

**М. Д. САХНЕНКО, М. В. ВЕДЬ, Н. Б. МАРКОВА, І. І. СТЕПАНОВА, О. В. ГАЛАК, С. М. МЕНЬШОВ,
О. В. МАТИКІН**

МЕТАЛОКСИДНІ КОМПЗИТИ ДЛЯ ФОТОКАТАЛІТИЧНОЇ ДЕЗИНТЕГРАЦІЇ ТОКСИКАНТІВ

Досліджено процеси плазмово-електролітного формування гетерооксидних покриттів на сплавах титану для фотокаталітичної дезинтеграції природних і техногенних токсикантів. Синтез покриттів проводили з водних дифосфатних розчинів у гальваностатичному режимі. Для кількісного опису фотокаталітичних реакцій визначали константи швидкості реакції з лінеаризованих залежностей $\ln C_t/C_0$, де C_t – поточна концентрація азобарвника, C_0 – вихідна концентрація реактанта. Морфологію поверхні покриттів вивчали методом атомно-силової мікроскопії та візуалізували результати шляхом реконструкції рельєфу у вигляді 2D- і 3D-топографічних карт. Проаналізовано морфологічні особливості покриттів титан(IV) оксиду та гетерооксидних композитів, до складу яких входять оксиди цинку та/або міді. Показано, що ефективним чинником керування фотокаталітичною активністю покриттів залишається їх питома поверхня, тому визначення морфології гетерооксидних композитів, як і засоби керування цим параметром цільового продукту, є незмінною складовою системного дослідження таких систем при визначенні їх функціональних властивостей. Доведено, що порівняно із покриттями оксидом титану, для поверхневих шарів якого характерні тороподібні мезоструктури, гетерооксидні композиції мають більш розвинену поверхню, що збільшує їх каталітичну активність. Такий саме вплив на властивості покриттів чинить і наступна термообробка. Визначені в тотожних умовах константи швидкості модельної реакції фотокаталітичного розкладання азобарвника метилового жовтогогарячого застосовано для ранжування покриттів різного складу за їх функціональними властивостями. Так, для реакції на поверхні оксиду титану значення константи швидкості становить $1,56 \cdot 10^{-3} \text{ хв}^{-1}$, тоді як для гетерооксидного шару $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ зростає до $5,8 \cdot 10^{-3} \text{ хв}^{-1}$. Покритв $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ є найбільш каталітично активним, хоча система $\text{TiO}_2\text{-ZnO-CuO}$ також прискорює процес розкладання зі ступенем деструкції 25 % протягом 60 хв, але далі ефективність каталізатору знижується.

Ключові слова: плазмово-електролітне окисдування, сплави титану, фотокаталіз, гетерооксидні покриття, морфологія поверхні.

**Н. Д. САХНЕНКО, М. В. ВЕДЬ, Н. Б. МАРКОВА, И. И. СТЕПАНОВА, А. В. ГАЛАК, С. Н. МЕНЬШОВ,
А. В. МАТЫКИН**

МЕТАЛЛОКСИДНЫЕ КОМПЗИТЫ ДЛЯ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ТОКСИКАНТОВ

Исследованы процессы плазменно-электролитического формирования гетерооксидных покрытий на сплавах титана для фотокаталитической дезинтеграции природных и техногенных токсикантов. Синтез покрытий проводили из водных дифосфатных растворов в гальваностатическом режиме. Для количественного описания фотокаталитических реакций вычисляли константы скорости реакции из линейризованных зависимостей $\ln C_t/C_0$, где C_t – текущая концентрация азокрасителя, C_0 – исходная концентрация реактанта. Морфологию поверхности покрытий изучали методом атомно-силовой микроскопии и визуализовали результаты путем реконструкции рельефа в виде 2D- и 3D-топографических карт. Проанализованы морфологические особенности покрытий титан(IV) оксида и гетерооксидных композитов, в состав которых входят оксиды цинка и/или меди. Показано, что эффективным фактором управления фотокаталитической активностью покрытий остается их удельная поверхность, поэтому установление морфологии гетерооксидных композитов, как и способов управления этим параметром целевого продукта, является неизменной составляющей системного исследования таких материалов при установлении их функциональных свойств. Установлено, что в сравнении с покрытиями оксидом титана, для поверхностных слоев которого характерны торообразные мезоструктуры, гетерооксидные композиции имеют более развитую поверхность, что позитивно влияет на их каталитическую активность. Такое же воздействие на свойства покрытий оказывает и последующая термообработка. Определенные в аналогичных условиях константы скорости модельной реакции фотокаталитического разложения азокрасителя метилового оранжевого использованы для ранжирования покрытий различного состава по их функциональным свойствам. Так, для реакции на поверхности оксида титана значение константы скорости составляет $1,56 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$, тогда как для гетерооксидного слоя $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ возрастает до $5,8 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$. Покрытие $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ является наиболее каталитически активным, хотя система $\text{TiO}_2\text{-ZnO-CuO}$ также ускоряет процесс разложения со степенью деструкції 25 % в течение 60 мин, далее эффективность каталізатора снижается.

