

ФІЗИКА МАТЕРІАЛІВ

ORCID: 0000-0001-8267-8365

Д. І. Коломієць

Аспірант кафедри фізики, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси,
Україна,
denyskolomiiets95@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8434-1544

М. О. Пасічний

Кандидат фіз.-мат. наук, доцент,
завідувач кафедри фізики, Черкаський національний університет імені Богдана
Хмельницького, Черкаси, Україна,
pasichnyy@ukr.net

DOI: 10.31651/2076-5851-2022-3-14

PACS: 61.46.+w, 68.35.Rh, 81.10.-h

ХАРАКТЕРНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ГІДРОМЕХАНІЧНОГО СИНТЕЗУ НАНОПОЯСІВ ПЕНТАОКСИДУ ВАНАДІЮ

У роботі представлено результати експериментального дослідження процесу синтезу нанострічок пентаоксиду ванадію (V_2O_5) за умов гідромеханічного впливу без застосування високотемпературної обробки. Як вихідні компоненти використовувалися порошок V_2O_5 та водні розчини хлориду натрію (NaCl) різної концентрації. Синтез проводився шляхом тривалого перемішування суспензії зі постійною швидкістю обертання. У ході реакції реєструвались зміни рН, в'язкості та електропровідності, що дозволило ідентифікувати етапи перекристалізації.

Методами скануючої електронної мікроскопії продемонстровано формування одновимірних наноструктур стрічкоподібної морфології з довжиною до 7 мкм і товщиною близько 10–15 нм. Зміни поверхневої структури супроводжувалися поступовим зникненням вихідної зернистої морфології та утворенням нанопоясів. За допомогою рентгенівської дифрактометрії виявлено зменшення інтенсивності кристалічних піків із часом, що свідчить про перехід до нанокристалічного стану матеріалу. Піки зникали повністю після 96 годин гідромеханічної обробки.

Результати циклічної вольтамперометрії вказують на те, що композитні електроди на основі графіту з додаванням синтезованих нанострічок V_2O_5 мають найкращі електрохімічні характеристики серед усіх досліджуваних варіантів. Вольтамперограми демонструють чітко виражені редокс-піки та збільшену інтегральну площу, що свідчить про підвищену питому ємність. Представлені результати підтверджують ефективність гідромеханічного підходу до синтезу функціональних наноматеріалів з потенціалом для використання в літій-іонних акумуляторах.

Ключові слова: наноструктури, нанопояси, оксиди металів, пентаоксид ванадію, гідромеханічний метод, нерівноважні системи.

1. Вступ

Розвиток технологій зберігання та перетворення енергії значною мірою залежить від прогресу у створенні нових функціональних матеріалів з нанорозмірною структурою.

Зокрема, напівпровідникові оксиди металів активно вивчаються як основа для виготовлення електродів, сенсорів, фотокаталізаторів і джерел живлення нового покоління [1–4]. Особливий інтерес викликають наноструктуровані форми таких оксидів – зокрема, нанопояси, нанодропи, нанодиски – які, завдяки своїй морфології, забезпечують покращену іонну та електронну провідність, підвищену питому поверхню та механічну стабільність.

Серед оксидів перехідних металів найбільш перспективним матеріалом для катодів у літій-іонних акумуляторах є пентаоксид ванадію (V_2O_5), що поєднує високу теоретичну ємність, багатоступеневі окисно-відновні перетворення та доступність вихідної сировини [5]. Використання нанострічок V_2O_5 дає змогу зменшити дифузійний опір і покращити електроди. Проте масштабованість їх виробництва залишається однією з основних проблем практичного застосування.

Традиційні методи синтезу, зокрема твердофазні або гідротермальні, потребують високих температур і тисків, високотехнологічного обладнання або тривалого часу обробки [2, 4, 6]. Це ускладнює масштабування та контроль параметрів росту наноструктур. У цьому контексті альтернативою є гідромеханічні методи, що базуються на використанні інтенсивного перемішування в умовах відкритої системи. Такі підходи дозволяють впливати на кінетику кристалізації шляхом варіювання концентрації того чи іншого компонента в системі, швидкості обертання, водневого показника (pH), в'язкості середовища тощо [7, 9].

Окрему роль у поясненні механізмів росту наноструктур відіграють сучасні теоретичні моделі. У роботах [6–8] показано, що в умовах нерівноважного середовища реалізуються анізотропна нуклеація, балістичні стрибки атомів та ефекти антидозрівання, що сприяють утворенню видовжених структур без потреби у високій температурі. Ці підходи формують фізичну основу для розуміння поведінки наноструктур у динамічних рідинних середовищах.

Результати попередніх експериментальних досліджень авторів підтвердили ефективність поєднання механічного перемішування та хімічного каталізу з боку NaCl як чинників, що визначають морфологію синтезованих V_2O_5 нанопоясів [9, 10]. Зокрема, було виявлено залежність тривалості перекристалізації від концентрації солі та швидкості перемішування.

Метою цієї роботи є експериментальне дослідження процесу гідромеханічного синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію та аналіз впливу ключових параметрів (температура, концентрація реагентів, швидкість перемішування) на морфологію і електрохімічні властивості одержаних структур. Робота поєднує попередні результати з новими спостереженнями, зокрема скануючої електронної мікроскопії (SEM), рентгенівської дифрактометрії (XRD) та циклічної вольтамперометрії (CV), і розширює розуміння умов формування та утворення наноматеріалів.

