАТІВ У ХІМІЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕКОЛОГІЧНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ

Є. С. НЕСВЯТИПАСКА, А. О. ЛИТВИН*, О. М. ДІМОШЕНКО, Є. С. СУРЖОК,
Д. Б. ІВАЩЕНКО, С. І. СЛАВГОРОДСЬКИЙ

Кафедра хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: alina.hrubnik@gmail.com

АНОТАЦІЯ Наведено розширений літературний аналіз сучасних наукових досліджень, присвячених синтезу, структурним особливостям та функціональним властивостям дисперсних титанатів лужно-земельних металів, зокрема CaTiO_3 , SrTiO_3 , BaTiO_3 та MgTiO_3 . Розглянуто основні методи одержання нанодисперсних титанатів, включаючи твердофазний синтез, гідротермальні методи, сол-гель технології та Pechini-процеси, а також проаналізовано їхній вплив на фазовий склад, ступінь кристалічності, морфологію частинок і поверхневу активність матеріалів. Узагальнено результати рентгенофазового аналізу, інфрачервоної спектроскопії та електронної мікроскопії, які підтверджують формування перовскітної структури типу ABO_3 з високим рівнем структурної впорядкованості. Показано, що умови синтезу та розмір частинок істотно впливають на питому поверхню, ширину забороненої зони та фотокаталітичну активність титанатів. Особливу увагу приділено взаємозв'язку між морфологічними характеристиками наночастинок і їхньою функціональністю в екологічних, енергетичних та біомедичних застосуваннях. Встановлено, що титанати кальцію, стронцію та барію демонструють високий потенціал як фотокаталізатори для очищення водних середовищ, ефективні наповнювачі полімерних композитів із покращеними діелектричними властивостями та біоактивні матеріали для створення імплантаційних покриттів. Узагальнено сучасні підходи до модифікації структури й поверхні титанатів з метою підвищення їхньої функціональної ефективності, а також окреслено перспективи подальших досліджень, пов'язані з оптимізацією параметрів синтезу, створенням гібридних матеріалів і розробленням масштабованих технологій для промислового впровадження. Окремо проаналізовано роль легування, дефектної структури та поверхневої функціоналізації у регулюванні оптичних, електричних і каталізаторних властивостей титанатів, що відкриває можливості їх цілеспрямованого використання у фотокаталітичних, сенсорних і енергозберігаючих системах. Підкреслено актуальність переходу від лабораторних методик до відтворюваних та ресурсоефективних технологій синтезу.

Ключові слова: титанати; дисперсні матеріали; синтез; фотокаталіз; електроніка; полімерні композити.

MODERN APPROACHES TO THE SYNTHESIS AND APPLICATION OF DISPERSED TITANATES IN CHEMICAL TECHNOLOGY AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Y. NESVYATYPASKA, A. LYTVYN, O. DIMOSHENKO, Y. SURZHOK, D. IVASHCHENKO, S. SLAVHORODSKYI

Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT An extended literature analysis of modern scientific studies devoted to the synthesis, structural features, and functional properties of dispersed alkaline earth metal titanates, namely CaTiO_3 , SrTiO_3 , BaTiO_3 , and MgTiO_3 is presented. The main methods for obtaining nanodispersed titanates are considered, including solid-state synthesis, hydrothermal methods, sol-gel technologies, and the Pechini process, and their influence on phase composition, degree of crystallinity, particle morphology, and surface activity of the materials is analyzed. The results of X-ray diffraction analysis, infrared spectroscopy, and electron microscopy are summarized, confirming the formation of a perovskite-type ABO_3 structure with a high level of structural ordering. It is shown that synthesis conditions and particle size significantly affect the specific surface area, band gap width, and photocatalytic activity of titanates. Particular attention is paid to the relationship between the morphological characteristics of nanoparticles and their functionality in environmental, energy, and biomedical applications. It has been established that calcium, strontium, and barium titanates exhibit high potential as photocatalysts for water purification, effective fillers for polymer composites with improved dielectric properties, and bioactive materials for the formation of implant coatings. Modern approaches to the modification of titanate structure and surface aimed at enhancing their functional efficiency are summarized, and prospects for further research related to the optimization of synthesis parameters, the development of hybrid materials, and the design of scalable technologies for industrial implementation are outlined. The role of doping, defect structure, and surface functionalization in regulating the optical, electrical, and catalytic properties of titanates is analyzed separately, opening opportunities for their targeted application in photocatalytic, sensor, and energy-saving

systems. The relevance of transitioning from laboratory-scale methods to reproducible and resource-efficient synthesis technologies is emphasized.

Keywords: titanates; dispersed materials; synthesis; photocatalysis; electronics; polymer composites.

Вступ

У розвитку сучасного матеріалознавства та хімічної технології все більшого значення набувають дослідження, спрямовані на створення неорганічних матеріалів із наперед заданими властивостями, здатних стабільно функціонувати в умовах інтенсивних технологічних і експлуатаційних навантажень. У цьому контексті особливий інтерес становлять оксидні сполуки з перовскітною або перовскітоподібною кристалічною будовою, серед яких титанати лужно-земельних металів (CaTiO_3 , SrTiO_3 , BaTiO_3 , MgTiO_3) вирізняються поєднанням структурної гнучкості та широкого спектра функціональних можливостей. Кристалічна ґратка типу ABO_3 створює умови для формування високої діелектричної проникності, фотокаталітичної активності, термічної стабільності та хімічної інертності, що зумовлює перспективність цих матеріалів у різних прикладних напрямках.