Ключевые слова: плазменно-электролитическое окисдувание, сплавы титана, фотокаталіз, гетерооксидные покрытия, морфология поверхности.

**M. D. SAKHNENKO, M. V. VED', N. B. MARKOVA, I. I. STEPANOVA, O. V. HALAK, S. M. MENSHOV,
O. V. MATYKIN**

METALOXIDE COMPOSITES FOR PHOTOCATALYTIC DISINTEGRATION OF TOXICANTS

The processes of plasma-electrolytic formation of heteroxide coatings on titanium alloys for the photocatalytic disintegration of natural and technogenic toxicants are studied. Synthesis of coatings was carried out from aqueous diphosphate solutions in the galvanostatic mode. For a quantitative description of photocatalytic reactions, reaction rate constants were calculated from the linearized dependences $\ln C_t/C_0$, where C_t is the current concentration of the azodye and C_0 is the initial concentration of the reactant. The surface morphology of the coatings was studied by atomic

© М. Д. Сахненко, М. В. Ведь, Н. Б. Маркова, І. І. Степанова, О. В. Галак та ін., 2020

force microscopy and visualized the results by reconstructing the relief in the form of 2D and 3D topographic maps. The morphological features of titanium (IV) oxide coatings and heteroxide composites containing zinc and / or copper oxides are analyzed. It has been shown that the specific surface remains an effective factor in controlling the photocatalytic activity of coatings; therefore, the establishment of the morphology of heteroxide composites, as well as methods for controlling this parameter of the target product, is an invariable component of a systematic study of such materials when establishing their functional properties. It is established that, in comparison with titanium oxide coatings, whose surface layers are characterized by toroidal mesostructures, heteroxide composites have a more developed surface, which positively affects their functional properties. Subsequent heat treatment also has the same effect on coating properties. The rate constants of the photocatalytic decomposition of the methyl orange azo dye, determined under similar conditions, were used to rank coatings of various compositions according to their functional properties. Thus, for the reaction on the surface of titanium oxide, the rate constant is $1.56 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$, while for the heteroxide layer $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ it increases to $5.8 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. The coating of $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ is the most catalytically active, although the $\text{TiO}_2\text{-ZnO-CuO}$ system also accelerates the decomposition process with a degree of degradation of 25% for 60 minutes, further, the efficiency of the catalyst decreases.

Keywords: plasma-electrolytic oxidation, titanium alloys, photocatalysis, heteroxide coatings, surface morphology.

Вступ. Вирішення багатьох науково-технічних і екологічних проблем сьогодення може бути реалізовано із широким впровадженням високоефективних методів перетворення хімічних речовин – наносинтезу, нанокаталізу та ін. До ланцюга таких технологій повною мірою відносять і безреагентні методи знешкодження токсикантів природного і техногенного походження, яскравим проявом необхідності застосування яких є не тільки значні обсяги твердих відходів, а й суттєве забруднення повітряного і водного басейнів токсикантами різної природи. За таких умов у ряд нагальних постає проблема забезпечення функціонування об'єктів життєдіяльності та мобільних засобів військового і цивільного призначення, особливо в зонах проведення ООС, шляхом знешкодження техногенних забруднень, зумовлених витоком токсичних речовин із зруйнованих об'єктів інфраструктури, зниження токсичних викидів транспортних двигунів та ін. [1, 2]. Конче необхідним вбачається і застосування новітніх технологій для удосконалення фільтровентиляційних систем з метою облаштування стаціонарних і мобільних транспортних засобів [3].

Серед безреагентних методів чільне місце посідають методи гетерогенного каталізу, особливо – фотокаталізу. Фотокаталіз належить до процесів прискорення хімічних реакцій (окиснення або відновлення) активацією каталізатора, зазвичай оксиду металу, ультрафіолетовим або видимим випромінюванням. В поточний час фотокаталіз визначають як «зміну швидкості або збудження хімічних реакцій під дією світла за присутності речовин (фотокаталізаторів), які поглинають кванти світла і беруть участь у хімічних перетвореннях реагентів, багаторазово вступаючи з ними у проміжну взаємодію і регенеруючи свій хімічний склад після кожного циклу таких взаємодій» [4]. Останнім часом він стає доволі розповсюдженим методом для очищення води і повітря від органічних, а в деяких випадках і неорганічних сполук [5]. Як фотокаталізатори, насамперед, розглядають такі напівпровідникові матеріали, як TiO_2 , ZnO ,

CdS , Fe_2O_3 і WO_3 , у т.ч. модифіковані різними елементами як в об'ємі, так і на поверхні, та композити на їх основі [6]. Серед наведених фотокаталізаторів найбільш привабливим є титану (IV) оксид (TiO_2) завдяки хімічній інертності і нетоксичності, проте відомо, що складні двохкомпонентні оксидні системи виявляють значно вищу активність і селективність [7, 8].

