

Ол.Д. Золотаренко ^{1,2}, О.П. Рудакова ^{1,2}, Ан.Д. Золотаренко ^{1,2}, Н.Є. Аханова ^{3,4},
 М. Уалханова ⁴, Д.В. Щур ^{2,6}, М.Т. Габдулін ³, Т.В. Мироненко ², О.Д. Золотаренко ²,
 М.В. Чимбай ^{1,2}, І.В. Загорулько ⁵, О.О. Гаврилюк ¹

ОСОБЛИВОСТІ СИНТЕЗУ ПРЯМИХ ТА СПІРАЛЬНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОТРУБОК ПІРОЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ

¹ Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка Національної академії наук України
 вул. Генерала Наумова, 17, Київ, 03164, Україна, E-mail: o.d.zolotarengo@gmail.com

² Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України
 вул. Кржижанівського, 3, Київ, 03142, Україна, E-mail: a.d.zolotarengo@gmail.com

³ Казахстансько-Британський технічний університет
 вул. Толе бі, 59, Алмати, 050040, Казахстан

⁴ Національна нанотехнологічна лабораторія відкритого типу,
 Казахський національний університет ім. Аль-Фарабі
 пр. Аль-Фарабі, 71, Алмати, 050040, Казахстан

⁵ Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова Національної академії наук України
 бул. Академіка Вернадського, 36, Київ, 03142, Україна

⁶ Інститут прикладної фізики Національної академії наук України
 вул. Петропавлівська, 58, Суми, 40000, Україна

Мета науководослідної роботи полягала у піролітичному синтезі вуглецевих нанотрубок прямого та спірального типу приблизно однакового діаметра, а також їхній комплексний аналіз. Для вирішення поставленої задачі була створена нова установка для піролітичного синтезу вуглецевих наноструктур (ВНС), з реактором синтезу, який для кожного процесу синтезу може мати свій кут відносно класичного горизонтального положення вісі реактора. Даний реактор дозволив розробити метод отримання конгломератів спіралеподібних багатостінних вуглецевих нанотрубок (СБВНТ) діаметром 15–60 нм та синтезувати прямі багатостінні вуглецеві нанотрубки (ПБВНТ) діаметром від 5 до 60 нм.

Дослідження піролітичного синтезу вуглецевих наноструктур на вертикальному реакторі дозволяє відпрацювати технологію цілеспрямованого синтезу нанотрубок, що мають спіральну форму з певним діаметром та кроком витку.

В рамках роботи також розглянутий та запропонований новий механізм формування спіральних багатостінних вуглецевих нанотрубок, що важливо для їхнього подальшого промислового синтезу та використання їх в композитах на їхній основі.

Запропонована схема умов синтезу вуглецевих наноструктур піролітичним методом.

У роботі проводили термоаналіз, що зафіксував присутність двох різних структур з низькою термостійкістю (ймовірно, аморфний вуглець та вищі вуглеводні). При використанні скануючої і просвічувальної електронної мікроскопії було зафіксовано утворення у вертикальному положенні реактора спіралеподібних нановолокон діаметром 15–60 нм, а у горизонтальному положенні - прямих і злегка вигнутих БВНТ з діаметром нановолокна від 5 до 60 нм. Раманівською спектроскопією підтверджує в обох продуктах синтезу наявність багатошарового вуглецевого трубчастого формування, тобто БВНТ.

Ключеві слова: спіралеподібні багатостінні вуглецеві нанотрубки, прямі багатостінні вуглецеві нанотрубки, вуглецеві наноструктури, вуглецеві наноматеріали, вуглецеві нанотрубки, піроліз, кварцовий реактор

ВСТУП

Сьогодні для створення нових композитів [1–3] все більше необхідна розробка і синтез нових сучасних мікро [4–6] та нанонаповнювачів [7–15]. В першу чергу це стосується широкого спектру вуглецевих наноматеріалів (фуллерени [16–19], © Ол.Д. Золотаренко, О.П. Рудакова, Ан.Д. Золотаренко, Н.Є. Аханова, М. Уалханова, Д.В. Щур, М.Т. Габдулін, Т.В. Мироненко, О.Д. Золотаренко, М.В. Чимбай, І.В. Загорулько, О.О. Гаврилюк, 2023

фуллерити [19, 20], графени [17, 21], вуглецеві нанотрубки [17, 18, 22], ендофуллерени [23]), модифікації яких створюється щорічно [24–27] на модифікованих установках різних методів синтезу [28–34]. При синтезі вуглецевих наноструктур (ВНС) та їхніх модифікацій

ключову роль відіграють каталізатори, тому не менш важливим є вивчення процесів виготовлення власне каталізаторів [23, 29, 32, 35–48] і каталітичної дії. Каталізаторами синтезу наноструктур можуть слугувати солі металів або чисті метали [49–52], сплави [53–55] і їхні механічні суміші [56–58].

Синтезовані наноструктури та композити на їхній основі мають різноманітне призначення та можуть використовуватись в адитивних технологіях для 3D друку складних виробів [59–62]. Існує цілий ряд досліджень в галузі сорбційних процесів [63–69].