Водночас ефективність практичного використання титанатів значною мірою визначається технологією їх одержання. Саме метод синтезу задає фазовий склад, розмірний рівень, морфологію частинок і стан поверхні, від яких безпосередньо залежать функціональні властивості матеріалу. Традиційні твердофазні підходи, засновані на високотемпературних реакціях між вихідними компонентами, залишаються простими з точки зору реалізації та масштабування, проте часто супроводжуються інтенсивною агломерацією частинок і обмеженим контролем їх дисперсності. Це суттєво звужує можливості застосування таких порошків у системах, де вирішальними є висока питома поверхня та структурна однорідність [1].

Альтернативний напрям розвитку пов'язаний із використанням низькотемпературних і розчинних методів синтезу, зокрема сол-гель технологій, Pechini-процесу та гідротермального підходу. Застосування цих методів дозволяє цілеспрямовано формувати нанодисперсні титанати з відтворюваними характеристиками та керованими параметрами структури. Контроль умов синтезу відкриває можливості регулювання морфології, дефектної будови та поверхневих властивостей, що має вирішальне значення для фотокаталітичної активності, електрофізичних характеристик і біологічної взаємодії матеріалів.

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що титанати лужно-земельних металів успішно використовуються в електроніці, енергетичних системах, екологічних технологіях очищення води та біомедичних розробках. Показано, що ефективність таких матеріалів у фотокаталітичних процесах і в складі композиційних систем визначається

насамперед рівнем дисперсності, шириною забороненої зони та хімічним станом поверхні частинок. Разом із тим залишаються недостатньо опрацьованими питання масштабування «м'яких» методів синтезу без втрати структурної однорідності, а також стабільності властивостей титанатів у багатокomпонентних і реальних експлуатаційних середовищах [2].

У зв'язку з цим особливою актуальності набуває комплексне узагальнення літературних даних щодо способів отримання дисперсних титанатів лужно-земельних металів, аналіз їхніх структурних і поверхневих характеристик та встановлення причинно-наслідкових зв'язків між умовами синтезу й функціональними властивостями. Таке узагальнення створює наукове підґрунтя для подальшої оптимізації технологій синтезу та розроблення ресурсоефективних підходів до промислового впровадження титанатів у складі сучасних функціональних матеріалів.

Мета роботи

Метою цього дослідження є аналіз сучасного стану наукових підходів до отримання дисперсних титанатів лужно-земельних металів (CaTiO_3 , SrTiO_3 , BaTiO_3 , MgTiO_3) з акцентом на взаємозв'язок між технологічними параметрами синтезу, структурною організацією матеріалів і їх функціональними властивостями. Робота спрямована на виявлення ключових чинників, що визначають ефективність титанатів у прикладних сферах, та на формування узагальнених наукових підходів до їх цілеспрямованого проектування.

У межах поставленої мети в дослідженні розглядаються такі завдання:

- здійснити аналітичний огляд сучасних методів одержання титанатів лужно-земельних металів з урахуванням можливостей регулювання їх фазового складу та дисперсності;
- встановити залежності між умовами синтезу та формуванням кристалічної структури, морфології частинок і оптичних характеристик матеріалів;
- узагальнити практичний досвід застосування методів фізико-хімічної діагностики (XRD, SEM, FTIR, BET, UV-Vis) для дослідження дисперсних титанатів і аналізу отриманих результатів [3];
- проаналізувати напрями використання титанатів у фотокаталітичних, композиційних, електронних і біомедичних системах з позицій ефективності та стабільності;
- визначити науково обґрунтовані орієнтири подальших досліджень, пов'язаних із оптимізацією технологій синтезу та підвищенням функціональної результативності титанатів у прикладних матеріалах.

Виклад основного матеріалу Обговорення результатів

Структурні особливості та теоретичні підходи до дослідження титанатів лужно-земельних металів

Титанати лужно-земельних металів відносять до групи оксидних матеріалів з перовскітною або перовскітоподібною кристалічною організацією, для яких характерною є узагальнена формула ABO_3 [4]. У цій структурі позицію А займають катіони лужно-земельних металів (Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Mg^{2+}), тоді як катіон Ti^{4+} локалізується в центрі кисневого октаедра $[TiO_6]$. Просторова організація таких октаедрів формує каркас ґратки та створює передумови для реалізації різноманітних фізико-хімічних властивостей матеріалів. Встановлено, що варіація йонного радіуса катіона в А-позиції призводить до помітних змін параметрів елементарної комірки, ступеня деформації октаедрів, а також до модифікації електричних і зонних характеристик титанатів [5].

Серед представників цього класу сполук найбільш вивченим є кальцієвий титанат $CaTiO_3$, який відомий як природний мінерал перовскіт. За нормальних умов він має орторомбічну кристалічну симетрію, однак зі зростанням температури можливі послідовні фазові переходи до тетрагональної та кубічної модифікацій. Стронцієвий титанат $SrTiO_3$ при кімнатній температурі стабілізується в кубічній перовскітній структурі та характеризується високими діелектричними показниками. Барієвий титанат $BaTiO_3$ є особливо важливим з огляду на наявність сегнетоелектричного фазового переходу, що зумовлює його широке використання в конденсаторній та електронній техніці [6]. На відміну від зазначених сполук, $MgTiO_3$ не формує класичної перовскітної ґратки, а кристалізується за ільменітоподібним типом з тригональною сингонією, що обумовлює відмінні діелектричні та оптичні властивості цього матеріалу.

