ORCID: 0000-0001-8267-8365
Д. І. Коломієць
викладач кафедри фізики,
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

ORCID: 0000-0003-1300-1363
Я. Д. Король
кандидат фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна,
yaking@ukr.net

DOI: 10.31651/2076-5851-2023-15-24 PACS: 61.46.+w, 68.35.Rh, 81.10.−h

КОРЕЛЯЦІЇ МІЖ КІНЕТИКОЮ СТРУКТУРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ І ФІЗИКО-ХІМІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СУСПЕНЗІЇ ПРИ ГІДРОМЕХАНІЧНОМУ СИНТЕЗІ НАНОПОЯСІВ ПЕНТАОКСИДУ ВАНАДІЮ

Сучасний розвиток науки та техніки ставить нові виклики у сфері синтезу й характеризації наноматеріалів, що потребує комплексного підходу та глибокого розуміння особливостей фізико-хімічних взаємодій у системі. Одним із перспективних методів отримання наноструктур є гідромеханічний синтез, який дозволяє контролювати кінетику структурних перетворень за рахунок впливу фізико-хімічних характеристик реакційного середовища у процесі синтезу. У дослідженні проаналізовано кореляції між кінетикою структурних перетворень та фізико-хімічними властивостями суспензії у процесі гідромеханічного синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію (V_2O_5). Синтез проводився із застосуванням авторського обладнання, що забезпечувало точний контроль температури та інтенсивності перемішування. Отримані наноструктури характеризуються середніми розмірами 2,3 мкм у довжину та 42,6 нм у ширину. Їхній аналіз здійснено за допомогою методів растрової електронної мікроскопії та рентгенівської дифрактометрії.

Зміни водневого показника (pH) і в'язкості розчину корелюють з етапами формування нанопоясів, що дозволяє використовувати ці параметри як індикатори перебігу процесу. Інтенсивне механічне перемішування суттєво прискорює ріст видовжених наноструктур за рахунок порушення хімічної рівноваги в реакційній системі, що активує анізотропне зростання кристалів. NaCl відіграє роль каталізатора, скорочуючи тривалість синтезу. Зміни водневого показника, в'язкості і кольору розчину під час реакції дозволяють оперативно оцінювати перебіг процесу синтезу. Отримані результати мають важливе значення для подальшої оптимізації

гідромеханічних методів синтезу наноматеріалів з заданими характеристиками та масштабування процесу для промислового виробництва.

Ключові слова: оксиди металів, пентаоксид ванадію, гідромеханічний синтез, нанопояси, водневий показник.

1. Вступ

Протягом останнього десятиліття дослідження одновимірних наноструктур, зокрема нанопоясів, нанодротів, нанотрубок і нанопровідників, стало одним із ключових напрямів сучасної науки. Це зумовлено їхніми унікальними фізичними властивостями та широкими перспективами застосування в наноелектроніці та оптоелектроніці [4]. Інтенсивний розвиток методів синтезу сприяв створенню наноструктур із різноманітною морфологією та складом, що відкриває нові можливості для їхнього практичного використання.

Особливу увагу привертають стрічкоподібні нанопояси, отримані методом гідромеханічного синтезу з використанням водних суспензій порошків вихідної речовини. Важливим аспектом цього процесу є встановлення кореляцій між кінетикою структурних перетворень та фізико-хімічними характеристиками суспензії. Дослідження таких взаємозв'язків сприятиме подальшому вдосконаленню гідромеханічних методів синтезу та оптимізації параметрів процесу з метою отримання наноструктур із покращеними характеристиками. Ще одним важливим аспектом дослідження є розширення спектра оксидів, що можуть бути використані для формування стрічкоподібних наноструктур. Дотримуючись загального підходу, який базується на випаровуванні порошків металевих оксидів за високих температур, можна дослідити синтез наноструктур на основі оксидів цинку, олова, індію, кадмію та галію [5]. Розширення матеріальної бази дозволяє визначити нові можливості для застосування таких наноструктур у різноманітних електронних та оптоелектронних пристроях [6]. Окрім того, важливим є дослідження поперечного перерізу стрічкоподібних наноструктур, який суттєво відрізняється від раніше вивчених нанотрубок та нанодротів. Вивчення цього параметра є критичним для розуміння його впливу на транспортні явища в нанометровому масштабі. У цьому контексті гідротермічний метод має низку унікальних переваг у формуванні наноструктур, оскільки дозволяє керувати кінетикою реакцій, що є майже неможливим у твердотільних методах [8]. Внутрішні фактори, такі як температура, водневий показник (pH), тиск і тривалість процесу, суттєво впливають на мікроструктуру, розмір, дисперсність та морфологію отриманого матеріалу. Водночас не менш важливими є зовнішні чинники, які також можуть впливати на процес синтезу. Останні дослідження вказують, що механічне перемішування істотно змінює кінетику реакцій та процес формування видовжених структур, що, у свою чергу, впливає на морфологію наноструктур та відкриває нові можливості їхнього синтезу.