Механізм утворення фотоактивної поверхні каталізатора включає утворення дірок у валентній зоні і електронів у зоні провідності за рахунок поглинання фотона енергії, яка більша або дорівнює ширині забороненої зони напівпровідника (для TiO_2 ширина забороненої зони дорівнює: для рутилу — 3,0 eV, для анатазу — 3,2 eV) [9]. При цьому дірки сприяють утворенню гідроксидних радикалів і окисненню органічних сполук, а електрони — утворенню супероксидних радикалів і реакціям розкладання та окиснення [10]. Отже, фотокаталітична активність напівпровідникових структур (зокрема, TiO_2) зумовлюється гідроксидними і супероксидними радикалами. Таким чином, для ефективного проведення фотокаталітичного процесу TiO_2 повинен мати високу питому площу поверхні та меншу ширину забороненої зони, оскільки довжина хвилі світла, яка необхідна для фотоактивації поверхні титану (IV) оксиду, має бути меншим за 390 нм. За таких умов створення затребуваного каталізатора на основі TiO_2 з підвищеною ефективністю є важливим науково-практичним завданням, вирішення якого передбачає визначення умов синтезу матеріалу з високорозвиненою поверхнею, зменшеною шириною забороненої зони та підвищеним ресурсом в умовах експлуатації [11]. Комплексне розв'язання такого завдання вбачається у розробці наукового підґрунтя керованого синтезу покривів гетерооксидними та/або легованими оксидами титану (IV) на поверхні металевих носіїв, з домінантою використання в ролі носія сплавів титану, зокрема і поруватих, із застосуванням електрохімічних технологій. Зрозуміло, що вельми ефективним чинником керування фотокаталітичною активністю покривів залишається їх питома

поверхня, тому визначення морфології гетерооксидних композитів, як і засоби керування цим параметром цільового продукту, є незмінною складовою системного дослідження таких систем при визначенні їх функціональних властивостей.

У гетерогенному фотокаталізі беззаперечно визнана важливість ролі координаційної ненасиченості поверхневих атомів (центрів). Існує безліч прикладів того, що нанесені системи значно активніші, ніж масивні оксиди. Саме таким чином можна забезпечити, по-перше, підвищення ресурсу нанесеного покриття фотокаталізатора у порівнянні з дисперсним матеріалом, по-друге, керувати питомою поверхнею синтезованого матеріалу за рахунок змінення параметрів електролізу та, по-третє, здійснювати легування оксидних структур з утворенням гетерооксидних або композитних покриттів. Зауважимо, що властивості оксиду титану залежать від його структурно-морфологічних особливостей та хімічних різновидів. Як відомо, титан (IV) оксид існує в трьох модифікаціях: рутил, анатаз і брукіт, серед яких як фотокаталізатор традиційно використовується анатаз, що накладає деякі обмеження на процес синтезу або вимагає подальшої обробки одержаних матеріалів для переведення їх в необхідну модифікацію. Крім того, з метою зменшення ширини забороненої зони титану (IV) оксид модифікують. Модифікація досягається за рахунок допування металами, створення композитів на основі двох напівпровідників, оксидних нанесених систем тощо [8, 12–14]. Створення композитів (у т.ч. гетероструктур) на основі двох напівпровідників становить перспективний напрям для збільшення ефективності фотокаталітичного процесу завдяки кращому розподілу зарядів і розширенню діапазону діючого світла [15].

Методика експерименту. Покриття титан(IV) оксидом та гетерооксидні композиції (ГОК) синтезували плазмово-електролітним оксидуванням на підкладках зі сплаву титану VT1-0 [16] з водних розчинів складу $K_4P_2O_7$ – 1,0 моль/дм³ із додаванням 0,5 моль/дм³ фази оксидів. ПЕО здійснювали постійним струмом густиною $i = 4,0$ А/дм² та напрузі формування $U = 150$ протягом 30 хв. Термообробку зразків з оксидним покритвом проводили при 500°C протягом 20 хв. Фотокаталітичні властивості покриттів тестували в модельній реакції окиснення азобарвника метилового жовтогогарячого (МЖБ). Дослідження проводили в термостатованому фотокаталітичному реакторі при температурі 25°C і безперервному перемішуванні, концентрація барвника становила $1,22 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³ (C_0). Розчин МЖБ (рН 6,3) з зануреними пластинами носіїв, на поверхню яких було нанесено