Функціональні характеристики титанатів тісно пов'язані з їхньою електронною структурою. Згідно з результатами теоретичних розрахунків, виконаних із застосуванням методів квантової хімії та теорії функціоналу густини (DFT), ширина забороненої зони для $SrTiO_3$ становить близько 3,2 еВ, для $BaTiO_3$ — близько 3,1 еВ, тоді як для $CaTiO_3$ це значення може змінюватися в інтервалі 3,3–3,5 еВ залежно від умов синтезу та ступеня дефектності кристалічної ґратки [6]. Для $MgTiO_3$ характерна ширша заборонена зона, що пов'язано з особливостями його ільменітної структури та обмежує ефективність фотокаталітичних процесів у видимій області спектра [7].

Формування валентної та провідної зон у титанатах зумовлюється переважно перекриттям орбіталей $Ti\ 3d$ та $O\ 2p$, тоді як катіони А-позиції не беруть безпосередньої участі в електронних переходах, але опосередковано впливають на зонну

структуру через викривлення та обертання октаедрів $[TiO_6]$. Така особливість відкриває можливості цілеспрямованого регулювання електронних властивостей шляхом ізовалентного або гетеровалентного заміщення катіонів у А-позиції.

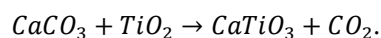
Використання теоретичних моделей дозволяє не лише інтерпретувати експериментальні дані, а й прогнозувати стабільність різних структурних модифікацій титанатів за умов зміни температури та тиску. Так, у роботах Lencka та Riman показано, що за гідротермальних умов при температурах 433–473 К для кальцієвого титанату термодинамічно найвигіднішою є перовскітна фаза, тоді як зниження температури сприяє формуванню побічних фаз, зокрема $CaCO_3$ та TiO_2 .

Методи синтезу дисперсних титанатів лужно-земельних металів

Синтез дисперсних титанатів лужно-земельних металів являє собою складний багатостадійний процес, у межах якого формується фазовий склад, розмірний рівень і морфологія частинок кінцевого продукту. У науковій літературі описано широкий спектр підходів до їх одержання, серед яких найбільш поширеними є твердофазний синтез, гідротермальні методи, сол-гель технології та Pechini-процес. Окрім того, активно розвиваються альтернативні методи, що передбачають використання мікрохвильового нагрівання, ультразвукової активації або плазмохімічних процесів.

Класичним і технологічно найпростішим підходом залишається твердофазний синтез, який ґрунтується на взаємодії оксидів (CaO , SrO , BaO , MgO) або відповідних карбонатів з діоксидом титану за високих температур у діапазоні 800–1200 °С. У ході термообробки відбувається дифузійно-контрольована реакція з формуванням перовскітної структури типу ABO_3 .

Наприклад:



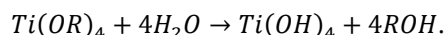
Перевагою цього підходу є технологічна простота, доступність реагентів і можливість промислового масштабування. Водночас високі температури та тривалий час випалу сприяють агломерації частинок і формуванню порошків із мікрметровими розмірами. Для зменшення цього ефекту застосовують механохімічну активацію сумішей або використання нанорозмірного TiO_2 .

Гідротермальний синтез реалізується у водних середовищах при температурах 150–250 °С і підвищеному тиску. Такий підхід дозволяє отримувати нанокристалічні титанати з високим ступенем однорідності та контрольованою морфологією. Варіювання рН, часу витримки та складу мінералізаторів дає змогу формувати

нанокуби, нанострижні або пластинчасті структури. Низька температура процесу мінімізує агломерацію, що робить метод привабливим для синтезу фотокаталітично активних матеріалів.

Сол-гель технологія базується на гідролізі та конденсації органічних прекурсорів титану з подальшим утворенням гелеподібної системи, яка після термообробки кристалізується в перовскітну фазу.

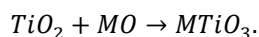
Гідроліз:



Конденсація:



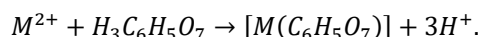
Подальше введення солей лужно-земельних металів і термічна обробка приводять до формування цільового титанату:



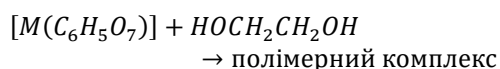
Цей метод забезпечує високу дисперсність (20–80 нм), рівномірний розподіл компонентів і можливість отримання твердих розчинів, зокрема $Ba_{1-x}Sr_xTiO_3$. Основними недоліками є висока вартість прекурсорів і чутливість процесу до умов синтезу.

Pechini-процес ґрунтується на формуванні стійких координаційних сполук між катіонами металів і органічними комплексоутворювачами, зокрема лимонною кислотою, з подальшим утворенням полімерної сітки внаслідок реакції поліестерифікації з етиленгліколем. На етапі термічної обробки відбувається контрольоване руйнування органічної матриці, що приводить до зародження та росту оксидної фази у вигляді нанорозмірних частинок, які характеризуються високим ступенем хімічної однорідності та рівномірним розподілом компонентів [8].