2. Методика експерименту

Синтез нанопоясів пентаоксиду ванадію (V_2O_5) здійснювався в умовах водного середовища з використанням гідромеханічного методу. Як вихідний матеріал застосовувався комерційний порошок V_2O_5 , розміри частинок якого переважно знаходилися в межах 10–100 мкм. Реакційне середовище формувалося шляхом розчинення хлориду натрію (NaCl) у 150 мл дистильованої води до концентрацій у діапазоні 0,5 – 4 моль/л.

Після стабілізації температури у межах 25–30 °C до розчину додавали вихідний оксид ванадію, забезпечуючи постійне перемішування за допомогою магнітної мішалки із постійною швидкістю обертання (від 200 до 800 об/хв залежно від серії дослідів). Для руйнування первинних агломератів та підвищення однорідності суспензії

використовували ультразвукову обробку тривалістю 10 хвилин. Хід реакції контролювали шляхом вимірювання показників рН, в'язкості та електропровідності за допомогою комбінованого вимірювального пристрою. Процес синтезу тривав впродовж 24–96 годин.

Для приготування зразків до морфологічного та фазового аналізу суспензію промивали дистильованою водою з наступним центрифугуванням та фільтруванням. Осад висушували при температурі 40 °С на повітрі.

Для растрової електронної мікроскопії (SEM) приготування зразків здійснювалося шляхом нанесення суспензії на металеві відполіровані підкладки з вольфраму. Для запобігання кристалізації залишкової солі суспензію попередньо розбавляли у співвідношенні 1:50. Для дослідження фазового складу матеріалу застосовували рентгенівську дифрактометрію (XRD), зразки для якої формували шляхом нанесення речовини на скляну підкладку.

Оцінку електрохімічних характеристик проводили методом циклічної вольтамперометрії. Робочі електроди виготовляли шляхом пресування суміші порошку нанострічок V_2O_5 . Випробування електродів проводили у триелектродній комірці з використанням $Ag/AgCl$ як еталонного електрода

3. Результати та обговорення

Хід синтезу нанопоясів V_2O_5 аналізували за зміною фізико-хімічних властивостей суспензії, морфологічними та структурними спостереженнями, а також електрохімічними характеристиками одержаних матеріалів.

На Рис. 1–3 наведено часові залежності зміни рН, в'язкості та потужності, споживаної двигуном мішалки. Спостерігається кореляція між зменшенням кислотності та зростанням в'язкості середовища, що супроводжується зміною кольору суспензії від світло-коричневого до бордового. Ці зміни свідчать про перебіг перекристалізації вихідного порошку. Паралельне зростання потужності обертання (Рис. 3) вказує на збільшення опору руху, що може використовуватись як опосередкований індикатор завершення фази росту нанострічок.

На Рис. 4 продемонстровано вплив концентрації $NaCl$ на швидкість утворення наноструктур. Встановлено, що навіть незначне введення солі істотно пришвидшує реакцію, тоді як за її відсутності процес може тривати до 6–8 місяців. Концентрація $NaCl$ виявилася ключовим фактором, що запускає механізм перекристалізації.

Додатково було досліджено процес розчинення V_2O_5 у залежності від швидкості перемішування. На Рис. 5 показано зміну електропровідності, яка зростає пропорційно інтенсивності обертання, хоча частка вихідного порошку у суспензії залишається незмінною (~0,76 г/л), що свідчить про обмежену розчинність оксиду. Вимірювання електропровідності суспензії здійснювалося кондуктометром PC-800.

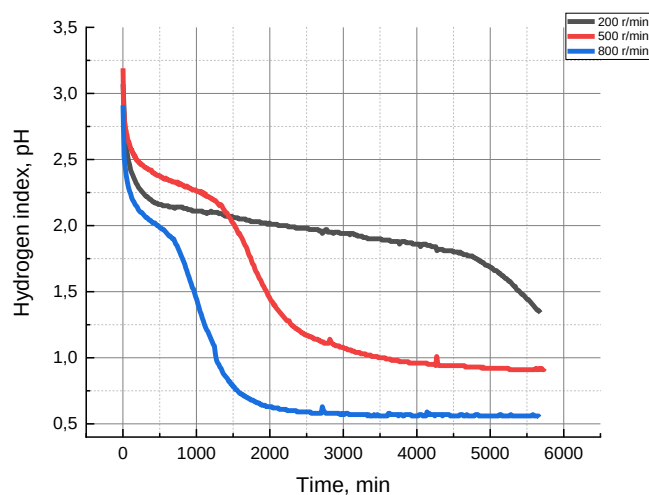


Рис.1. Зведений графік часової зміни водневого показника pH розчинів в залежності від швидкості перемішування. Пентоксид ванадію V_2O_5 (5 г.), швидкість перемішування (200 об/хв., 500 об/хв., 800 об/хв.), температура розчинів в процесі дослідження (25 °C), 2М розчин NaCl.

Fig. 1. A summary graph of the time change of the hydrogen pH indicator of the solutions depending on the speed of mixing. Vanadium pentoxide V_2O_5 (5 g), stirring speed (200 rpm, 500 rpm, 800 rpm), solution temperature during the study (25 °C), 2M NaCl solution.