У цьому дослідженні проаналізовано сучасні методи отримання наноматеріалів, зокрема з використанням механічного перемішування, для оптимізації фізико-хімічних характеристик отриманих структур [4–8]. Підхід синтезу наноматеріалів з розчинів має значні переваги у формуванні наноструктур, оскільки забезпечує контроль над кінетикою реакцій. У роботі використано новий підхід до вивчення процесу синтезу, який демонструє останні досягнення у застосуванні механічного перемішування для раціонального підбору фізико-хімічних характеристик. Механічний вплив відіграє ключову роль у формуванні видовжених нанокристалів і визначає кінцеву морфологію нанопоясів. Процес механічного перемішування спричиняє руйнування рівноваги хімічної реакції, що зумовлює зміни у наноструктурі. Напруження зсуву, викликане

в'язким потоком, може спричиняти деформацію наноструктур, а інтенсивні сили зсуву призводити до виникнення балістичних стрибків [1] або порушення асиметрії наноструктур у процесі росту.

Водночас інтенсивне перемішування може прискорювати масовий синтез, впливаючи на кінетику реакції, скорочуючи її тривалість і змінюючи характеристики кінцевого продукту. Для глибшого розуміння ролі механічного перемішування та визначення параметрів, що впливають на кінетику кристалічних перетворень оксидів металів, у роботах [1–3] проведено теоретичний аналіз механізму реакції. Отримані результати дозволяють описати ріст наноструктур з погляду термодинаміки та кінетики, що сприяє раціональному вибору вихідних матеріалів і оптимізації параметрів процесу. Загалом, ця робота спрямована на висвітлення ключових аспектів гідромеханічного синтезу стрічкоподібних наноструктур пентаоксиду ванадію, а також на встановлення кореляцій між кінетикою структурних перетворень і фізико-хімічними характеристиками суспензії. Отримані результати можуть слугувати основою для подальших досліджень у сфері синтезу та практичного застосування стрічкоподібних наноструктур в електроніці та оптоелектроніці.

2. Кореляції між кінетикою структурних перетворень і фізико-хімічними характеристиками суспензії.

У цьому дослідженні використовувався комерційний порошок пентаоксиду ванадію (V_2O_5), який піддавався подальшому аналізу. Основну увагу було зосереджено на встановленні кореляцій між кінетикою структурних перетворень і фізико-хімічними характеристиками суспензії під час синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію. Досліджено вплив таких параметрів, як температура, інтенсивність перемішування, концентрація пентаоксиду ванадію (V_2O_5) та вміст солей (NaCl) у розчині.

Застосований у роботі гідротермічний метод є простим у реалізації та екологічно безпечним. Він передбачає можливість варіювання значної кількості параметрів, що, своєю чергою, дозволяє детально аналізувати ефективність методу та механізм формування наноструктур.

Процес дослідження утворення та синтезу видовжених наноструктур складався з кількох етапів: підготовки вихідних компонентів і суспензій, виготовлення зразків для растрової електронної мікроскопії (РЕМ), збору та обробки експериментальних даних за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

Для приготування суспензій натрій хлорид (NaCl) розчиняли у дистильованій воді до заздалегідь визначеної концентрації, підтримуючи стабільну температуру та однорідність розчину. Після цього поступово додавали пентаоксид ванадію (V_2O_5), забезпечуючи рівномірний розподіл частинок у суспензії. Для розділення агломератів частинок вихідного комерційного порошку застосовувався ультразвуковий диспергатор.