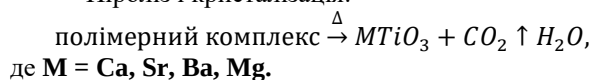
Комплексоутворення:



Поліестерифікація:



Піроліз і кристалізація:



Застосування Pechini-процесу сприяє формуванню однорідної кристалічної ґратки з рівномірним розподілом катіонів, що позитивно позначається на електрофізичних та оптичних параметрах отриманих матеріалів.

Характеристика та дисперсні властивості титанатів

Оцінка функціональних можливостей дисперсних титанатів лужно-земельних металів неможлива без комплексного аналізу їхніх структурних і поверхневих характеристик. Для цього використовують поєднання методів, спрямованих на дослідження кристалічної будови, морфології частинок, стану поверхні та оптичних властивостей. Сукупний аналіз отриманих даних дозволяє встановити причинно-наслідкові зв'язки між параметрами синтезу та властивостями порошків.

Ключовим інструментом визначення фазового складу титанатів є рентгенофазовий аналіз (XRD). За результатами дифрактометричних досліджень встановлено, що кальцієвий титанат формує орторомбічну перовскітну структуру, стронцієвий титанат стабілізується у кубічній модифікації, барієвий титанат характеризується тетрагональною симетрією, тоді як магнієвий титанат кристалізується за ільменітоподібним типом. Наявність інтенсивних і добре розділених дифракційних максимумів свідчить про високий ступінь впорядкованості та кристалічності синтезованих матеріалів.

Окрім ідентифікації фаз, метод XRD широко застосовують для оцінювання середнього розміру кристалітів, який визначають з використанням рівняння Шеррера:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta},$$

де D — розмір кристалітів, λ — довжина хвилі рентгенівського випромінювання, β — ширина піка на піввисоті, θ — дифракційний кут. Порівняння експериментальних результатів свідчить про помітні відмінності між матеріалами, отриманими з використанням різних технологічних підходів, що підтверджує визначальний вплив способу синтезу на рівень дисперсності та структурну організацію титанатів.

Вагому інформацію щодо морфологічних особливостей порошків забезпечують методи електронної мікроскопії — сканувальна (SEM) та просвітлювальна (TEM). SEM-аналіз дає змогу оцінити загальний характер поверхні частинок, їх форму, ступінь агрегації та наявність поруватої структури. Натомість використання TEM дозволяє дослідити внутрішню будову матеріалу на нанорівні, зокрема ідентифікувати окремі нанокристаліти, їх розміри, орієнтацію та межі між фазами.

Кількісну оцінку розвиненості поверхні дисперсних титанатів здійснюють за допомогою методу Брунауера–Емметта–Теллера (BET), який базується на аналізі ізотерм фізичної адсорбції газів. Питому поверхню матеріалів визначають відповідно до рівняння BET:

$$\frac{1}{v\left(\frac{p_0}{p}-1\right)} = \frac{c-1}{v_m c} \cdot \frac{p}{p_0} + \frac{1}{v_m c},$$

де v — адсорбований об'єм при відносному тиску p , v_m — об'єм мономолекулярного шару, c — константа BET.

Рівень розвитку питомої поверхні дисперсних титанатів відіграє ключову роль у реалізації їх каталізаторних і фотокаталітичних функцій, оскільки саме поверхневі ділянки слугують активними центрами взаємодії з реагентами. Зі збільшенням питомої поверхні зростає кількість доступних реакційних сайтів, що безпосередньо відображається на швидкості та ефективності каталізованих процесів.

Для аналізу хімічних зв'язків і структурних особливостей окисної ґратки широко застосовують інфрачервону спектроскопію. FTIR-спектри дозволяють ідентифікувати характерні коливальні моди, пов'язані зі зв'язками Ti–O та Ti–O–Ti, а також простежити повноту видалення залишкових органічних компонентів після стадії термообробки. Доповнювальну інформацію про симетрію кристалічної структури надає раман-спектроскопія, яка є особливо інформативною для виявлення структурних перебудов і фазових переходів у сегнетоелектричних титанатах.

Дані щодо елементного складу та хімічного стану поверхні отримують із застосуванням методів XPS та EDS. XPS-аналіз дозволяє оцінити валентний стан елементів і виявити наявність кисневих вакансій, що істотно впливають на перенесення заряду та фотокаталітичну активність. Метод EDS, у свою чергу, використовується для підтвердження стехіометрії матеріалів і рівномірності просторового розподілу компонентів у зразках.

Оптичні характеристики титанатів досліджують за допомогою спектроскопії дифузного відбиття (DRS), результати якої дають змогу визначити ширину забороненої зони шляхом побудови залежностей відповідно до методу Таука:

$$(F(R)hv)^n \propto (hv - E_g),$$

де $F(R)$ — функція Кубелки–Мунка, $n=2$ для прямих і $1/2$ для непрямих переходів. Для CaTiO_3 та SrTiO_3 характерні значення E_g у межах 3,2–3,4 еВ, що дещо вище, ніж у TiO_2 ($\approx 3,0$ –3,2 еВ), проте це зумовлює кращу стабільність матеріалів у фотохімічних реакціях [9].

Показники ζ -потенціалу широко застосовують як інструмент оцінювання стабільності дисперсних систем у рідкому середовищі. Значення цього параметра дозволяють прогнозувати схильність порошків до агрегації в суспензіях, що має принципове значення під час розроблення полімерних композитів і вибору умов їх переробки

[9]. Достатньо високі абсолютні значення ζ -потенціалу свідчать про електростатичну стабілізацію частинок і зменшення ймовірності їх злипання в об'ємі матриці.