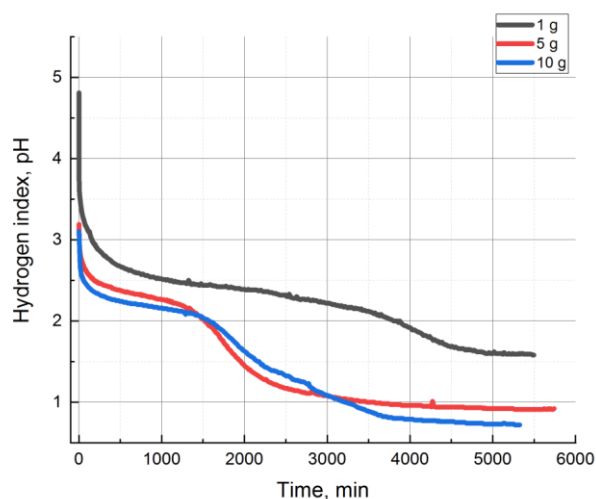


Рис.2. Зведений графік часової зміни водневого показника pH розчинів в залежності від концентрації в розчині V_2O_5 . Пентоксид ванадію V_2O_5 (1 г., 5 г., 10 г.), швидкість перемішування (500 об/хв.), температура розчинів в процесі дослідження (25 °C).

Fig. 2. Summary graph of the time change of the hydrogen indicator of pH solutions depending on the concentration in the V_2O_5 solution. Vanadium pentoxide V_2O_5 (1 g, 5 g, 10 g), stirring speed (500 rpm), solution temperature during the study (25 °C).

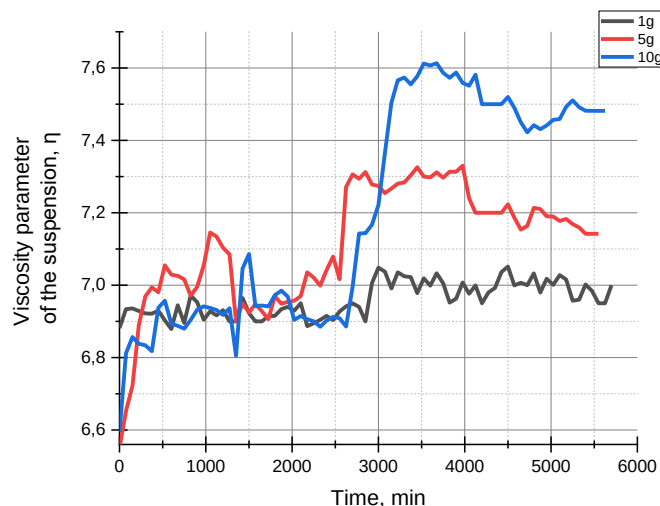


Рис.3. Зведений графік часової зміни вязкості розчинів в залежності від концентрації в розчині V₂O₅. Пентоксид ванадію V₂O₅ (1 г., 5 г., 10 г.), швидкість перемішування (500 об/хв.), температура розчинів в процесі дослідження (25 °C).

Fig. 3. A summary graph of the time change in the viscosity of solutions depending on the concentration in the V₂O₅ solution. Vanadium pentoxide V₂O₅ (1 g, 5 g, 10 g), stirring speed (500 rpm), solution temperature during the study (25 °C).

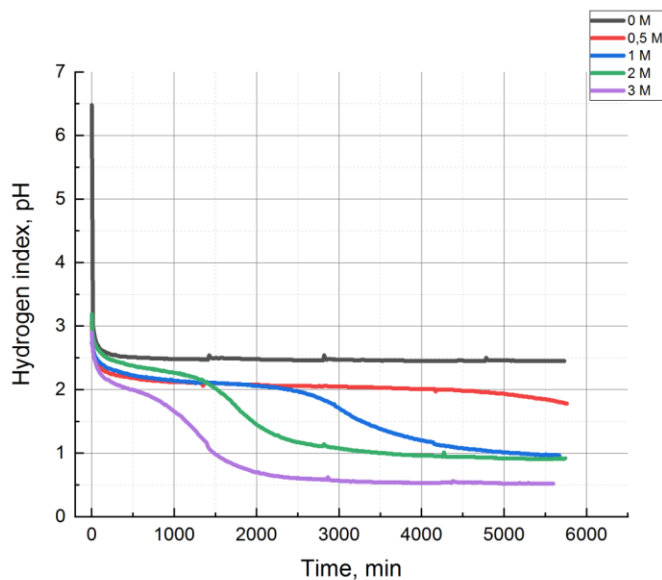


Рис.4. Зведений графік часової зміни водневого показника pH розчинів в залежності від концентрації в розчині NaCl. Пентоксид ванадію V₂O₅ (5 г.), швидкість перемішування (500 об/хв.), температура розчинів в процесі дослідження (25 °C), різні концентрації NaCl (0M, 0.5 M, 1 M, 2 M, 3 M).

Fig. 4. A summary graph of the time change of the hydrogen indicator of the pH of the solutions depending on the concentration in the NaCl solution. Vanadium pentoxide V₂O₅ (5 g), stirring speed (500 rpm), temperature of solutions during the study (25 °C), different concentration of NaCl (0M, 0.5 M, 1 M, 2 M, 3 M).