Синтезовані наноструктури та композити на їхній основі можуть бути використані в різних галузях промисловості [1–3, 59–62] від автомобінобудування, медицини і біології [70–74] до водневої [59–62, 75–79] і сонячної [80–82] енергетики. Наприклад: вже встановлено, що вуглецеві наноструктури можуть накопичувати водень [75–79] та конкурувати зі створеними і вивченими матеріалами, що вже сьогодні використовуються у сучасних накопичувачах водню [83–100].

Сьогодні з упевненістю можна говорити лише про мало кількісний контрольований синтез конкретних вуглецевих наноструктур (ВНС). Питання про великомасштабний контрольований синтез вуглецевих нанотрубок (ВНТ) все ще залишається невирішеним. Але за тривалий час досліджень було встановлено, що піролізний метод є не тільки найбільш бюджетним для синтезу ВНТ, але й він дає можливість контролювати тип і якість одержуваних ВНТ залежно не тільки від конструкції реактора (горизонтальний або вертикальний), а й від часу синтезу; температури синтезу; виду та типу каталізатора; способу введення енергії; складу газової суміші та джерела газових вуглеводнів у зоні синтезу (рис. 1). Твердий каталізатор може бути у вигляді порошку або злитка чистих металів чи їхніх сплавів. Не менш важливим є використання сипучих порошоків солі металів, що часто використовуються, як каталізатори піролітичного синтезу. Рідкий каталізатор може бути у вигляді розчину солі або суспензії, що дозволяє вводити тверді частинки каталізатора (мікро- та нанорозмірні) в зону синтезу.

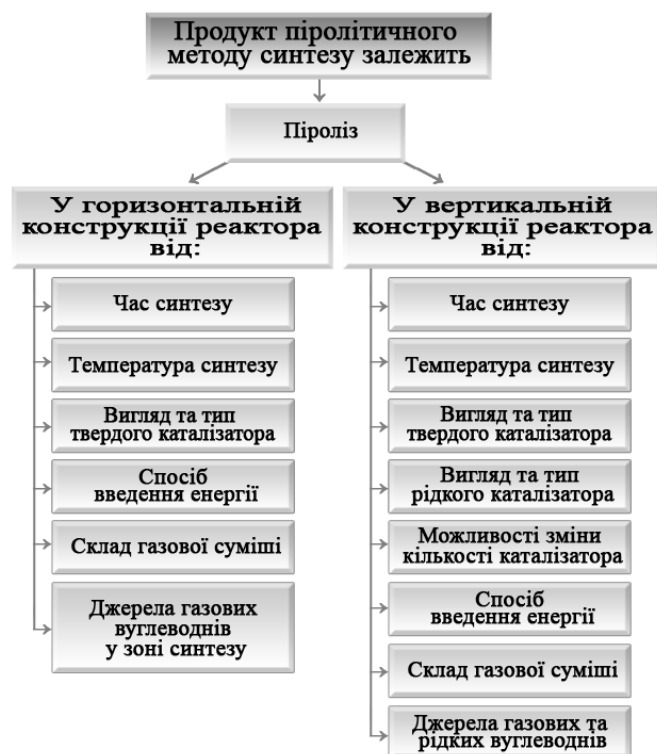
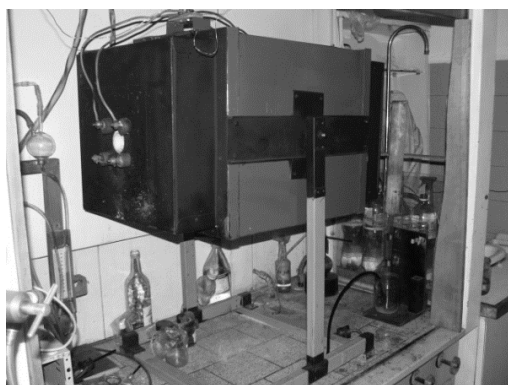


Рис. 1. Умови синтезу продуктів піролітичним методом

Піролізні печі вертикального типу характеризуються більш широким спектром способів впливу на процес синтезу ВНС, оскільки дають можливість у процесі формування ВНС змінювати кількість каталізатора, а також використовувати рідкий каталізатор і рідкі вуглеводні як джерела вихідних реагентів, що поповнюються (рис. 1). Піролітичний метод дозволяє легко змінювати режими синтезу ВНС, використовувати газове середовище різного хімічного складу, а головне – досягати високого відсоткового вмісту вуглецевих нанотрубок різного хімічного складу, будови та морфології у продуктах синтезу (рис. 1).

ОБЛАДНАННЯ

Для синтезу спіральних та прямих багатостінних вуглецевих нанотрубок (БВНТ) використовували метод каталітичного піролізу на спеціально розроблених установках з вертикальним та горизонтальним кварцовим реакторами, виготовлених у лабораторії Національної академії наук України (рис. 2). Створене обладнання дозволяє змінювати кут нахилу реактора, що в процесі синтезу дозволяє використовувати не лише газові суміші, але і рідкі розчини.



a



б

Рис. 2. Піролітична установка з реактором: *a* – в горизонтальному положенні; *б* – у вертикальному положенні

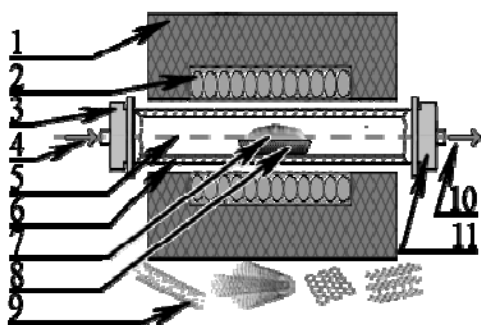


Рис. 3. Схематичне зображення устаткування для піролітичного синтезу ВНС при використанні реактора горизонтального типу