Важливим етапом оцінки придатності титанатів до практичного використання є дослідження їх термічної поведінки. Аналіз термогравіметричних кривих (TGA) дає змогу простежити послідовні стадії втрати маси, пов'язані з видаленням адсорбованої вологи на початкових етапах нагрівання (до 150 °C), а також із розкладом залишкових органічних компонентів у температурному інтервалі 200–450 °C. Дані диференціальної сканувальної калориметрії (DSC) дозволяють ідентифікувати теплові ефекти, що супроводжують фазові перетворення та процеси кристалізації. Показано, що для матеріалів, синтезованих за Pechini-процесом, формування чистої перовскітної фази CaTiO_3 відбувається вже при температурах 700–800 °C, тоді як у разі твердофазного синтезу досягнення аналогічного структурного стану потребує значно вищих температур — до 1100–1200 °C [9].

Застосування дисперсних титанатів лужно-земельних металів

Поєднання варіативності кристалічної структури з високим рівнем функціональних характеристик зумовлює багатогалузеве використання титанатів лужно-земельних металів. Одним із найбільш розвинених напрямів є їх застосування у фотокаталітичних процесах, де CaTiO_3 , SrTiO_3 та BaTiO_3 проявляють здатність до ефективної деградації органічних барвників і токсичних домішок у водних середовищах під дією опромінення.

У складі полімерних композиційних матеріалів титанати виконують функцію активних наповнювачів, забезпечуючи зростання механічної міцності, термостійкості та діелектричних показників. Зокрема, BaTiO_3 є базовим компонентом багатошарових керамічних конденсаторів, тоді як SrTiO_3 знаходить застосування у сенсорних елементах і фотоелектрохімічних пристроях завдяки стабільним електронним характеристикам [10].

Значний інтерес викликає використання титанатів у біомедичній галузі. Кальцієвий титанат розглядається як перспективний матеріал для створення біоактивних покриттів імплантатів, що сприяють інтеграції з кістковою тканиною. Стронцієвий титанат демонструє антибактеріальний ефект, тоді як барієвий титанат, завдяки сегнетоелектричним властивостям, здатний впливати на клітинну активність через локальні електричні поля.

Обговорення і перспективи

Комплексний аналіз сучасних наукових джерел свідчить, що дисперсні титанати лужно-земельних металів утворюють широку групу функціональних

оксидних матеріалів, властивості яких формуються не лише типом кристалічної ґратки чи хімічним складом, але й сукупністю технологічних чинників, пов'язаних із процесом їх одержання. Встановлено, що саме шлях синтезу визначає характер структурної організації матеріалу — від фазового складу та розмірів кристалітів до ступеня дефектності, агрегації частинок і стану поверхневих активних центрів. У цьому контексті номінальна формула типу ABO_3 не є достатнім критерієм для прогнозування функціональної ефективності титанатів у фотокаталітичних, електротехнічних або композиційних системах.

Твердофазний синтез, попри свою технологічну простоту та відпрацьованість, і надалі залишається базовим методом промислового отримання матеріалів на основі $CaTiO_3$, $SrTiO_3$ і $BaTiO_3$. Його перевагою є можливість масштабування та стабільність фазоутворення, однак використання високих температур і тривалих режимів термообробки неминуче призводить до укрупнення зерен і зменшення питомої поверхні. Для каталізу й фотокаталітичних процесів такі особливості є суттєвим обмеженням, оскільки знижують доступність активних центрів. Додатковим недоліком є формування полідисперсної морфології та локальної хімічної неоднорідності, зумовлених дифузійним механізмом твердофазної реакції. У зв'язку з цим перспективними напрямками вдосконалення твердофазних технологій є використання попередньої механохімічної активації, оптимізація температурно-часових режимів і застосування більш реакційноздатних прекурсорів, що дозволяє знизити температуру формування перовскітної фази без втрати кристалічності [11].

Методи низькотемпературного або так званого «м'якого» синтезу — гідротермальний, сол-гель і Pechini-процес — забезпечують значно вищий рівень контролю над морфологією та дисперсністю частинок. Це робить їх особливо привабливими для екологічних і фотокаталітичних застосувань, де ефективність матеріалу безпосередньо пов'язана з площею поверхні, концентрацією активних центрів і характеристиками переносу заряду. Водночас практична реалізація таких методів супроводжується низкою викликів, серед яких — чутливість до параметрів процесу, складність масштабування без втрати однорідності та необхідність повного видалення органічних компонентів. Залишкові домішки можуть істотно впливати на оптичні властивості, поверхневу енергію та взаємодію титанатів із матрицями композитів. Тому актуальним завданням є розроблення відтворюваних протоколів синтезу з чітко окресленими інтервалами параметрів (рН, концентрації, температура, тривалість), а також використання доступних і ресурсоефективних реагентів.

Для фотокаталітичних застосувань визначальним чинником виступає оптимальний баланс між кристалічністю та дефектною структурою. Висока впорядкованість кристалічної ґратки сприяє зменшенню рекомбінації носіїв заряду та забезпечує стабільність матеріалу в багатоциклових процесах. Водночас наявність контрольованої кількості кисневих вакансій і структурних дефектів може підвищувати адсорбційну здатність поверхні та активність у реакціях окиснення або відновлення. З огляду на це подальші дослідження мають бути зосереджені на керуванні дефектністю шляхом вибору атмосфери відпалу, регулювання стехіометрії та цілеспрямованого легування, а також на створенні гетероструктур, здатних забезпечувати просторове розділення заряду й пригнічувати рекомбінаційні процеси [12].