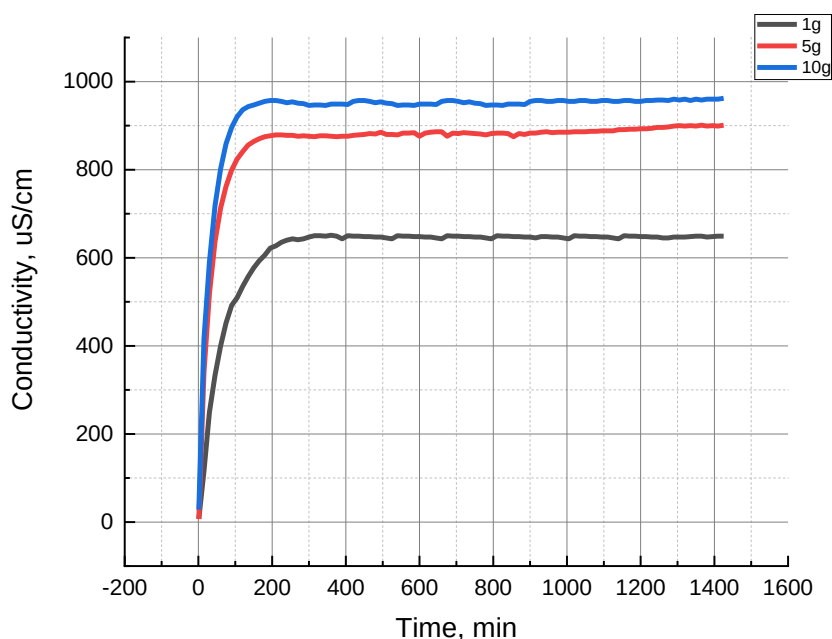


Рис.5. Часова зміна електропровідності розчину у процесі інтенсивного перемішування (500 об/хв) 1 г., 5 г., 10г. порошку V_2O_5 при температурі суспензії 25°C .

Fig. 5. Temporal change in electrical conductivity of the solution during intensive mixing (500 rpm) of 1 g, 5g, 10g of V_2O_5 powder at a suspension temperature of 25°C .

SEM-аналіз (Рис. 6–7) дозволив фіксувати еволюцію морфології. Вихідний порошок представлений масивними агрегатами з неправильною формою (Рис. 6), тоді як після 72 годин перемішування при 500 об/хв утворюються видовжені стрічкоподібні наноструктури довжиною до 7 мкм, шириною 200–300 нм та товщиною близько 10–15 нм (Рис. 7).

Рентгеноструктурний аналіз (Рис. 8) підтвердив поступову зміну фазового стану. Через 24 години спостерігається виражений дифракційний пік, характерний для ортогональної фази V_2O_5 . Після 48 годин – помітне зниження інтенсивності піку, з подальшим зникненням кристалічних сигналів та домінуванням дифузного фону, що свідчить про перехід до нанокристалічної або аморфної структури (розмір частинок < 20 нм).

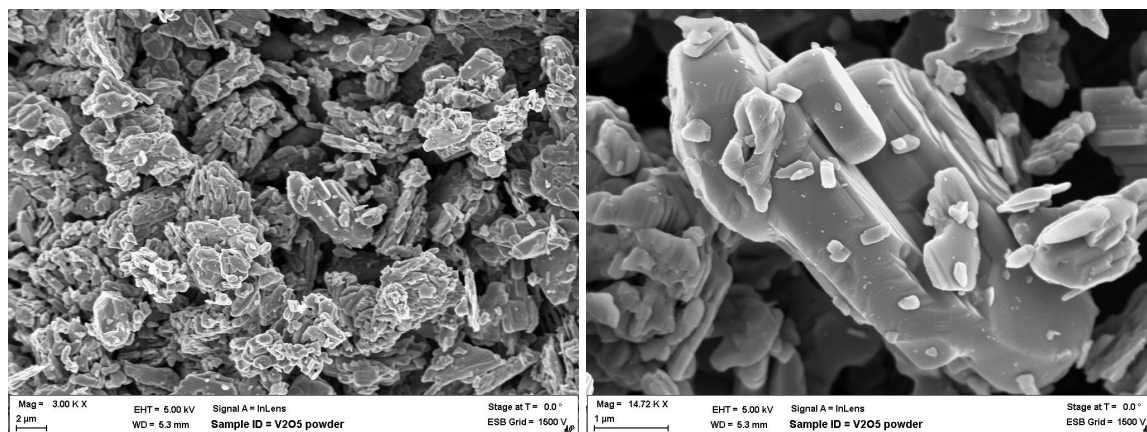


Рис. 6. PEM знімки вихідного порошку пентаоксиду ванадію.
Fig. 6. SEM images of the original vanadium pentoxide powder.