1 – теплоізоляція піролізної печі; *2* – нагрівачі печі; *3* – вхідний фланець реактора з термопарою; *4* – спрямований потік вуглеводневих газів; *5* – вісь реактора; *6* – кварцовий реактор; *7* – шар каталізатора; *8* – підкладка; *9* – синтезовані ВНС; *10* – спрямований потік газів для утилізації; *11* – вихідний фланець реактора

Піролітична установка з горизонтальним реактором синтезу (рис. 2 *a*, 3) складається з кварцового реактора (рис. 3 п. 6), з обох боків обтиснутого фланцями (рис. 3 п. 3 та п. 11),

на одному з яких закріплена термопара (рис. 3. п. 3). У кварцовому реакторі знаходиться підкладка (рис. 3. п. 8) з каталізатором синтезу ВНТ (рис. 3 п. 7) на

поверхні. Підігрів кварцового реактора здійснюється селітовими нагрівачами (рис. 3 п. 2). Вся піролізна піч обшита тепловою ізоляцією для безпеки операторів установки (рис. 3 п. 1). Джерелом вуглецю в зоні синтезу ВНТ у такому реакторі можуть бути вуглеводневі гази та їхні різні суміші. В установку піролізу через вхідний фланець (рис. 3 п. 3) подаються вуглеводневі гази, а через протилежний вихідний фланець (рис. 3 п. 11) виводяться продукти реакції,

забезпечуючи таким чином постійне постачання (рис. 3 п. 4) вихідних реагентів у зону синтезу ВНС (рис. 3 п. 9) вздовж вісі кварцового реактора (рис. 3 п. 5). Гази (рис. 3 п. 10), що виводяться з вихідного фланця (рис. 3 п. 11), в процесі синтезу можуть подаватися і на вхідний фланець (рис. 3 п. 3) для повної утилізації залишкових вуглеводнів, а надлишковий тиск скидається за допомогою спеціального клапана.

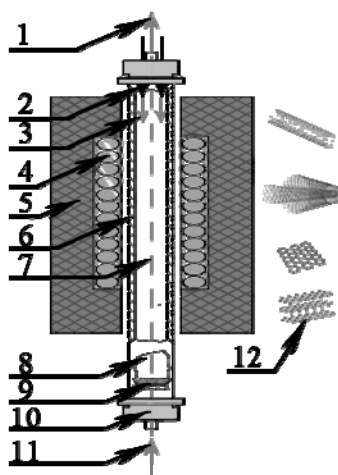


Рис. 4. Принцип дії устаткування для піролітичного синтезу ВНС при використанні реактора вертикального типу:

1 – спрямований потік вуглеводневих газів; 2 – сопла для подачі розчинів; 3 – напрямкові гравітаційні потоки; 4 – нагрівачі печі; 5 – теплова ізоляція піролізної печі; 6 – кварцовий реактор; 7 – вісь реактора; 8 – вуглецеві наноструктури; 9 – платформа збору ВНС; 10 – фланець реактора; 11 – подача вуглеводневих газів; 12 – синтезовані ВНС

Будова і принцип роботи піролітичної установки зі спеціальним вертикальним реактором (рис. 2 б, 4) є аналогічними до піролітичної установки горизонтального типу, однак відрізняється тим, що як джерело вуглецю в зоні синтезу можуть використовуватися як рідкі, так і газоподібні вуглеводні (або їхні суміші).

Установка з вертикальним реактором дозволяє вивчати вплив на механізм синтезу, як процесів конвекції, так і гравітації.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА РЕЗУЛЬТАТИ

Синтез спіральних багатостінних вуглецевих нанотрубок (СБВНТ) проводили в реакторі вертикального типу, де як джерело вуглецю використовували ацетилен і пари толуолу. Процес проводили у кварцовому

реакторі на нікель-мідних (Ni-Cu) каталізаторах у потоці азоту.

У діапазоні 800–1500 К як з ацетилену, так і з парів толуолу були синтезовані вуглецеві нанотрубки та волокна. У ході синтезу БВНТ з парів толуолу при 1155 К у більш охолодженій частині реактора утворювався темнокоричневий конденсат. При пропусканні через реактор ацетилен реагує з газовою фазою, перетворюючись на дим. Дим уловлюється рідинним затвором.

Дослідження методом просвічуальної електронної мікроскопії продуктів синтезу (рис. 5) проводили на обладнанні типу JSM-T20 і “Stereoscan S4-10” з аналізатором EDAX, де було зафіксовано, що в даних експериментальних умовах утворюються спіралеподібні нановолокна діаметром 15–60 нм з кроком витка 100 нм, а середній

діаметр самої спіралі становить 70 нм (рис. 5 а). Спіралі мають різну конфігурацію, можуть переходити в прямі (рис. 5 в, з), переплітатися (рис. 5 в, д) або утворювати розгалужені форми (рис. 5 в, д, е). На більш детальній фотографії електронної мікроскопії СБВНТ можна побачити великі затемнені частини нанотрубки, що повторюються вздовж неї (рис. 5 а II). Також можна побачити каталізатор шириною 10 нм, який розташований у внутрішньому каналі ВНТ

(рис. 5 а I). Довжина каталізатора, що інкапсульований в середину пустоти СБВНТ складає 12.5 нм (рис. 5 а I).