Синтез нанопоясів здійснювався за допомогою авторського пристрою, який забезпечував контроль температури та швидкості перемішування. Під час експерименту проводили вимірювання ключових параметрів, зокрема водневого показника (pH), електропровідності (μS/cm) та в'язкості (η) [9, 10].

Аналіз отриманих наноструктур здійснювався за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ) та рентгенівської дифрактометрії. На основі проведених досліджень встановлено ключові взаємозв'язки між параметрами, що впливають на ріст і формування наноструктур та процесом синтезу. Отримані результати підтверджують, що варіювання цих параметрів може суттєво змінювати морфологію та фізико-хімічні властивості синтезованих наноструктур або навіть повністю пригнічувати їх утворення.

На Рис. 1 наведено часові залежності водневого показника при різних швидкостях перемішування, що відповідають інтенсивності впливу на процес формування видовжених наноструктур. Водневий показник (pH) і в'язкість суспензії виступають індикаторами перебігу синтезу та утворення колоїдного розчину нанопоясів. Спостерігається наступна закономірність: зі зменшенням водневого показника (збільшення кислотності) відбувається поступове збільшення в'язкості та зміна кольору розчину від блідо-коричневого до бордового.

Для дослідження процесу синтезу та визначення його завершального етапу використовували растрову електронну мікроскопію (РЕМ) та рентгенівську дифрактометрію. Зразки для обох методів аналізу готувалися через визначені часові інтервали, зокрема 2 год., 24 год., 48 год., 72 год., тощо.

Растрова електронна мікроскопія дозволяє відстежувати поступову трансформацію полі- та монокристалів у видовжені наноструктури (нанопояси). Встановлено, що вплив певних параметрів може суттєво прискорювати або, навпаки, уповільнювати цей процес, що, своєю чергою, визначає кінцеві характеристики отриманих наноструктур [10].

Для дослідження нанопоясів пентаоксиду ванадію (V_2O_5) було використано методи растрової електронної мікроскопії (РЕМ). З метою забезпечення якісного зображення у якості підкладки застосовували відполіровані пластинки з вольфраму, на поверхню якого наносили досліджуваний матеріал з подальшим просушуванням. Отримані знімки піддавали аналізу, що дозволило встановити кореляцію між кінетикою структурних перетворень і фізико-хімічними характеристиками суспензії під час гідромеханічного синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію у процесі інтенсивного перемішування водних суспензій порошків вихідної речовини.

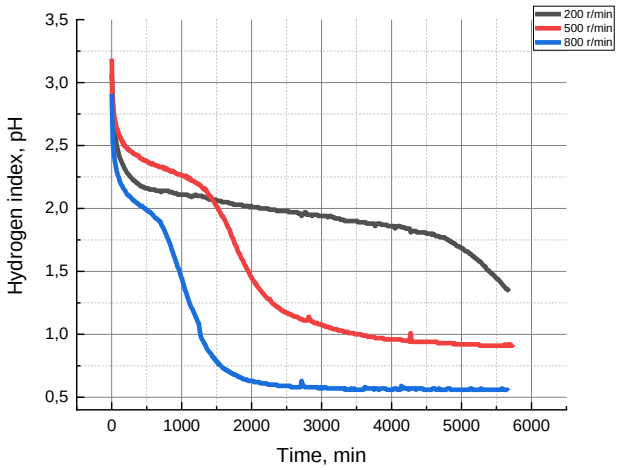

Рис.1. Зведений графік часової зміни водневого показника pH розчинів в залежності від швидкості перемішування. Пентоксид ванадію V_2O_5 (5 г.), швидкість перемішування (200 об/хв., 500 об/хв., 800 об/хв.), температура розчинів в процесі дослідження (25 °C), 2M розчин NaCl.

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.

Додатково у цьому дослідженні було проаналізовано вплив концентрації NaCl на протікання реакції в системі (Рис. 2) та, зокрема, на процес формування видовжених наноструктур. Встановлено, що натрій хлорид є одним із ключових каталізаторів цього процесу, оскільки значно прискорює синтез нанопоясів.