Окремий перспективний напрям пов'язаний із модифікацією електронної структури титанатів для розширення їх спектральної чутливості у видимій області. Незважаючи на високу хімічну та фотохімічну стабільність, значна ширина забороненої зони обмежує ефективність використання титанатів за умов природного освітлення. Тому актуальними залишаються стратегії легування, створення композитів з іншими напівпровідниками або вуглецевими наноматеріалами, які покращують перенесення електронів і зменшують енергетичні втрати. Важливо, що реалізація таких підходів потребує жорсткого контролю фазової чистоти та запобігання утворенню вторинних фаз, здатних знижувати стабільність матеріалу.

У полімерних композиційних матеріалах ключову роль відіграє міжфазна взаємодія між неорганічним наповнювачем і органічною матрицею. Саме вона визначає рівномірність розподілу частинок, ступінь агрегації та ефективність поляризаційних механізмів. Практичний інтерес становлять методи поверхневої функціоналізації титанатів, спрямовані на підвищення їх сумісності з полімерними системами та стабільності дисперсій. Подальші дослідження доцільно орієнтувати на оптимізацію типу модифікаторів, зменшення діелектричних втрат і оцінку довготривалої стабільності властивостей композитів за умов змінної температури, вологості та механічних навантажень.

Біомедичні застосування титанатів демонструють значний потенціал, проте потребують поглибленого аналізу з позицій біосумісності та безпеки. Перспективність $CaTiO_3$ як біоактивного компонента та $BaTiO_3$ як матеріалу з електроактивними властивостями зумовлює необхідність системних досліджень їх взаємодії з біологічними середовищами, стабільності поверхні та можливих процесів міграції або вилугування іонів. У цьому контексті особливого значення набувають довготривалі *in vitro* та *in vivo* експерименти, стандартизація токсикологічних протоколів і

розроблення покриттів із контрольованим вивільненням активних компонентів.

З технологічної точки зору ключовим викликом залишається перехід від лабораторних методик до масштабованих і ресурсоефективних процесів, здатних забезпечувати стабільні та відтворювані властивості матеріалів. Це передбачає оптимізацію енергоспоживання, скорочення тривалості синтезу, заміну дорогих прекурсорів і впровадження методів, сумісних із безперервними виробничими лініями. Додаткові можливості відкривають адитивні технології та створення структурованих виробів, у яких дисперсні титанати виконують роль функціональних добавок із наперед заданими електричними або каталізаторними характеристиками [13].

Таким чином, подальший розвиток досліджень у сфері дисперсних титанатів лужно-земельних металів доцільно пов'язувати з поєднанням трьох взаємодоповнювальних стратегій: керування структурою та дефектністю для оптимізації фото- й електрофізичних властивостей; інженерії поверхні з метою підвищення сумісності з матрицями композитів і стабільності в робочих середовищах; а також масштабування технологій синтезу з гарантією відтворюваності та економічної ефективності. Реалізація цих підходів створює підґрунтя для переходу від фрагментарного використання титанатів до їх системного впровадження як ключових компонентів матеріалів нового покоління для екології, енергетики, електроніки та медицини.

Висновки

Проведене узагальнення актуальних наукових публікацій дає підстави стверджувати, що дисперсні титанати лужно-земельних металів становлять самостійний і перспективний напрям у розвитку функціональних оксидних матеріалів. Поєднання перовскітної або перовскітоподібної кристалічної організації з варіативністю хімічного складу забезпечує можливість цілеспрямованого формування електричних, оптичних і поверхневих характеристик цих сполук. Така структурна адаптивність зумовлює їхню придатність для використання в широкому колі технологій, зокрема в екологічних, енергетичних, електронних і медико-біологічних системах.

Установлено, що вирішальний вплив на властивості титанатів має технологічний шлях їх одержання. Саме метод синтезу визначає фазову чистоту матеріалу, розміри та форму кристалітів, рівень дефектності й характер поверхневих центрів. Низькотемпературні та розчинні підходи, включаючи гідротермальний синтез, сол-гель технології та Pechini-процес, створюють умови для формування нанодисперсних порошків із високою однорідністю та відтворюваними параметрами,

що є особливо важливим для фотокаталітичних і біомедичних застосувань. Водночас традиційний твердофазний синтез, попри обмежений контроль дисперсності, залишається технологічно привабливим завдяки простоті реалізації, доступності сировини та можливості масштабного впровадження.

Показано, що титанати кальцію, стронцію та барію вирізняються стабільністю у водних середовищах і здатністю ефективно ініціювати фотокаталітичні процеси, зокрема реакції деградації органічних забруднювачів. Крім того, поєднання високої діелектричної проникності з термічною та хімічною стійкістю робить ці матеріали ефективними дисперсними наповнювачами для полімерних композицій, де вони сприяють підвищенню механічних і електрофізичних характеристик без істотного ускладнення технології переробки.