фотокаталітичні монооксидні TiO_2 , гетерооксидні $TiO_2 \cdot ZnO$ та $TiO_2 \cdot CuO$, а також багатокомпонентні оксидні $TiO_2 \cdot ZnO \cdot CuO$ покриття, опромінювали ртутною лампою DeLux EBT-01, що випромінювала м'який ультрафіолет А. Попередньо всі розчини з зануреними каталізаторами витримували в темряві для встановлення адсорбційної рівноваги протягом 60 хв. Вміст барвника МЖБ в реакторі визначали через рівні проміжки часу фотоколориметрично. Паралельно досліджували процес окиснення МЖБ без ультрафіолетового опромінювання та за відсутності фотокаталізатора. Для кількісного опису фотокаталітичних реакцій визначали константи швидкості реакції з лінеаризованих залежностей $\ln C_t/C_0$, де C_t – поточна концентрація азобарвника, C_0 – вихідна концентрація реактанта. Морфологію поверхні покриттів вивчали методом атомно-силової мікроскопії (АСМ) з допомогою мікроскопа NT-206. Сканували за допомогою контактного зонда CSC-37 (латеральна і вертикальна роздільна здатність 2 і 0,2 nm відповідно; зонд – кантілівер В, радіус наконечника 10 nm). Візуалізували результати шляхом реконструкції рельєфу у вигляді 2D- і 3D-топографічних карт.

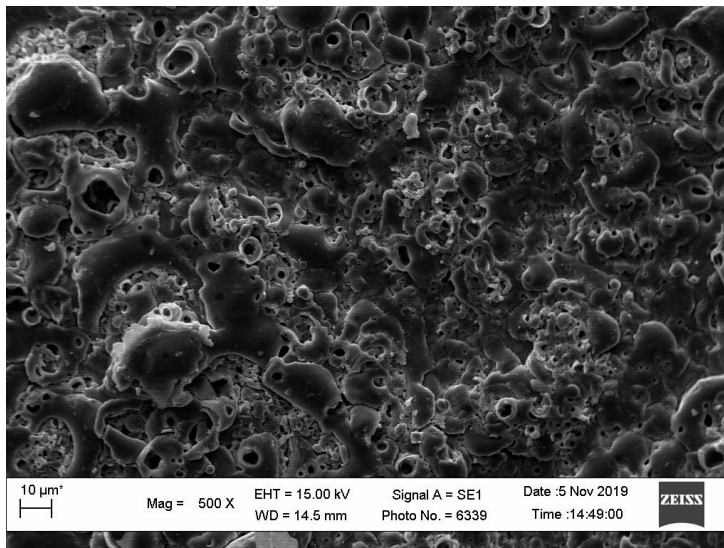
Результати та їх обговорення. Нанесені в режимі плазмово-електролітного оксидування сплавів титану моно- та гетерооксидні покриття відзначаються міцним зчепленням з основою та характерною морфологією поверхні, зумовленою перебігом процесів окиснення з утворенням локальних каналів термічного та/або електричного руйнування оксидної плівки, в околі яких відбувається окиснення ювенільної поверхні титану, утворення газових пухирів, що відіграють роль поляризованих електродів, високотемпературне переплавлення електроліту з наступною кристалізацією розчинених компонентів і т.і. Саме такі умови формування покриття і обумовлюють його елементний склад та наявність тороподібних мезоструктур, приклад яких наведено на рис. 1

При детальному дослідженні морфології синтезованих покриттів було встановлено, що у порівнянні з вихідною структурою TiO_2 , (рис. 2, а) гетерооксидні покриття $TiO_2 \cdot ZnO$ (рис 2, б) мають більш розвинену поверхню, яка в подальшому зростає та набуває рівномірного розподілу глобулярних структур і мікропор при термообробці (рис. 2, в). Таким чином, слід відзначити, що термообробка гетерооксидних покриттів сприяє принаймні поліпшенню двох чинників фотокаталітичного процесу – по-перше, титану (IV) оксид переходить в більш активну форму – анатаз, та, по-друге, відбувається зростання істинної (питомої) поверхні покриття. Імовірно саме комбінація обох чин-

ників впливу очікувано сприятиме зростанню ефективності фотокаталітичних перетворень за участю ГОК.

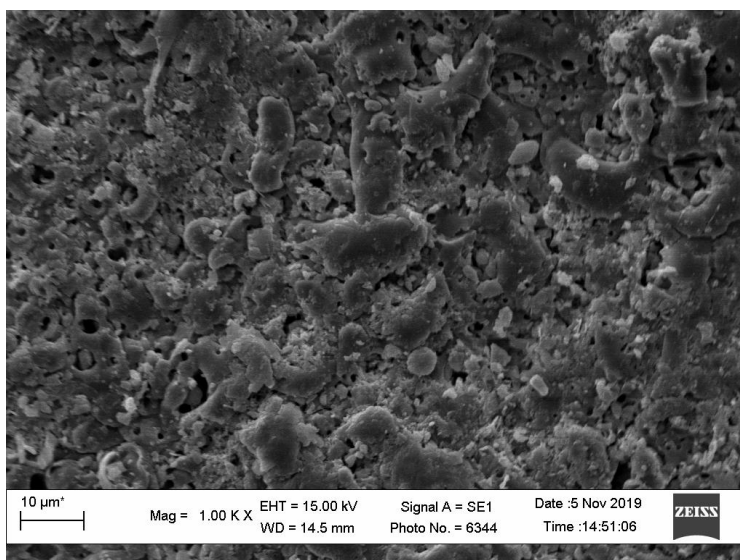
Хронограму змінення концентрації МЖБ, яка відбиває кінетику розкладання речовини, за присутності покривів $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$, сформованих у режимі ПЕО, залежно від концентрації МЖБ у розчині та термообробки зразків надано на рис. 3. Як видно з рис. 3, ка-