Попри те, що перетворення агломератів у наноструктури можливе і без додавання каталізаторів, повне перетворення 1 г комерційного порошку за звичайних умов без

додаткових компонентів триває кілька місяців. Це підтверджується часовими залежностями зміни водневого показника (pH), які демонструють чотири ключові етапи перетворення. Аналіз часової залежності pH розчинів за різних швидкостей перемішування (Рис. 1) показав, що при швидкості 800 об/хв каталізатор NaCl починає активно взаємодіяти з кристалічною структурою V_2O_5 приблизно на 200-й хвилині. На 600-й хвилині на поверхні монокристалів спостерігається зародження нанопоясів, а до 1500-ї хвилини більшість кристалів вже трансформуються у видовжені наноструктури. Після 4000 хвилин реакція досягає завершення, що підтверджується виходом графіка на плато та повним перетворенням кристалічної структури в нанопояси.

У відсутності NaCl процес синтезу відбувається надзвичайно повільно, хоча повністю не припиняється. Водночас навіть незначне додавання натрій хлориду до реакційної системи дозволяє суттєво прискорити процес, скоротивши його тривалість до одного тижня, що підтверджує його каталізуючу дію.

Отримані результати відкривають можливості для керування та оптимізації процесу гідромеханічного синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію. Зокрема, регулювання концентрації NaCl дозволяє ефективно контролювати швидкість та результативність формування наноструктур. Додатково проведений аналіз впливу цього каталізатора на фізико-хімічні характеристики суспензії та кінетику структурних перетворень сприяє глибшому розумінню механізмів росту нанопоясів, що має важливе значення для подальшої оптимізації методу синтезу.

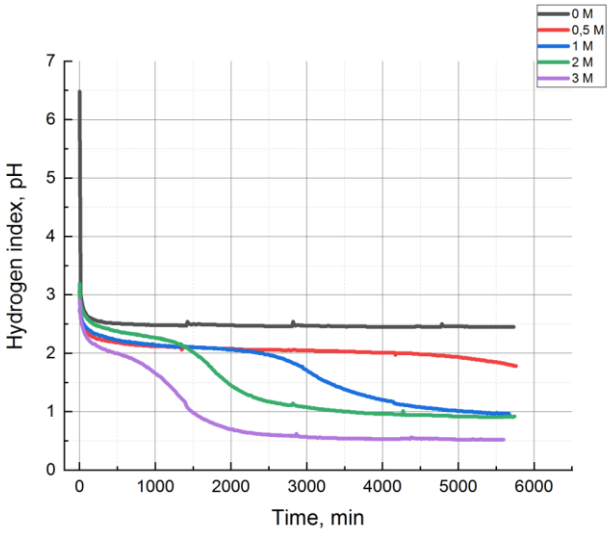

Рис.2. Зведений графік часової зміни водневого показника pH розчинів в залежності від концентрації в розчині NaCl. Пентоксид ванадію V_2O_5 (5 г.), швидкість перемішування (500 об/хв.), температура розчинів в процесі дослідження (25 °C), різна концентрація NaCl (0M,0.5 M, 1 M, 2 M, 3 M).

Fig. 2. 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 V_2O_5 (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).

Аналіз отриманих результатів (Рис. 2) виявив чіткий кореляційний зв’язок між концентрацією NaCl у розчині та кількісним вмістом комерційного порошку V_2O_5. Збільшення концентрації натрій хлориду суттєво сприяє формуванню та росту видовжених наноструктур, що підтверджується результатами растрової електронної мікроскопії (РЕМ) та рентгенівської дифрактометрії. Це вказує на високу чутливість процесу синтезу до змін концентрації каталізатора, що є важливим аспектом для подальшої оптимізації умов виробництва наноматеріалів.

У роботі також наведено графічні представлення розподілу нанопоясів у вигляді гістограм (Рис. 3, Рис. 4), отримані шляхом детального аналізу та обробки зображень, отриманих методом РЕМ. Використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволило здійснити вимірювання довжини та ширини кожного нанопояса. На основі цих даних були побудовані гістограми та обчислено середні розміри нанопоясів: довжина становила 2,3 мкм, а ширина – 42,6 нм.