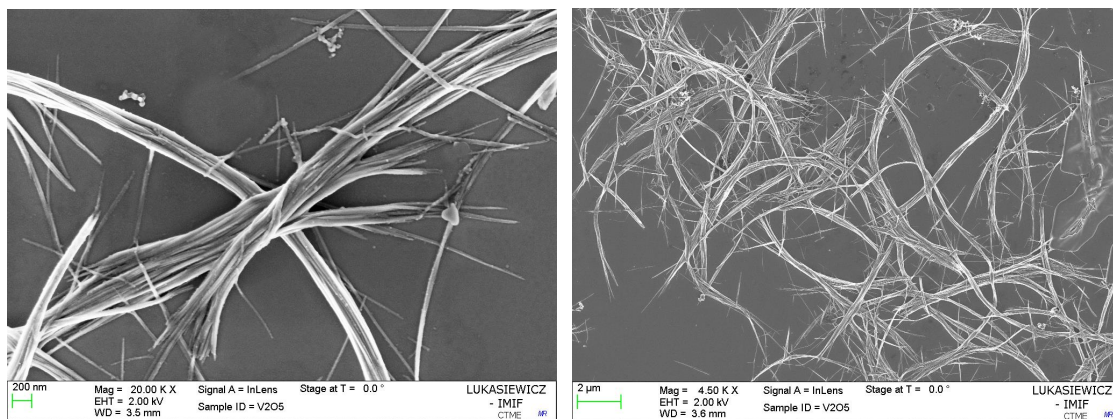


Рис. 7. Знімки утворених нанопоясів V_2O_5 при інтенсивному перемішуванні суспензії з частотою 500 об/хв при температурі 25°C .

Fig. 7. Photographs of the formed V_2O_5 nanobelts during intensive stirring of the suspension at a frequency of 500 rpm at a temperature of 25°C .

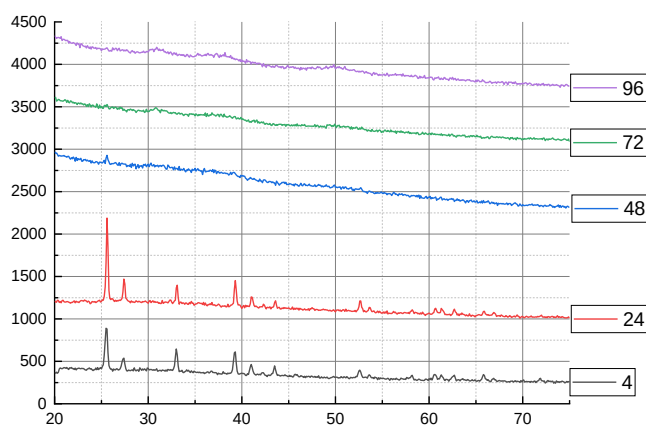


Рис. 8. Спектри рентгенівської дифрактометрії перетворення в нанопояси V_2O_5 при перемішуванні суспензії з частотою 500 об/хв при температурі 25°C протягом: 4 год, 24 год, 48 год, 72 год, 96 год.

Fig. 8. X-ray diffractometric spectra of transformation into V_2O_5 nanobelts with stirring of the suspension with frequency of 500 rpm at 25°C for: 4 hours, 24 hours, 48 hours, 72 hours, 96 hours.

Електрохімічні властивості оцінювали методом циклічної вольтамперометрії (CV) у розчині 1М KCl при швидкості сканування 50 mV/s у межах потенціалів від $-1,5$ В до $+1,5$ В. Для дослідження було виготовлено серію електродів: з чистим графітом, із нанесеним комерційним та подрібненим порошком V_2O_5 , з синтезованими нанострічками, а також композитний варіант (графіт/нанострічки у співвідношенні 1:1). На Рис. 9 показано, що композитний електрод продемонстрував найбільшу інтегральну площу CV-кривої та найвиразніші окисно-відновні піки, що свідчить про покращену питому ємність і ефективність переносу заряду.

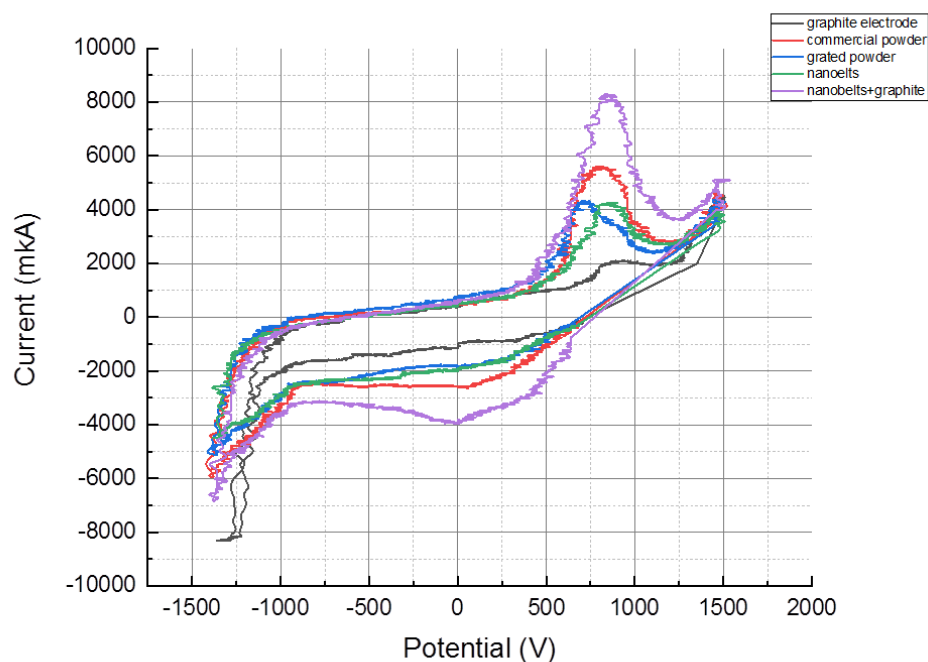


Рис 9. Криві циклічної вольтамперометрії (CV) виготовлених електродів з нанопоясів V₂O₅(графітовий електрод, комерційний порошок V₂O₅, подрібнений порошок V₂O₅, нанопояски, нанопояски з графітом (1:1))