Головною особливістю отриманого продукту є те, що жодна з отриманих трубчастих спіралей не закріплена на каталізаторі одним із кінців і не має на кінцях каталітичних частинок, що суперечить сучасним уявленням про механізм зростання класичних ВНТ.

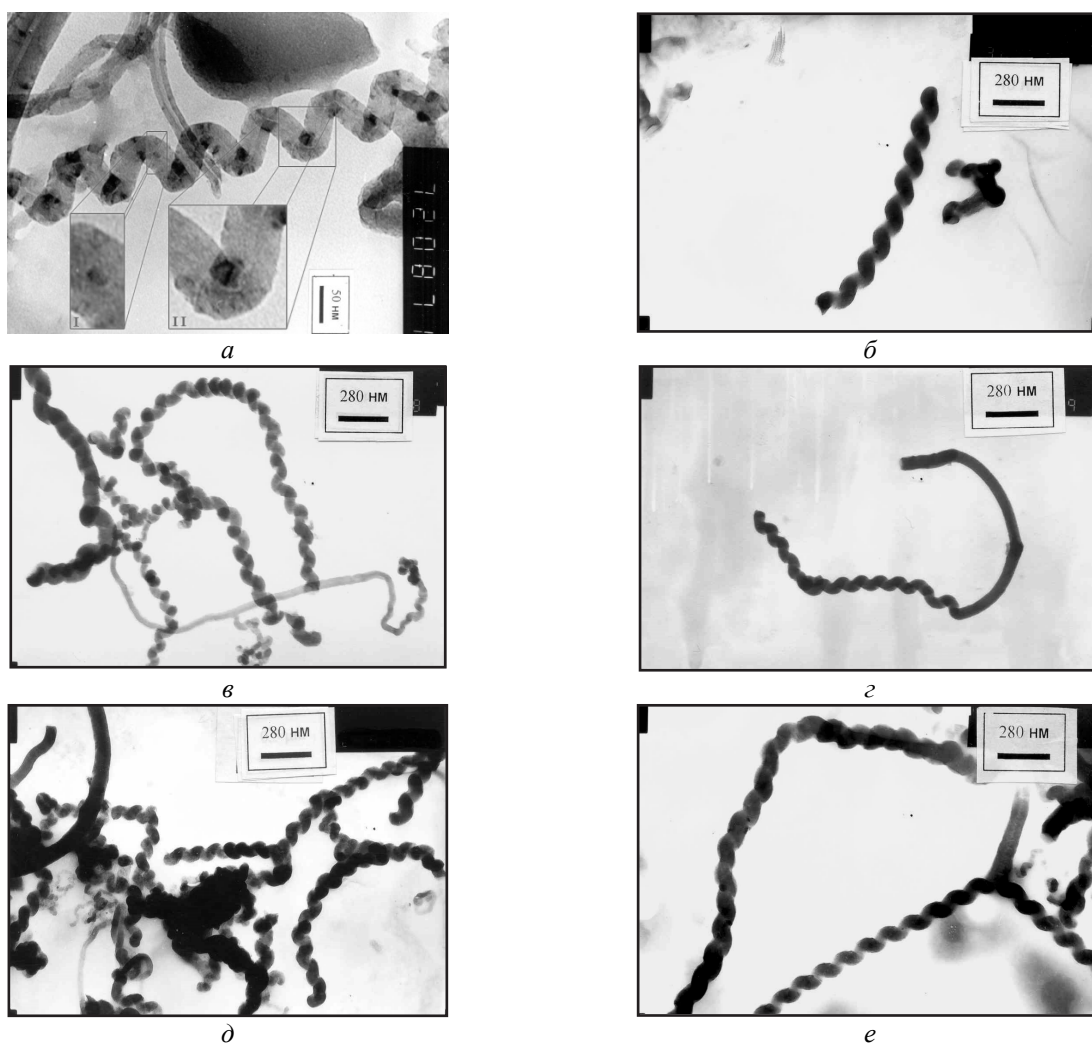


Рис. 5. Електронна просвітлююча мікроскопія продукту синтезу спіралеподібних багатостінних вуглецевих нанотрубок (СБВНТ) у вертикальному піролітичному реакторі. Зміни СБВНТ: (а, б) – структура СБВНТ; (в) – СБВНТ переплітаються; (з) – СБВНТ, що переходять у прямі ВНТ; (д, е) – СБВНТ утворюють розгалужені форми. (I) – розташування каталізатора в пустоті ВНТ. (II) – затемнення при накладанні двох нанотрубок

Спіральні продукти синтезу аналізувалися методом Раманівської спектроскопії, яка підтверджує наявність у продукті синтезу багатощарового вуглецевого

трубчастого формування, тобто БВНТ (рис. 6). Проводили на установці дериватографа Д-1500 термічний аналіз з киснем повітря продуктів піролізу ацетилену на

Ni-Cu каталізаторі, отриманих при температурі синтезу 1500 К (рис. 7 а, Таблиця 1 п. 1), показав, що ВНС окиснювалися в широкому температурному інтервалі (668–973 К), але максимальні швидкості процесу спостерігалися

при значеннях $T_{max} = 859$ К (Таблиця 1 п. 1, 2). Ймовірно, при піролізі ацетилену, окрім вуглецевих нанотрубок, утворюється аморфний вуглець різних модифікацій, що має різну термостійкість (рис. 7).