Важливим аспектом проведеного дослідження було встановлення кореляції між інтенсивністю гідромеханічного перемішування та геометричними характеристиками отриманих наноструктур. Аналіз здійснювався для зразків, синтезованих за наступних параметрів: маса V_2O_5 – 5 г, швидкість перемішування – 500 об/хв, температура реакційного середовища – 25°C, концентрація NaCl – 2 M. Оптимізація цих параметрів сприяла формуванню нанопоясів із визначеними морфологічними характеристиками, що відображено в отриманих експериментальних результатах.

Важливим аспектом проведених досліджень стало використання спеціалізованого програмного забезпечення для детального аналізу отриманих експериментальних даних. Це сприяло підвищенню точності та достовірності результатів, дозволяючи не лише визначити основні геометричні параметри наноструктур, а й створити статистичні моделі розподілу їхніх розмірів.

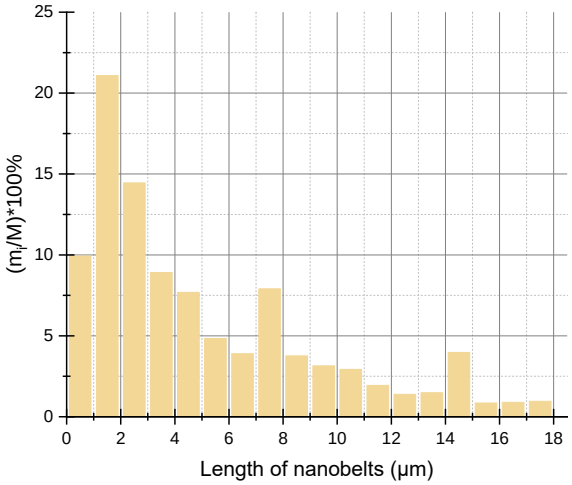

Рис.3. Гістограмма розподілу нанопоясів по масі від загальної маси виміряних частинок. Середнє значення довжини синтезованих нанопоясів пентоксиду ванадію становить 2,3 μm.
Fig. 3. Histogram of the distribution of nanobelts by weight from the total mass of the measured particles. The average length of the synthesized vanadium pentoxide nanobelts is 2.3 μm.

Систематичний аналіз показав, що інтенсивність гідромеханічного перемішування має безпосередній вплив на морфологію синтезованих нанопоясів. Зокрема, встановлено, що зі збільшенням швидкості перемішування середня довжина нанопоясів зменшується, що вказує на тісний зв’язок між параметрами процесу синтезу та структурними характеристиками отриманого матеріалу.

Окрім того, визначено, що такі умови синтезу, як температура та концентрація реакційного середовища, також відіграють важливу роль у формуванні наноструктур, впливаючи на їхню форму, розміри та кінетику росту. Однак зміна цих параметрів не завжди позитивно позначається на якості кінцевого продукту. Детальне дослідження взаємозв’язків між зазначеними параметрами дозволило встановити оптимальні умови синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію з високим аспектним відношенням і унікальними фізико-хімічними властивостями.

Загалом, проведене дослідження встановлює зв'язок між кінетикою структурних перетворень та фізико-хімічними характеристиками суспензії в процесі гідромеханічного синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію. Отримані результати можуть стати основою для подальших наукових досліджень, спрямованих на вдосконалення методів синтезу та розширення практичного застосування наноматеріалів.

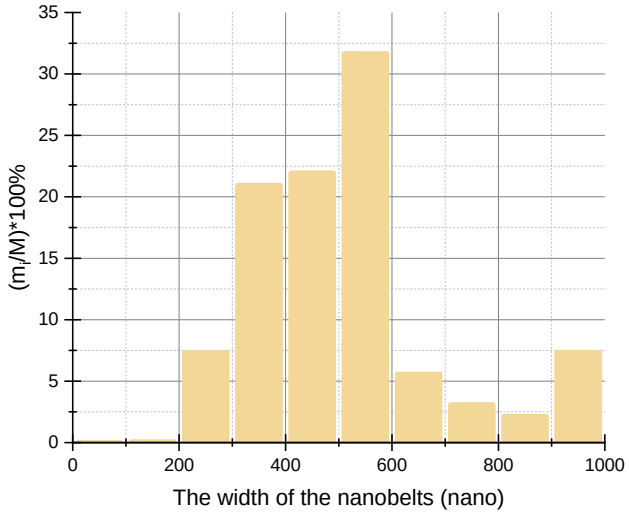

Рис.4. Гістограмма розподілу нанопоясів по ширині. Середнє значення ширини синтезованих нанопоясів пентоксиду ванадію становить 42.6 nm.
Fig. 4. Histogram of the distribution of nanobelts by width. The average width of the synthesized vanadium pentoxide nanobelts is 42.6 nm.