талітична активність матеріалу дещо зростає внаслідок наступної термообробки під впливом проаналізованих вище чинників, а збільшення концентрації барвника навіть підвищує ступінь перетворення з 22,6 % за 60 хв при $c(\text{МЖБ}) = 1,15 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³ до 25,5 % при $c(\text{МЖБ}) = 1,22 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³.



Ti – 31,7; O – 44,2; P – 18,8; Zn – 5,3 мас. %

a



Ti – 26,4; O – 42,1; P – 21,0; Cu – 9,7; Zn – 0,8 мас. %

б

Рисунок 1 – Морфологія поверхні та елементний склад покривів $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ (а) $\text{TiO}_2\text{-CuO-ZnO}$ (б), сформованих у режимі ПЕО на сплаві титану ВТ1-0

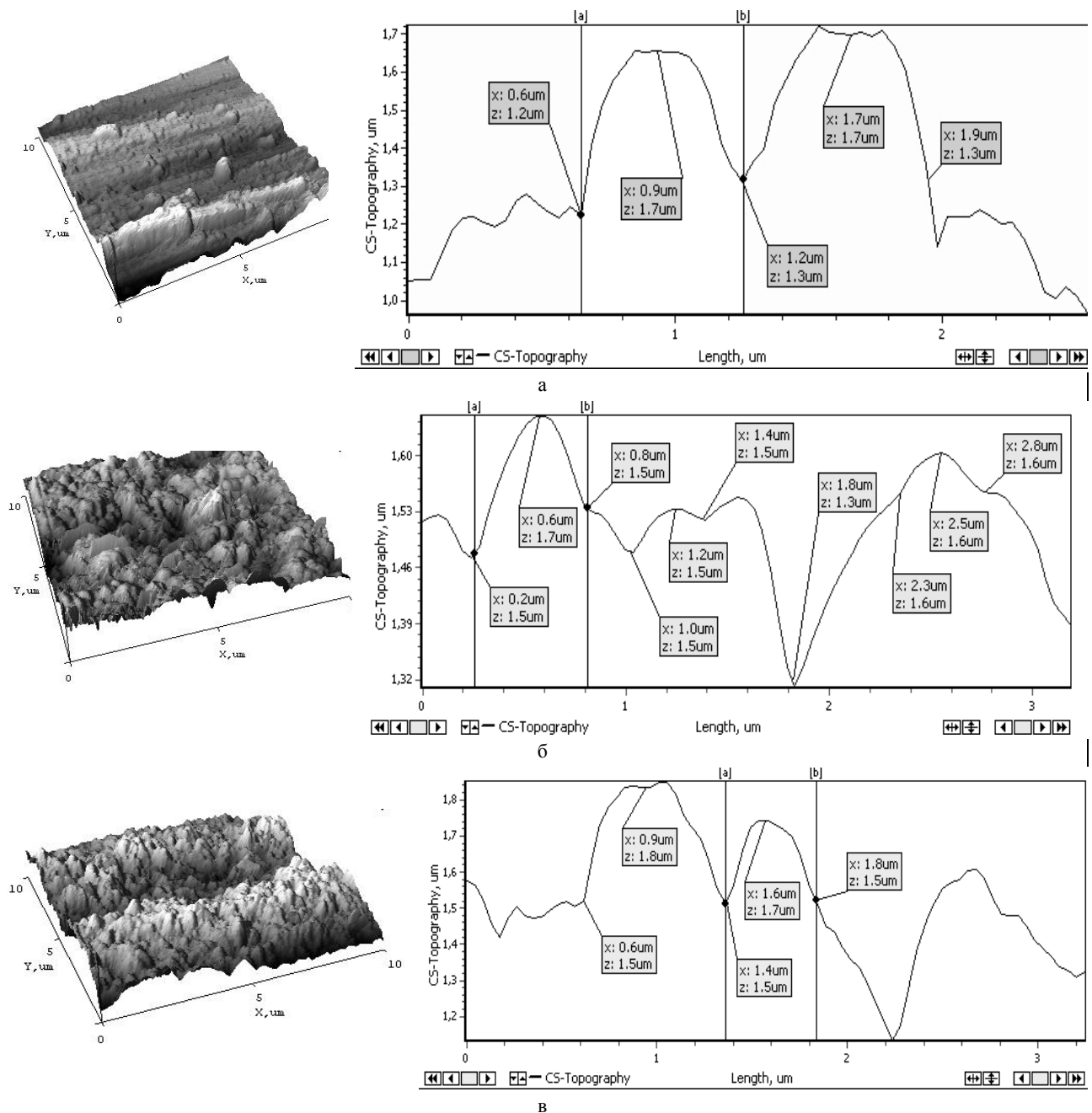


Рисунок 2 – 3D-карти та профіль поверхні оксидного покриття TiO_2 (а) і гетерооксидного покриття $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ до прожарювання (б) та після прожарювання (в). Площа сканування 10×10 мкм.