У біомедичному напрямі найбільший інтерес становлять титанати кальцію та стронцію, які демонструють біоактивні властивості та здатність позитивно впливати на процеси остеоінтеграції при використанні як покриття імплантаційних матеріалів. Можливість регулювання поверхневих характеристик і наявність антибактеріального ефекту розширюють потенціал цих сполук для створення медичних виробів нового покоління. Разом із тим практичне впровадження нанодисперсних титанатів у медицину потребує подальших системних досліджень, спрямованих на оцінку довготривалої стабільності, біосумісності та безпеки їх використання.

Подальший розвиток досліджень у цій галузі доцільно орієнтувати на вдосконалення та масштабування керованих методів синтезу, розроблення ефективних підходів до поверхневої модифікації для підвищення сумісності з полімерними та біологічними середовищами, а також на створення гібридних і композитних матеріалів із залученням сучасних наноструктур. Важливим завданням залишається формування науково обґрунтованих стратегій керування дефектною структурою та електронними властивостями титанатів з метою підвищення їх функціональної ефективності в реальних умовах експлуатації.

Таким чином, результати проведеного аналізу підтверджують високий потенціал дисперсних титанатів лужно-земельних металів для переходу від фундаментальних досліджень до практичного застосування. Реалізація цього потенціалу можлива за умови поєднання глибокого розуміння структурно-функціональних закономірностей із розвитком відтворюваних, економічно доцільних та екологічно безпечних технологій синтезу.

Список літератури

1. Несвятипаска В. І., Тімченко А. О. Синтез і властивості нанодисперсних матеріалів на основі титанатів кальцію. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Харків, 2021. № 3. С. 55–62. doi: 10.20998/2079-5941.2021.3.08.
2. Гринь Г. І., Кузьменко О. В. Перспективи використання перовскітних матеріалів у сучасних технологіях. *Вісник Львівського університету. Серія хімічна*. 2020. Вип. 61. С. 112–120. doi: 10.30970/vch.6101.112.
3. Коваленко С. М., Яценко В. В. Фотоактивні оксидні матеріали на основі титанатів: огляд сучасних досліджень. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2019. № 4. С. 77–85. doi: 10.20535/1810-0546.2019.4.176504.
4. Мельник О. М., Сіренко Г. О. Перовскітні оксидні матеріали: структура, властивості та напрями застосування. *Український хімічний журнал*. 2020. Т. 86, № 6. С. 45–56. doi: 10.33609/0041-6045.86.6.2020.45-56.
5. Solís J. L., Valverde-Aguilar G., et al. Photocatalytic activity of alkaline earth titanates: From synthesis to environmental applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020. 8(5). P. 104168. doi: 10.1016/j.jece.2020.104168.
6. Srinivasan R., Shanmugam S., et al. Recent developments in synthesis strategies for perovskite titanates: Structure, properties and applications. *Ceramics International*. 2021. 47(17). P. 24596–24615. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.05.220.
7. Wu X., Li Y., et al. Controlled synthesis and applications of perovskite-type titanates in photocatalysis. *Applied Surface Science*. 2022. 596. P. 153565. doi: 10.1016/j.apsusc.2022.153565.
8. Kumar A., Singh K., et al. Polymer nanocomposites with titanate fillers: A review on properties and applications. *Composites Part B: Engineering*. 2020. 202. P. 108398. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108398.
9. Wadge G. Advances in barium titanate ceramics and their applications. *Materials Advances*. 2023. 4. P. 1120–1138. doi: 10.1039/D2MA00759J.
10. Gyulavári T., Abedi M., et al. Intrinsic and photocatalytic disinfection properties of CaTiO₃, SrTiO₃ and BaTiO₃ perovskites. *Ceramics International*. 2025. 51. P. 286–297. doi: 10.1016/j.ceramint.2025.07.286.
11. Jouybar S., de Leeuw N. H. Density functional theory study of alkaline earth titanate perovskites. *Journal of Physical Chemistry C*. 2024. 128. P. 17465–17477. doi: 10.1021/acs.jpcc.4c03863.
12. Бондаренко О. В., Паламарчук О. С. Структурні та функціональні властивості перовскітних оксидів для екологічних застосувань. *Український хімічний журнал*. 2019. Т. 85, № 5. С. 32–41. doi: 10.33609/0041-6045.85.5.2019.32-41.
13. Шевченко Н. В., Лисенко О. В. Оксидні наноматеріали у фотокаталітичних процесах очищення води. *Вісник Одеського національного університету. Хімія*. 2021. Т. 26, № 2. С. 45–56. doi: 10.18524/2304-0947.2021.2(76).235487.

References (transliterated)