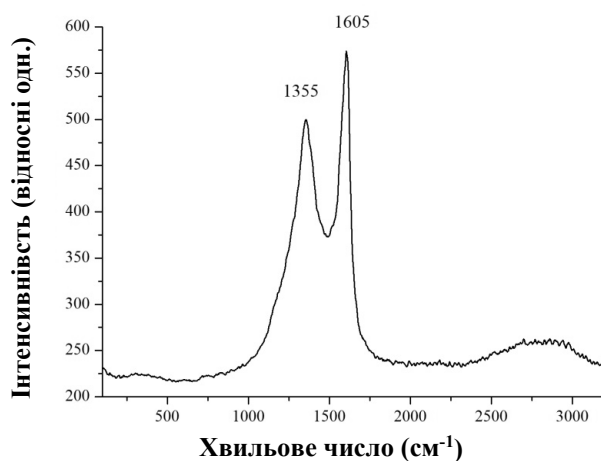


Рис. 6. Раманівський спектр СБВНТ, який підтверджує наявність нанотрубок в продукті синтезу

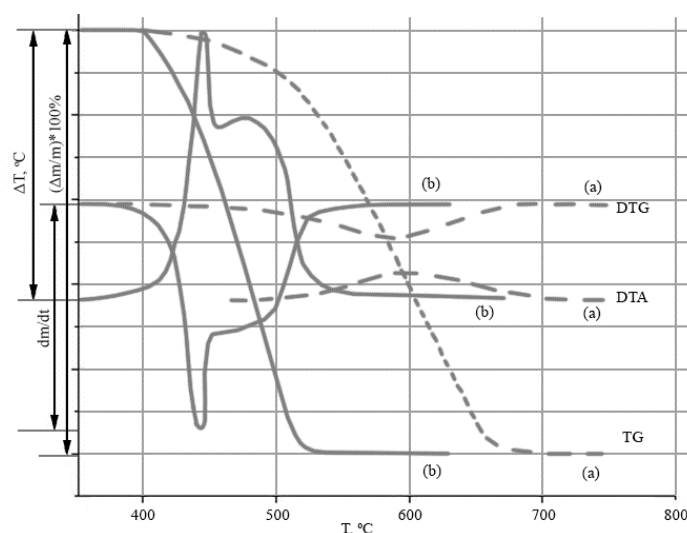


Рис. 7. Термограма продукту піролізу ацетилену на каталізаторі Ni-Cu: а – при 1500 К (пунктирна лінія); б – при 800 К (суцільна лінія)

Таблиця. 1. Результати термоаналізу спіральних багатостінних вуглецевих нанотрубок (СБВНТ)

| № з/п | Матеріал | Температурний інтервал термічної взаємодії, К | DTG | | DTA | |
|-------|---|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | T_{1max} , К | T_{2max} , К | T_{1max} , К | T_{2max} , К |
| 1 | Продукт піролізу ацетилену на Ni-Cu каталізаторі при 1500 К | 669 ÷ 973 | 859 | - | 863 | - |
| 2 | Продукт піролізу ацетилену на Ni-Cu каталізаторі при 800 К | 673 ÷ 803 | 718 | 738 | 718 | 753 |

Якщо температуру піролізу ацетилену на тих самих каталізаторах знижували з 1500 до 800 К (рис. 7 б, Таблиця 1 п. 2), то окиснення продукту синтезу відбувалося в інтервалі 673–803 К. Цьому процесу на кривих DTG і DTA відповідає поява двох гострих піків, що перекриваються ($T_{max} = 718 \text{ К}, 753 \text{ К}$), що свідчить про присутність двох різних структур з низькою термостійкістю (ймовірно, аморфний вуглець та вищі вуглеводні).

Синтез прямих багатостінних вуглецевих нанотрубок проводився в реакторі горизонтального типу (рис. 2 а, 3),

де як джерело вуглецю використовували вуглеводні в газовому стані та їхні суміші при атмосферному тиску. Каталізатор (порошок заліза) на керамічній підкладці встановлювали у середину кварцового реактора. Перед процесом синтезу реактор заповнювали інертним газом (аргоном) і при слабкому його потоці проводили нагрівання від 900 до 1500 К. При 1200 К здійснювалася подача суміші газу метану (CH_4) з воднем (H_2) у пропорції 2:1. При зупинці синтезу горизонтальні реактори ВНС охолоджувалися потоком водню.