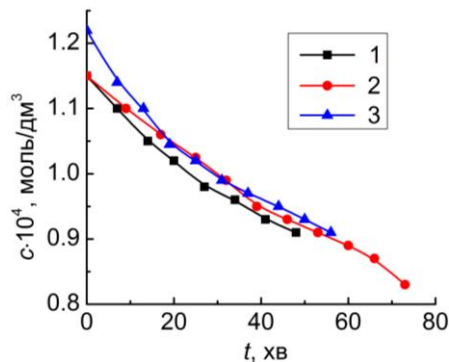
Було встановлено (рис. 4), що ГОК титан (IV) оксиду з оксидами цинку і міді виявляють вищу каталітичну активність порівняно із TiO_2 . Головною причиною зростання ефективності ГОК по відношенню до TiO_2 , є ефект синергізму, умови для реалізації якого закладені в технології ПЕО. Це дозволяє створювати вельми ефективні плівкові фотокаталітичні нейтралізатори.

Порівняння результатів дослідження фотодеструкції барвника МЖБ (концентрація $1,22 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³) на різних матеріалах (рис.4) свідчить, що

змішаний оксидний шар $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ є найбільш каталітично активним, хоча система $\text{TiO}_2\text{-ZnO-CuO}$ також прискорює розкладання барвника зі ступенем деструкції 25 % протягом 60 хв, але після 1 год ефективність каталізатору знижується порівняно із $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$.

Дослідження механізму розкладання МЖБ за присутності синтезованих фотокаталітичних матеріалів шляхом лінеаризації кінетичних залежностей в координатах $\ln C_t/C_0 - t$ довели перший порядок реакції. Розраховані з означених лінеаризованих залежностей константи швидкості реакції k_f дозволяють про-

вести порівняльний аналіз впливу матеріалу фотокаталітичного покриття на процес деструкції МЖБ. Так, для реакції за присутності оксиду титану (рис.4) значення k_f становить $1,56 \cdot 10^{-3} \text{ хв}^{-1}$, тоді як за таких же умов експерименту для гетерооксидного шару $\text{TiO}_2 \cdot \text{ZnO}$ зростає до $5,8 \cdot 10^{-3} \text{ хв}^{-1}$.



1 – без термообробки, 2 – термооброблений,
1, 2 – $c(\text{MO}) = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$;
3 – термооброблений, $c(\text{МЖБ}) = 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$

Рисунок 3 – Фотодеструкція МЖБ на ПЕО покритвах $\text{TiO}_2 \cdot \text{ZnO}$

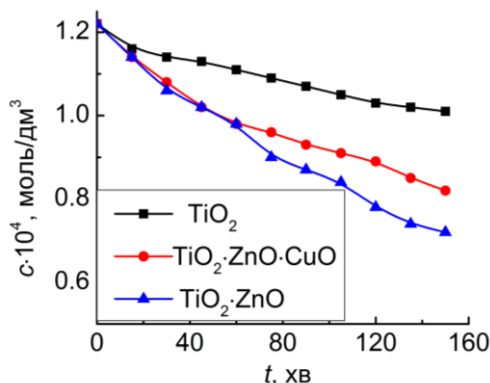


Рисунок 4 – Хронограми змінення концентрації МЖБ на каталізаторах різного складу

Цілком природним для вичерпної характеристики фотокаталітичного покриття вбачається визначення фактору синергізму для гетерооксидних композицій [17], проте коректною така процедура має бути лише за сталого вмісту оксидів, оскільки вміст оксидів титану і цинку в складі ГОК різняться в декілька разів (див. рис. 1), а відмінність вмісту TiO_2 і CuO ще більш значуща. Проте встановлено, що залежно від умов синтезу вміст індивідуальних сполук у складі гетерооксидного покриття можна змінювати в доволі широких межах, тому визначення такого чинника впливу на перебіг цільового процесу потребує додаткових досліджень, що є наступним етапом роботи.

Таким чином, застосуванням плазмово-електролітного синтезу можна формувати на сплавах титану гетерооксидні покриття з варійованим вмістом компонентів для потреб фотокаталітичної дезинтеграції природних і техногенних токсикантів.