Fig. 9. Cyclic voltammetry (CV) curves of manufactured electrodes from V₂O₅ nanobelts (graphite electrode, commercial V₂O₅ powder, crushed V₂O₅ powder, nanobelts, nanobelts with graphite (1:1))

Таким чином, проведені дослідження підтверджують можливість контрольованого синтезу наноструктур пентаоксиду ванадію шляхом варіювання основних параметрів процесу. Отримані результати можуть бути корисними для подальшого вдосконалення методів синтезу та розширення застосування отриманих наноматеріалів.

4. Висновки

У роботі проведено комплексне дослідження процесу синтезу нанострічок пентаоксиду ванадію (V₂O₅) в умовах гідромеханічного впливу. Встановлено, що інтенсивне перемішування в присутності NaCl як каталізатора забезпечує ефективну перекристалізацію комерційного порошку в одновимірні наноструктури без потреби у високотемпературній термообробці.

Зміна pH, в'язкості та потужності перемішування може слугувати непрямим індикатором етапів синтезу. Морфологічний аналіз підтвердив утворення видовжених нанопоясів із розмірами 10–15 нм у товщину та до 7 мкм у довжину. Рентгенівська дифрактометрія зафіксувала зменшення кристалічності продукту та перехід до нанокристалічного або аморфного стану.

Дослідження електрохімічних характеристик синтезованих наноструктур методом циклічної вольтамперометрії (CV) показало, що композитні електроди, виготовлені на основі графіту з додаванням синтезованих нанострічок V₂O₅, демонструють підвищену питому ємність і стабільність окисно-відновних характеристик. Це підтверджує доцільність використання одержаних наноматеріалів як катодних компонентів у літій-іонних батареях.

Отримані результати підтверджують ефективність використання гідромеханічного методу для синтезу наноструктур пентаоксиду ванадію та відкривають нові можливості для подальшої оптимізації процесу. Подальший розвиток методу та його адаптація до

умов масштабного виробництва можуть сприяти створенню високоефективних технологій синтезу наноматеріалів для застосування електроніці, системах накопичення енергії, сенсорних пристроях та інших перспективних галузях техніки.

Подяки

Автори висловлюють щирі вдячність професору Андрію Михайловичу Гусаку та Ярославу Дмитровичу Королю за цінну допомогу у постановці загальної задачі, змістовні дискусії та підтримку під час проведення експериментальних досліджень. Робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України (номер державної реєстрації: 0121U113219).

Список використаної літератури:

1. Xianhong R. Ambient dissolution-recrystallization towards large-scale preparation of V₂O₅ nanobelts for high-energy battery applications / R. Xianhong, T. Yuxin, O. Malyi, A. Gusak, Zhang Y. // *Journal of Nano Energy*. – 2016. – V. 22. – P. 583-593. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.03.001>
2. Tang Y. Mechanical Force Driven Growth of Elongated Bending TiO₂ based Nanotubular Materials for Ultrafast Rechargeable Lithium Ion Batteries / Y. Tang, Y. Zhang, J. Deng, J. Wei // *Advanced Materials*. – 2014. – V. 26. – P. 6111-6118. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1002/adma.201402000>
3. Wang Z. L. Nanobelts, Nanowires, and Nanodiskettes of Semiconducting Oxides – From Materials to Nanodevices / Z. L. Wang // *Advanced Materials*. – 2003. – V. 15. – P. 432-436. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1002/adma.200390100>
4. Wei Pan Z. Nanobelts of Semiconducting Oxides / Z. Wei Pan, Z. Rong Dai, Z. Lin Wang // *Science*. – 2001. – V. 291. – P. 1947-1949. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1126/science.1058120>
5. Lee M. One-step hydrothermal synthesis of graphene decorated V₂O₅ nanobelts for enhanced electrochemical energy storage / M. Lee, S. K. Balasingam, H. Y. Jeong, Won G. Hong, Han-Bo-Ram Lee, B.yung H. Kim & Y. Jun // *Scientific Reports*. – 2015. – V. 8151– Режим доступу: <https://doi.org/10.1038/srep08151>
6. Gusak A. M. Application of ballistic jumps concept to formation of non-equilibrium anisotropic structures and to severe plastic deformation/, Y.I. Huriev, D.S. Gertsricken. // *Cherkasy University Bulletin: Physical and Mathematical Sciences*, . –2020. –P. 3-16. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31651/2076-5851-2020-1-3-16>
7. Gusak A. M. Elementary models of the “flux driven anti-ripening” during nanobelt growth / A. M. Gusak, Y. I. Huriev, O. I. Malyi, Y. Tang. // *Physical Chemistry Chemical Physics*. –2020.–V. 22, No17.–P. 9740–9748.–Режим доступу:<https://doi.org/10.1039/C9CP06337D>
8. Gusak A. M. Anisotropic Nucleation, Growth and Ripening under Stirring—A Phenomenological Model / A. M. Gusak, Y. Huriev, J. W. Schmelzer. // *Entropy*. – 2020. –V. 22, No11. –P. 1254. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/e22111254>
9. Коломієць Д.І., Пасічний М.О., Король Я.Д. Гідротермічний метод синтезу нанопоясків оксиду ванадію V₂O₅ при інтенсивному перемішуванні // *Вісник Черкаського університету: Серія «Фізико-математичні науки»*. – 2020. – №1. – С. 53-58. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31651/2076-5851-2020-53-58>
10. Коломієць Д.І., Пасічний М.О. Синтез нанопоясків оксиду ванадію та використання концепції балістичних стрибків для опису їх утворення // *Вісник Черкаського університету: Серія «Фізико-математичні науки»*. – 2021. – №1. – С. 12-31. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31651/2076-5851-2021-12-31>