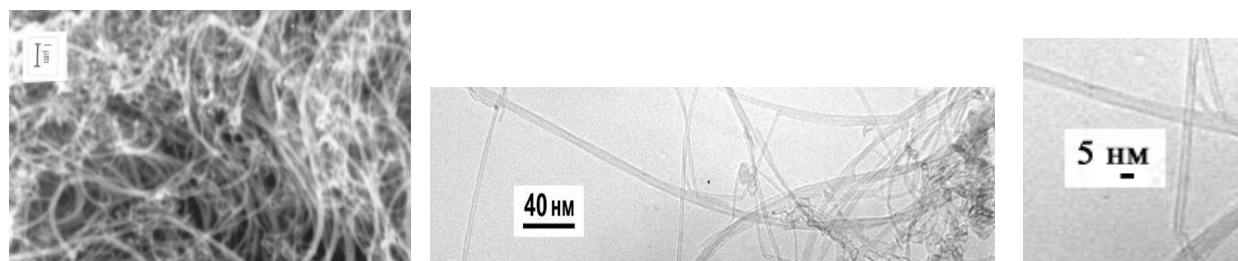


Рис. 8. Електронна просвітлююча мікроскопія продукту синтезу прямих багатостінних вуглецевих нанотрубок у горизонтальному піролітичному реакторі

Таблиця 2. Результати термоаналізу прямих багатостінних вуглецевих нанотрубок (ПБВНТ)

| № з/п | Матеріал | Температурний інтервал термічної взаємодії, К | DTG | DTA |
|-------|--|---|----------------------|----------------------|
| | | | $T_{max}, \text{ К}$ | $T_{max}, \text{ К}$ |
| 1 | Неочищені прямі БВНТ, отримані методом піролізу при 1200 К | 673÷883 | 859 | 858 |

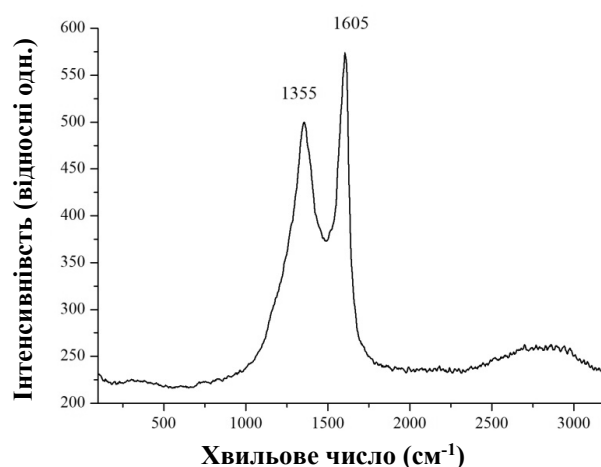


Рис. 9. Раманівський спектр прямих БВНТ, який підтверджує наявність нанотрубок в продукті синтезу

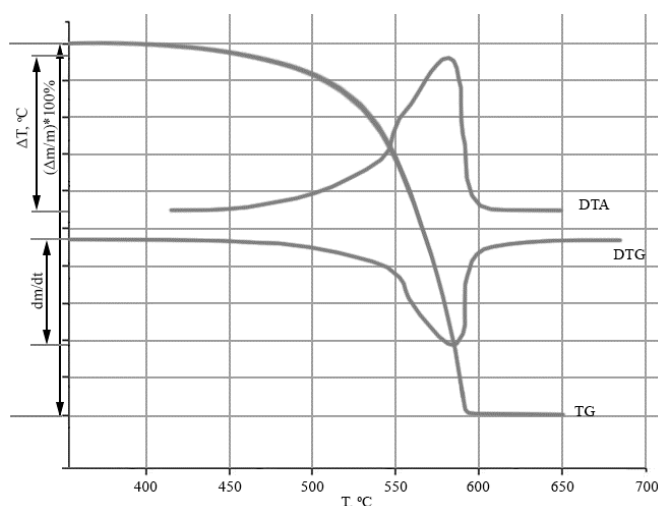


Рис. 10. Термограма неочищених прямих БВНТ, отриманих методом піролізу при 1200 К

Для аналізу продукту синтезу використовували скануючу і просвічувальну електронну мікроскопію на обладнанні типу JSM-T20 і “Stereoscan S4-10” з аналізатором EDAX (рис. 8), де було підтверджено високий вихід продукту з вмістом сформованих прямих і злегка вигнутих БВНТ, де діаметр нановолокна сягав від 5 до 60 нм. Раманівська спектроскопія продуктів синтезу також свідчить про наявність БВНТ у продукті піролітичного синтезу (рис. 9).

Термоаналіз неочищених прямих багат шарових вуглецевих нанотрубок, отриманих методом піролізу при 1200 К, показав, що вони окиснювалися в інтервалі 673÷883 К. Цьому процесу на кривих DTG і DTA відповідає прояв двох гострих піків $T_{\max} = 859$ і 858 К (рис. 10, Таблиця 2 п. 1). Такі показники можуть свідчити про хорошу однорідність зразка, отриманого за заданих умов.

АНАЛІЗ МЕХАНІЗМУ ПРОЦЕСУ УТВОРЕННЯ СБВНТ

У процесі формування ВНТ можуть утворюватись дефекти трьох типів: регібридаційні, топологічні та у вигляді обірваних зв'язків. Подібні дефекти часто трапляються у ВНТ, отриманих за умов високої швидкості синтезу зародків ВНС із подальшим зростанням вуглецевого нанопродукту. При високій швидкості синтезу ВНС завжди погано контролюється сам процес їхнього формування, тому в наноструктурах утворюються дефекти у

вигляді розгалужень (рис. 5 в, д, е), кільцевих поворотів (рис. 5 в, з), вигинів (рис. 5 з, 8), а також спіралеподібних об'єктів (рис. 5 а, б). Будь-які вигини ВНТ призводитимуть до зміни їхньої провідності, що відіграє важливу роль у перспективі широкого застосування дефектних ВНТ.