3. Висновки

У цьому дослідженні встановлено кореляційні зв'язки між кінетикою структурних перетворень та фізико-хімічними характеристиками суспензії в процесі гідромеханічного синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію (V_2O_5). Виявлено, що інтенсивність механічного перемішування, температура середовища, концентрація вихідних реагентів і присутність каталізаторів відіграють критичну роль у формуванні наноструктур.

Дослідження показали, що варіювання параметрів синтезу дозволяє контролювати морфологію отриманих наноструктур. Зокрема, встановлено, що збільшення швидкості перемішування зменшує середню довжину нанопоясів, а зміна концентрації NaCl безпосередньо впливає на кінетику росту та якість отриманих наноматеріалів. Аналіз часової залежності зміни водневого показника (pH) підтвердив каталізуючу дію натрій хлориду, що дозволяє суттєво прискорювати процес синтезу наноструктур.

Методи растрової електронної мікроскопії (РЕМ) та рентгенівської дифрактометрії підтвердили, що за оптимальних умов синтезу відбувається повне перетворення кристалічних агломератів у нанопояси з визначеними фізико-хімічними властивостями. Використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволило отримати статистичні моделі розподілу геометричних характеристик нанопоясів, що сприяло більш детальному аналізу впливу різних параметрів на кінцеву морфологію структур.

Загалом, отримані результати підтверджують перспективність використання гідромеханічного синтезу як ефективного методу для формування наноматеріалів із контрольованими характеристиками. Подальші дослідження в цьому напрямку можуть бути спрямовані на оптимізацію технологічних параметрів з метою підвищення

однорідності отриманих наноструктур та їх застосування в електроніці, енергетиці, оптоелектроніці й інших високотехнологічних галузях.

Подяки

Автори висловлюють щиру вдячність Андрію Михайловичу Гусаку за змістовні дискусії та підтримку під час проведення експериментальних досліджень. Робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України (державний реєстраційний номер: 0121U113219).

Список використаної літератури:

1. Gusak A. M. Application of ballisticjumps 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
2. Gusak A. M. Anisotropic Nucleation, Growth and Ripening under Stirring–A Phenomenological Model / A. M. Gusak, Y. Huriev, J. W. Schmelzer. // Entropy. – 2020. – Vol. 22, No. 11. – P. 1254. – Режим доступу: https://doi.org/10.3390/e22111254
3. 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
4. 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
5. 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
6. Xianhong R. Ambient dissolution-recrystallization towards large-scale preparation of V_2O_5 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
7. Zhang, J. Carbon Quantum Dots Promote Coupled Valence Engineering of V_2O_5 Nanobelts for High-Performance Aqueous Zinc-Ion Batteries / Zhang, J., Wei, S., Wang, H., Liu, H., Zhang, Y., Liu, S., Wang, Z., & Lu, X. // ChemSusChem. – 2021. – V. 14. – P. 2075–2082. – Режим доступу: https://doi.org/10.1002/cssc.202100223
8. Zhang, S. Large-scale preparation of solution-processable one-dimensional V2O5 nanobelts with ultrahigh aspect ratio for bifunctional multicolor electrochromic and supercapacitor applications / Zhang, S., Chen, S., Luo, Y., Yan, B., Gu, Y., Yang, F., & Cao, Y // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – V. 842.– Режим доступу:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155882
9. Коломієць Д. І. Гідротермічний метод синтезу нанопоясків оксиду ванадію V_2O_5 при інтенсивному перемішуванні / Коломієць Д. І., Пасічний М. О., Король Я. Д. // 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. Синтез нанопоясків оксиду ванадію та використання концепції балістичних стрибків для опису їх утворення / Коломієць Д. І., Пасічний М. О // 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. A. M. Gusak, Y.I. Huriev, D.S. Gertsricken. (2020) Application of ballisticjumps 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