References:

1. R. Xianhong, T. Yuxin, O. Malyi, A. Gusak, Y. Zhang. (2016) Ambient dissolution-recrystallization towards large-scale preparation of V₂O₅ nanobelts for high-energy battery applications. *Journal of Nano Energy.* , 22, 583-593. – Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.03.001>
2. Y. Tang, Y. Zhang, J. Deng, J. Wei. (2014) Mechanical Force Driven Growth of Elongated Bending TiO₂ based Nanotubular Materials for Ultrafast Rechargeable Lithium Ion Batteries. *Advanced Materials.*, 26, 6111-6118. – Retrieved from <https://doi.org/10.1002/adma.201402000>
3. Z. L. Wang. (2003) Nanobelts, Nanowires, and Nanodiskettes of Semiconducting Oxides – From Materials to Nanodevices. *Advanced Materials.*, 15, 432-436. – Retrieved from <https://doi.org/10.1002/adma.200390100>
4. Z. Wei Pan, Z. Rong Dai, Z. Lin Wang. (2001) Nanobelts of Semiconducting Oxides. *Science.*, 291, 1947-1949. – Retrieved from <https://doi.org/10.1126/science.1058120>
5. M. Lee, S. K. Balasingam, H. Y. Jeong, Won G. Hong, Han-Bo-Ram Lee, B.yung H. Kim & Y. Jun. (2015) One-step hydrothermal synthesis of graphene decorated V₂O₅ nanobelts for enhanced electrochemical energy storage. *Scientific Reports.*, 8151– Retrieved from <https://doi.org/10.1038/srep08151>
6. A. M. Gusak, Y.I. Huriev, D.S. Gertsricken. (2020) Application of ballistic jumps concept to formation of non-equilibrium anisotropic structures and to severe plastic deformation *Cherkasy University Bulletin: Physical and Mathematical Sciences*, 1, 3-16. – Retrieved from <https://doi.org/10.31651/2076-5851-2020-1-3-16>
7. Gusak, A. M., Huriev, Y. I., Malyi, O. I., & Tang, Y. (2020). Elementary models of the “flux driven anti-ripening” during nanobelt growth. *Physical Chemistry Chemical Physics.*, 22(17), 9740-9748. – Retrieved from <https://doi.org/10.1039/C9CP06337D>
8. Gusak, A. M., Huriev, Y. I., & Schmelzer, J. W. (2020). Anisotropic Nucleation, Growth and Ripening under Stirring–A Phenomenological Model. *Entropy.*, 22(11), 1254. – Retrieved from <https://doi.org/10.3390/e22111254>
9. Kolomiets D.I., Pasichnyi M.O., Korol Y.D. (2020) Hydrothermal method of synthesis of nanobelts of vanadium oxide V₂O₅ with intensive mixing. *Cherkasy University Bulletin: Physical and Mathematical Sciences*, 1 (1), 53-58. – Retrieved from <https://doi.org/10.31651/2076-5851-2020-53-58>
10. Kolomiets D.I., Pasichnyi M.O. (2021) Synthesis of nanobelts of vanadium oxide and use of the concept of ballistic jumps to describe their formation. *Cherkasy University Bulletin: Physical and Mathematical Sciences*, 1 (1), 12-31. – Retrieved from <https://doi.org/10.31651/2076-5851-2021-12-31>

D. I. Kolomiets

PhD student of the Department of Physics, The Bohdan Khmelnytsky
National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
denyskolomiets95@gmail.com

M. O. Pasichnyy

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Head of the
Department of Physics, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy,
Cherkasy, Ukraine,
pasichnyy@ukr.net

SPECIFIC FEATURES OF HYDROMECHANICAL SYNTHESIS OF VANADIUM PENTAOXIDE NANOBELTS

This study offers a comprehensive analysis of the hydromechanical synthesis process for one-dimensional vanadium pentoxide (V_2O_5) nanobelts. The research aims to develop a scalable, ambient-condition methodology to produce nanostructured materials for advanced energy storage applications. Aqueous suspensions containing commercial V_2O_5 powder and varying concentrations of sodium chloride (NaCl) were subjected to intensive magnetic stirring without thermal post-processing. The experimental procedure involved monitoring the evolution of physicochemical properties over time, enabling detailed insight into the crystallization and growth behavior under turbulent liquid-phase conditions.