Дефекти обов'язково присутні у всіх багатостінних нанотрубках. Утворення подібних дефектів призводить до втілення п'яти- та семикутних кілець вуглецю в гексагональну стінку ВНТ. Для формування спіралеподібної багатостінної нанотрубки вуглецю необхідно створювати умови, необхідні для регулярного (упорядкованого) розташування таких дефектів.

У наших експериментах із синтезу СБВНТ можливі два варіанти утворення спіральних наноструктурю.

Спосіб I: скручування під впливом механічного навантаження. При застосуванні такого способу під впливом тиску втрачається стійкість центрального стрижня ВНТ, внаслідок чого з'являється місце для утворення поздовжніх згинів. Ця теорія не суперечить теорії Л. Ейлера для визначення критичної сили стисненого стрижня, що призводить до його скручування в спіраль. Згідно з цією теорією, при недостатній силі критичного стиснення ВНТ не скрутиться в спіраль, а зігнеться в дугу (рис. 5 в, з).

Спосіб II: пружний вигин прямої нанотрубки. Цей спосіб передбачає формування спіралі безпосередньо під час зростання ВНТ. Таке стає можливим завдяки

чергуванню парних топологічних дефектів п'ятикутник-семикутник у гексагональній ґратці. П'ятикутник викликатиме позитивну кривизну, а семикутник – негативну. Кожна пара дефектів може скручувати трубку під кутами від 0° до 36°. Таким чином, якщо створена кривизна розташована не в одній площині, а йде послідовно, утворюючи поворот в одну сторону, це призведе до формування СБВНТ (рис. 5).

Аналіз методом спектроскопії характеристичних втрат енергії електронів (electron energy loss spectroscopy – EELS), де спіральні багатостінні вуглецеві нанотрубки опромінюються електронами з вузьким діапазоном енергій для вивчення втрати енергії розсіяних електронів, підтверджує теорію даного механізму утворення спіралей за рахунок фіксації в СБВНТ sp^2 - і sp^3 зв'язку між атомами вуглецю (рис. 11) [101]. При цьому уздовж поздовжньої осі СБВНТ домінує тип sp^3 -зв'язку, що пояснює скручення багатостінної вуглецевої нано трубки.

За фотографіями СБВНТ важко зробити точний висновок про механізм їх формування

(рис. 5). Однак автори схильні вважати, що трубчасті спіралі формувалися під час зростання ВНТ за способом II. Більшою мірою на формування спіралеподібної форми впливало підмішування в ацетилен органічної сполуки, отриманої піролізом толуолу, а меншою мірою – турбулентний рух газової суміші, що містить продукти синтезу, які вилучались з реактора піролітичного синтезу зустрічним потоком азоту через верхній фланець та охолоджувались і загартовувались у рідинному затворі для вихідних газів.

При обговоренні структури зростків БВНТ можна розглядати первинні (власне, ОНТ), вторинні (зростки ОНТ з двомірною гексагональною або тривимірною кристалічними структурами) та третинні (нитки, стрічки та кільця зі зростків) структури ВНТ. Ван-дер-Ваальсові сили, що об'єднують ВНТ у зростках, настільки великі, що розділення ВНТ механічним шляхом провести важко. Для цього застосовують функціоналізацію ВНТ ПАР або лінійні полімери певної будови.

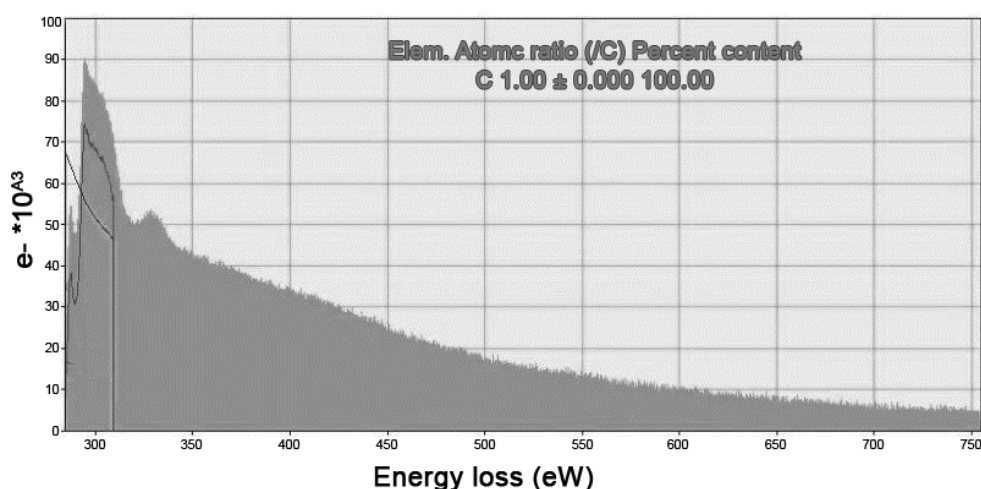


Рис. 11. Спектроскопія втрат енергії електронів (EELS) у піролітичних СБВНТ, отриманих у вертикальному реакторі

Також можна допустити вплив гравітаційних сил та конвекційних потоків у вертикальному реакторі синтезу на механізм процесу синтезу вуглецевих нанотрубок, оскільки синтезовані зародки ВНТ повертаються в зону синтезу зустрічним потоком азоту, що дозволяє створювати наноструктури на основі таких зародків.