1. Nesviatypaska V. I., Timchenko A. O. Syntez i vlastyvyosti nanodyspernykh materialiv na osnovi tytanativ kaltsiiu. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI"*. Serii: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia, Kharkiv, 2021, No. 3, pp. 55–62, doi: 10.20998/2079-5941.2021.3.08.
2. Hryn H. I., Kuzmenko O. V. Perspektyvy vykorystannia perovskitnykh materialiv u suchasnykh tekhnolohiiakh. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriiia khimichna*, 2020, Iss. 61, pp. 112–120, doi: 10.30970/vch.6101.112.
3. Kovalenko S. M., Yatsenko V. V. Fotoaktyvni oksydni materialy na osnovi tytanativ: ohliad suchasnykh doslidzhen. *Naukovi visti NTUU "KPI"*, 2019, No. 4, pp. 77–85, doi: 10.20535/1810-0546.2019.4.176504.
4. Melnyk O. M., Sirenko H. O. Perovskitni oksydni materialy: struktura, vlastyvyosti ta napriamy zastosuvannia. *Ukrainskyi khimichnyi zhurnal*, 2020, Vol. 86, No. 6, pp. 45–56, doi: 10.33609/0041-6045.86.6.2020.45-56.
5. Solís J. L., Valverde-Aguilar G., et al. Photocatalytic activity of alkaline earth titanates: From synthesis to environmental applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, Vol. 8, No. 5, 104168, doi: 10.1016/j.jece.2020.104168.
6. Srinivasan R., Shanmugam S., et al. Recent developments in synthesis strategies for perovskite titanates: Structure, properties and applications. *Ceramics International*, 2021, Vol. 47, No. 17, pp. 24596–24615, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.05.220.
7. Wu X., Li Y., et al. Controlled synthesis and applications of perovskite-type titanates in photocatalysis. *Applied Surface Science*, 2022, Vol. 596, 153565, doi: 10.1016/j.apsusc.2022.153565.
8. Kumar A., Singh K., et al. Polymer nanocomposites with titanate fillers: A review on properties and applications. *Composites Part B: Engineering*, 2020, Vol. 202, 108398, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108398.
9. Wadge G. Advances in barium titanate ceramics and their applications. *Materials Advances*, 2023, Vol. 4, pp. 1120–1138, doi: 10.1039/D2MA00759J.
10. Gyulavári T., Abedi M., et al. Intrinsic and photocatalytic disinfection properties of CaTiO₃, SrTiO₃ and BaTiO₃ perovskites. *Ceramics International*, 2025, Vol. 51, pp. 286–297, doi: 10.1016/j.ceramint.2025.07.286.
11. Jouybar S., de Leeuw N. H. Density functional theory study of alkaline earth titanate perovskites. *Journal of Physical Chemistry C*, 2024, Vol. 128, pp. 17465–17477, doi: 10.1021/acs.jpcc.4c03863.
12. Bondarenko O. V., Palamarchuk O. S. Strukturni ta funktsionalni vlastyvyosti perovskitnykh oksydiv dlia ekolohichnykh zastosuvan. *Ukrainskyi khimichnyi zhurnal*, 2019, Vol. 85, No. 5, pp. 32–41, doi: 10.33609/0041-6045.85.5.2019.32-41.
13. Shevchenko N. V., Lysenko O. V. Oksydni nanomaterialy u fotokatalitychnykh protsesakh ochyshchennia vody. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho universytetu. Khimiia*, 2021, Vol. 26, No. 2, pp. 45–56, doi: 10.18524/2304-0947.2021.2(76).235487.

Відомості про авторів (About authors)

Євгеній Несвятупаска – аспірант кафедри хімічна техніка та промислова екологія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0009-0197-3051; nesvyatipaska1997@gmail.com

Yevhenii Nesvyatypaska - Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, PhD student, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0009-0197-3051; nesvyatipaska1997@gmail.com

Аліна Литвин – Ph. D., доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічна техніка та промислова екологія, м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0007-2101-9682; alina.hrubnik@gmail.com

Alina Lytvyn - Ph. D., Associate Professor Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, Associate Professor, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0007-2101-9682; alina.hrubnik@gmail.com

Олександр Дімошенко – аспірант кафедри хімічна техніка та промислова екологія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0001-1587-1584; e-mail: sash8098@gmail.com

Oleksandr Dimoshenko - Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, PhD student, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0001-1587-1584; e-mail: sash8098@gmail.com

Євгеній Суржок – аспірант кафедри хімічна техніка та промислова екологія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0008-9740-8403; e-mail: Yevhenii.Surzhok@mit.khpi.edu.ua

Yevhenii Surzhok - Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, PhD student, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0008-9740-8403; e-mail: Yevhenii.Surzhok@mit.khpi.edu.ua

Дмитро Іващенко – аспірант кафедри хімічна техніка та промислова екологія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0005-0275-9453; e-mail: Dmytro.B.Ivashchenko@mit.khpi.edu.ua

Dmytro Ivashchenko - Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, PhD student, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0005-0275-9453; e-mail: Dmytro.B.Ivashchenko@mit.khpi.edu.ua

Станіслав Славгородський – аспірант кафедри хімічна техніка та промислова екологія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0009-6632-8811; e-mail: stanislav.slavhorodskyi@mit.khpi.edu.ua

Stanislav Slavhorodskyi - Department of Chemical Engineering and Industrial Ecology, PhD student, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0009-6632-8811; e-mail: stanislav.slavhorodskyi@mit.khpi.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Несвятупаска Є. С., Литвин А. О., Дімошенко О. М., Суржок Є. С., Іващенко Д. Б., Славгородський С. І. Сучасні підходи до отримання та використання дисперсних титанатів у хімічній технології та екологічній інженерії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 4 (26). С. 63-71. doi:10.20998/2413-4295.2025.04.10.

Please cite this article as:

Nesvyatypaska Y., Lytvyn A., Dimoshenko O., Surzhok Y., Ivashchenko D., Slavhorodskyi S. Modern approaches to the synthesis and application of dispersed titanates in chemical technology and environmental engineering. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 4(26), pp. 63-71, doi:10.20998/2413-4295.2025.04.10.

Надійшла (received) 04.11.2025

Прийнята (accepted) 21.12.2025