2. 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

3. 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

4. R. Xianhong, T. Yuxin, O. Malyi, A. Gusak, Y. Zhang. (2016) Ambient dissolution-recrystallization towards large-scale preparation of V_2O_5 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

5. 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

6. 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

7. Zhang, J., Wei, S., Wang, H., Liu, H., Zhang, Y., Liu, S., Wang, Z., & Lu, X. (2021). Carbon Quantum Dots Promote Coupled Valence Engineering of V_2O_5 Nanobelts for High-Performance Aqueous Zinc-Ion Batteries. ChemSusChem, 14(10), 2075–2082 . – Retrieved from: https://doi.org/10.1002/cssc.202100223

8. Zhang, S., Chen, S., Luo, Y., Yan, B., Gu, Y., Yang, F., & Cao, Y. (2020). Large-scale preparation of solution-processable one-dimensional V2O5 nanobelts with ultrahigh aspect ratio for bifunctional multicolor electrochromic and supercapacitor applications. Journal of Alloys and Compounds, 842, 15588. – Retrieved from: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155882

9. Kolomiets D.I., Pasichniy 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 from https://doi.org/ 10.31651/2076-5851-2021-12-31

D. I. Kolomiiets
Lecturer of the Department of Physics,
The Bohdan Khmelnytsky NationalUniversity of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
denyskolomiiets95@gmail.com

M. O. Pasichnyy
PhD, Associate professor, Head of the Department of Physics,
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
pasichnyy@ukr.net

Ya. D. Korol
PhD, Associate professor of the Department of Physics,
The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
yaking@ukr.net

CORRELATIONS BETWEEN THE KINETICS OF STRUCTURAL TRANSFORMATIONS AND PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE SUSPENSION DURING THE HYDROMECHANICAL SYNTHESIS OF VANADIUM PENTOXIDE NANOBELTS

This study investigates the correlations between the kinetics of structural transformations and the physicochemical characteristics of suspensions during the hydromechanical synthesis of vanadium pentoxide (V_2O_5) nanobelts. One-dimensional nanostructures such as nanobelts, nanowires, and nanotubes are of great interest due to their unique physical properties and wide-ranging applications in nanoelectronics and optoelectronics. Hydromechanical synthesis is highlighted as an environmentally friendly and parameter-flexible technique for controlled nanostructure formation.

The research focuses on the effects of key parameters—including pH, temperature, stirring intensity, and sodium chloride (NaCl) concentration—on the morphology and quality of the nanobelts. Using commercial V_2O_5 powder, suspensions were prepared and processed under varied conditions in a custom-designed reactor enabling precise control of temperature and mixing speed. Changes in pH, viscosity, and electrical conductivity were monitored throughout the synthesis.

Two main experimental variables were investigated: stirring speed and NaCl concentration. Results show that increased stirring enhances the formation of elongated nanostructures by altering crystallization dynamics. High-speed mixing induces shear stresses that disturb chemical equilibrium, promoting anisotropic growth and significantly reducing synthesis time. NaCl was identified as a catalytic agent that further accelerates the transformation of V_2O_5 agglomerates into nanobelts. Without NaCl, full transformation may take months, but with its addition, it occurs within a week.

The morphology of the synthesized nanobelts was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), confirming successful formation with average dimensions of ~2.3 μm in length and 42.6 nm in width. SEM image data were used to generate histograms and statistical distributions of nanobelt sizes via specialized software. The analysis confirmed a strong link between synthesis conditions and the resulting dimensions of the nanostructures.

In addition, changes in pH and other suspension properties served as real-time indicators of synthesis progress. Lowering pH correlated with increased viscosity and noticeable color changes, which tracked the formation of colloidal solutions and nanobelts.

These findings demonstrate that understanding and controlling the relationship between suspension parameters and structural transformation kinetics is critical to optimizing hydromechanical synthesis. The results enhance the knowledge of nanobelt growth mechanisms and offer a framework for improving synthesis efficiency and material quality. This contributes to the broader development of V_2O_5 nanobelts for applications in energy storage, catalysis, and next-generation electronic and photonic technologies.

Keywords: 1metal oxides, vanadium pentoxide, hydromechanical synthesis, nanobelts, pH value.

Одержано редакцією 26.09.2023
Прийнято до друку 15.10.2023