Висновки

За результатами проведених досліджень встановлено доцільність формування гетерооксидних покриттів на сплавах титану для потреб фотокаталітичної дезинтеграції природних і техногенних токсикантів. Дослідженням морфологічних особливостей структури покриттів доведено, що у порівнянні з оксидом титану гетерооксидні покриття мають більш розвинену поверхню, що позитивно впливає на їх функціональні властивості. Визначені в тотожних умовах реалізації константи швидкості реакції фотокаталітичного розкладання азобарвника метилового жовтогогарячого застосовано для ранжування покриттів різного складу за їх функціональними властивостями.

Список літератури

1. Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis / A. Karakurkchi, M. Sakhnenko, M. Ved', A. Galak, S. Petrukhin // Eastern-European Journal of Interprize Technologies, 2017. – Vol. 5, № 10 (89). – P. 12-18
2. Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety / M.V. Ved', N.D. Sakhnenko, A.V. Karakurkchi, T.Y. Myrna // Functional materials, 2017. - Vol. 24. № 2. – P.303-310
3. Halak O., Menshov S. The use of photocatalytic technology for the disintegration of hazardous chemical substances / International Scientific Conference Relevant Issues of the Development of Science in Central and Eastern European Countries: Conference Proceedings, September 27th, 2019. Riga, Latvia: Baltija Publishing. –P.29-32.
4. Пармон В.Н. Фотокатализ: Вопросы терминологии // Фотокаталитическое преобразование солнечной энергии / Ред. К.И. Замараев, В.Н. Пармон. - Новосибирск: Наука, 1991. – С. 7–17
5. Khairy M., Zakaria W. Effect of metal-doping of TiO_2 nanoparticles on their photocatalytic activities toward removal of organic dyes // Egyptian Journal of Petroleum, 2014. – Vol. 23. – P. 419–426
6. Донцова Т.А., Бредихін І.В. Механізм фотокаталізу на поверхні TiO_2 // Наукові вісті НТУУ "КПІ", 2013. – № 3. - С.111– 118.
7. Сахненко Н.Д., Ведь М.В., Майба М.В. Конверсионные и композиционные покрытия на сплавах титана : монография. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. – 176 с.
8. Adriana Zaleska Doped- TiO_2 : A Review // Recent Patents on Engineering, 2008. – Vol. 2. – P. 157-164
9. Herrmann J.-M. Heterogeneous photocatalysis: state of the art and present applications// Topics in Catalysis, 2005.- Vol. 34, №. 1-4. – P. 49–65.
10. Vinu R., Madras G. Environmental remediation by photocatalysis // J. of the Indian Institute of Sci., 2010. - Vol. 90, №. 2. – P. 189–230.
11. Photoactive Inorganic Nanoparticles: Surface Composition and Nanosystem Functionality (Micro and Nano Technologies Series) / Edited by Julia Pérez Prieto, María González Béjar. – Elsevier,

- 2019 – 284 p.
12. Соболева Н.М., Носонович А.А., Гончарук В.В. Гетерогенный фотокатализ в процессах обработки воды // Химия и технология воды, 2007. – Т.29, № 2. – С.125-159.
 13. Fang-Xing Xiao. Construction of highly ordered ZnO-TiO₂ nanotube arrays (ZnO/TNTs) heterostructure for photocatalytic application // ACS Applied Materials & Interfaces, 2012. – Vol. 4, №12. – P.7055-7063
 14. Nickel- and Copper-Containing Oxide Films on Titanium / M. S. Vasil'eva, V. S. Rudnev, A. Yu. Ustinov at all // Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2009. – Vol. 54, No. 11. – P. 1708–1712
 15. Kudo A. Photocatalyst materials for water splitting // Catalysis Surveys from Asia, 2003. – Vol. 7, № 1. - P. 31–38.
 16. Sakhnenko N.D., Ved' M.V., Karakurkchi A.V. Nanoscale Oxide PEO Coatings Forming from Diphosphate Electrolytes. Chapter 38: in the book Nanophysics, Nanomaterials, Interface Studies, and Applications: O. Fesenko, L. Yatsenko (eds.). – Springer AG, 2017. - V. 195. – P.507–531.
 17. Sakhnenko N.D., Ved' M.V., Bykanova V.V. Characterization and photocatalytic activity of Ti/TinOm-ZrxOy coatings for azo-dye degradation // Functional materials, 2014. - Vol. 21, № 4. – P. 492-497.
 - 419–426
 6. Dontsova T.A., Bredikhin I.V. Mechanism fotokatalizu na povrkhni TiO₂ // Naukovi visti NTUU "KPI", 2013. – № 3. – P.111–118.
 7. Sakhnenko N.D., Ved M.V., Mayba M.V. Konversionnie i kompozitsionnie pokrytia na splavah titana : monogtaphia. – Kharkov : NTU «KhPI», 2015. – 176 p.
 8. Adriana Zaleska Doped-TiO₂: A Review // Recent Patents on Engineering, 2008. – Vol. 2. – P. 157-164
 9. Herrmann J.-M. Heterogeneous photocatalysis: state of the art and present applications// Topics in Catalysis, 2005.- Vol. 34, №. 1-4. – P. 49–65.
 10. Vinu R., Madras G. Environmental remediation by photocatalysis // J. of the Indian Institute of Sci., 2010. - Vol. 90, №. 2. – P. 189–230.
 11. Photoactive Inorganic Nanoparticles: Surface Composition and Nanosystem Functionality (Micro and Nano Technologies Seris) / Edited by Julia Pérez Prieto, María González Béjar. – Elsevier, 2019 – 284 p.
 12. Soboleva N.M., Nosonovich A.A., Goncharuk V.V. Heterogennij fotokataliz v processah obrabotki vody // Khimia i tekhnologia vody, 2007. – Vol.29, № 2. – P.125-159.
 13. Fang-Xing Xiao. Construction of highly ordered ZnO-TiO₂ nanotube arrays (ZnO/TNTs) heterostructure for photocatalytic application // ACS Applied Materials & Interfaces, 2012. – Vol. 4, №12. – P.7055-7063
 14. Nickel- and Copper-Containing Oxide Films on Titanium / M. S. Vasil'eva, V. S. Rudnev, A. Yu. Ustinov at all // Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2009. – Vol. 54, No. 11. – P. 1708–1712.
 15. Kudo A. Photocatalyst materials for water splitting // Catalysis Surveys from Asia, 2003. – Vol. 7, № 1. - P. 31–38.
 16. Sakhnenko N.D., Ved' M.V., Karakurkchi A.V. Nanoscale Oxide PEO Coatings Forming from Diphosphate Electrolytes. Chapter 38: in the book Nanophysics, Nanomaterials, Interface Studies, and Applications: O. Fesenko, L. Yatsenko (eds.). – Springer AG, 2017. - V. 195. – P.507–531.
 17. Sakhnenko N.D., Ved' M.V., Bykanova V.V. Characterization and photocatalytic activity of Ti/TinOm-ZrxOy coatings for azo-dye degradation // Functional materials, 2014. - Vol. 21, № 4. – P. 492-497