The evolution of the suspension's chemical and physical properties was monitored using measurements of pH, viscosity, and electrical conductivity. These indicators provided valuable insight into the reaction kinetics and nucleation dynamics. pH decreased progressively during the synthesis, signifying the acidification of the medium and possible hydrolysis reactions involving vanadium species. Simultaneously, viscosity increased, indicating the formation of extended molecular networks and colloidal intermediates. The observed changes in electrical conductivity confirmed the dissolution of V_2O_5 and the subsequent saturation of the solution. These changes serve as indirect indicators of the progress of nanostructure formation.

Morphological transformation during the synthesis was documented through scanning electron microscopy (SEM). The initial commercial V_2O_5 powder consisted of coarse particles with irregular shapes and low aspect ratios. After 72 hours of hydromechanical treatment, the formation of ribbon-like nanostructures was observed. These nanobelts displayed dimensions ranging from 10–15 nm in thickness and several microns in length, with smooth surfaces and apparent alignment. The observed anisotropic growth was likely governed by crystallization along preferred lattice directions, influenced by flow patterns and ion-mediated surface processes.

X-ray diffraction (XRD) analysis complemented the SEM observations. Initially, sharp diffraction peaks corresponding to the orthorhombic structure of V_2O_5 were present. With increasing treatment time, a decline in peak intensity and broadening of diffraction features were recorded. By the end of a 96-hour synthesis cycle, the crystalline signals had nearly vanished, and the patterns suggested a transition to a predominantly amorphous or nanocrystalline phase. These results underscore the mechanical disruption of long-range order induced by constant shear and collision forces in the suspension.

Electrochemical performance of the synthesized nanostructures was assessed using cyclic voltammetry (CV). Several electrode configurations were tested, including pristine graphite, graphite with untreated commercial powder, and composites with V_2O_5 nanobelts at different mass ratios. The composite electrode with a 1:1 mass ratio of graphite and nanobelts demonstrated the most favorable electrochemical behavior. Well-defined redox peaks, high reversibility, and increased charge-storage capacity were observed in comparison with reference electrodes.

Further analysis of the CV profiles revealed rapid ion insertion/extraction kinetics, enhanced by the high surface area and one-dimensional architecture of the nanobelts. These structures facilitated efficient ion transport and minimized resistance. Additionally, the uniform dispersion of nanostructures within the graphite matrix improved electronic connectivity and

mechanical integrity. The findings highlight the synergy between nanostructured V_2O_5 and conductive matrices in optimizing electrochemical performance.

Beyond energy storage, the synthesized V_2O_5 nanobelts exhibit promising characteristics for applications in chemical sensing, electrocatalysis, and photonic devices. Their high surface-to-volume ratio, redox activity, and structural flexibility make them suitable candidates for multifunctional systems. The ability to tune the synthesis parameters – such as salt concentration, stirring speed, and process duration-enables control over product morphology, crystallinity, and functional behavior.

The use of NaCl as a catalytic additive is of particular interest. It accelerates the breakdown of V_2O_5 agglomerates and promotes nucleation. The presence of chloride ions may alter the ionic strength and dielectric environment of the suspension, facilitating enhanced diffusion and templated growth. These effects warrant further investigation, particularly regarding ion-specific interactions and their implications for crystal engineering.

From a methodological perspective, the study showcases how mechanical forces—traditionally overlooked in crystallization – can direct nanoscale material formation under mild conditions. The interplay between turbulence, shear stress, and particle-solution interactions contributes to a new paradigm in low-temperature nanomaterials synthesis. This paradigm avoids complex autoclave systems or hazardous reagents, offering a sustainable alternative for industry and research.

The experimental framework developed here may be adapted to other metal oxide systems. For instance, analogous hydromechanical protocols could be applied to synthesize nanostructured TiO_2 , ZnO , or Fe_2O_3 . Moreover, the incorporation of dopants or functionalizing agents into the suspension could further expand the utility of the process. The hydromechanical route offers excellent compatibility with green chemistry principles, potentially reducing waste and energy consumption.

The findings also open avenues for integrating such nanomaterials into hybrid energy storage systems, such as supercapacitor–battery hybrids or solid-state cells. The scalability of the method, combined with its reproducibility and material efficiency, enhances its appeal for applied research and pre-industrial prototyping. Furthermore, the technique may be tailored for batch or continuous-flow processing, enabling production at various scales.

In summary, this study delivers an extensive characterization of a low-temperature, solution-based strategy for synthesizing V_2O_5 nanobelts. It demonstrates the critical role of hydrodynamic conditions and salt-mediated mechanisms in controlling the structure and performance of nanomaterials. The synthesized nanobelts exhibit favorable physical and electrochemical properties, confirming their suitability for energy-related technologies. The approach represents a significant advancement in scalable nanomaterials fabrication and paves the way for further studies in hydrodynamically controlled synthesis strategies.

Key words: nanostructures, nanobelts, metal oxides, vanadium pentoxide, hydrothermal method, nonequilibrium systems.

Одержано редакцією 15.07.2022

Прийнято до друку 26.08.2022