References (transliterated)

1. Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis / A. Karakurkchi, M. Sakhnenko, M. Ved', A. Galak, S. Petrukhin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. –Vol. 5, № 10 (89). – P. 12-18
2. Functional mixed cobalt and aluminum oxide coatings for environmental safety / M.V. Ved', N.D. Sakhnenko, A.V. Karakurkchi, T.Y. Myrna // Functional materials, 2017. - Vol. 24, № 2. – P.303-310
3. Halak O., Menshov S. The use of photocatalytic technology for the disintegration of hazardous chemical substances / International Scientific Conference Relevant Issues of the Development of Science in Central and Eastern European Countries: Conference Proceedings, September 27th, 2019. Riga, Latvia: Baltija Publishing. –P.29-32.
4. Parmon V.N. Fotokataliz : Voprosy terminologii // Fotokataliticheskoe preobrazovanie solnechnoj energii / Red. K.I. Zamaraev, V.N. Parmon. - Novosibirsk: Nauka, 1991. – P. 7–17
5. Khairy M., Zakaria W. Effect of metal-doping of TiO₂ nanoparticles on their photocatalytic activities toward removal of organic dyes // Egyptian Journal of Petroleum, 2014. – Vol. 23. – P.

Надійшло (received) 20.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сахненко Микола Дмитрович (Сахненко Николай Дмитриевич, Sakhnenko Mykola) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичної хімії, Харків, тел.: (057) 707-63-27, e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Ведь Марина Віталіївна (Ведь Марина Витальевна, Ved' Maryna) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри загальної та неорганічної хімії, Харків; тел.: (057) 707-61-04, e-mail: vmv@kpi.kharkov.ua.

Маркова Наталія Борисівна (Маркова Наталья Борисівна, Markova Natalia) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри фізичної хімії, Харків; тел.: (057) 707-68-27, e-mail: nmarkova58@ukr.net.

Степанова Ірина Ігорівна (Степанова Ирина Игоревна, Stepanova Irina) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної та неорганічної хімії, Харків; тел.: (057) 707-68-20, e-mail: stepanova@kpi.kharkov.ua.

Галак Олександр Валентинович (Галак Александр Валентинович, Halak Aleksandr) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», начальник кафедри Військового інституту танкових військ, Харків; тел.: тел.: (057) 372-61-67, e-mail : galak79@gmail.com.

Меньшов Сергій Миколайович (Меньшов Сергей Николаевич, Menshov Sergey) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Військового інституту танкових військ, Харків; тел.: тел.: (057) 372-61-67, e-mail : menshov2277@gmail.com.

Матикін Олексій Володимирович (Матыкин Алексей Владимирович, Matykin Aleksey) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Військового інституту танкових військ, Харків; тел.: тел.: (057) 372-61-67, e-mail e-mail : lelik19798089@gmail.com.