ВИСНОВКИ

Запропоновано метод отримання конгломератів спіралеподібних багатостінних вуглецевих нанотрубок (СБВНТ) діаметром 15–60 нм. Встановлено, що установка з вертикальним реактором дозволяє вивчати вплив на механізм синтезу, як процесів конвекції, так і гравітації. Подальші

дослідження допоможуть відпрацювати технологію цілеспрямованого синтезу нанотрубок, що мають спіральну форму з певним діаметром та кроком витка. Запропоновано новий механізм формування спіральних багатостінних вуглецевих

нанотрубок (СБВНТ). Створено схему умов синтезу ВНС піролітичним методом. Розроблено та створено нову установку для піролітичного синтезу вуглецевих наноструктур (ВНС).

Features of the synthesis of straight and spiral carbon nanotubes by the pyrolytic method

Ol.D. Zolotarenko, An.D. Zolotarenko, E.P. Rudakova, N.Y. Akhanova, M. Ualkhanova, D.V. Schur, M.T. Gabdullin, T.V. Myronenko, A.D. Zolotarenko, M.V. Chymbai, I.V. Zagorulko, O.O.Havryliuk

*Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine
17 General Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine, o.d.zolotarenko@gmail.com*

*Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of National Academy of Sciences of Ukraine
3 Krzhizhanovskogo Str., Kyiv, 03142, Ukraine, o.d.zolotarenko@gmail.com*

*Kazakhstan-British Technical University
59 Tole bi Str., Almaty, 050000, Kazakhstan*

*National Nanotechnology Open Laboratory, al-Farabi Kazakh National University
71 al-Farabi Ave., Almaty, 050040, Kazakhstan*

*G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of National Academy of Sciences of Ukraine
36 Academician Vernadsky Blvd., Kyiv, 03142, Ukraine*

*Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences of Ukraine
58 Petropavlivska Str., Sumy, 40000, Ukraine*

The goal of the research work was the pyrolytic synthesis of straight and spiral carbon nanotubes of approximately the same diameter, as well as their comprehensive analysis. To solve the given problem, a new installation for the pyrolytic synthesis of carbon nanostructures (CNS) with a fusion reactor, which for each fusion process can have its own angle relative to the classical horizontal position of the reactor axis. This reactor made it possible to develop a method for obtaining conglomerates of spiral-shaped multi-walled carbon nanotubes with a diameter of 15–60 nm and to synthesize straight multi-walled carbon nanotubes with a diameter of 5 to 60 nm.

The research of pyrolytic synthesis of carbon nanostructures in a vertical reactor allows to work out the technology of purposeful synthesis of nanotubes that have a spiral shape with a certain diameter and pitch of the turn.

As part of the work, a new mechanism for the formation of spiral multi-walled carbon nanotubes is also considered and proposed, which is important for their further industrial synthesis and their use in related composites.

A scheme is proposed of conditions for the synthesis of carbon nanostructures by the pyrolytic method.

Thermal analysis was carried out in the work, which recorded the presence of two different structures with low thermal stability (probably amorphous carbon and higher hydrocarbons). When using scanning and transmission electron microscopy, the formation of spiral nanofibers with a diameter of 15–60 nm in the vertical position of the reactor was recorded, and in the horizontal position of the reactor, the formation of straight and slightly curved MWCTs with a diameter of nanofibers from 5 to 60 nm was found. Raman spectroscopy confirms the presence of multi-layered carbon tubular formation, i.e. MWCT, in both synthesis products.

Keywords: *spiral multi-walled carbon nanotubes, straight multi-walled carbon nanotubes, carbon nanostructures, carbon nanomaterials, carbon nanotubes, pyrolysis, quartz reactor*

ЛІТЕРАТУРА

1. Ushakova L.M., Ivanenko K.I., Sigareva N.V. et al. Influence of nanofiller on the structure and properties of macromolecular compounds // *Physics and Chemistry of Solid State*. – 2022. – V. 23, N 2. – P. 394–400.
2. Sementsov Y., Prikhod'ko G., Kartel M. et al. Carbon nanotubes filled composite materials // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. – 2011. – V. 2. – P. 183–195.
3. Harea E., Stoček R., Storozhuk L. et al. Study of tribological properties of natural rubber containing carbon nanotubes and carbon black as hybrid fillers // *Appl. Nanosci.* – 2019. – V. 9, N 5. – P. 899–906.
4. Karacheviseva L., Kartel M., Kladko V. et al. Functionalization of 2D macroporous silicon under the high-pressure oxidation // *Appl. Surf. Sci.* – 2018. – V. 434 – P. 142–147.
5. Kozak A.O., Porada O.K., Ivashchenko V.I. et al. Comparative investigation of Si-C-N Films prepared by plasma enhanced chemical vapour deposition and magnetron sputtering // *Appl. Surf. Sci.* – 2017. – V. 425. – P. 646–653.
6. Ivashchenko V.I., Turchi P.E.A., Shevchenko V.I. Simulations of indentation-induced phase transformations in crystalline and amorphous silicon // *Phys. Rev. B*. – 2008. – V. 78, N 3. – P. 035205.
7. Krupskaya T.V., Turov V.V., Barvinchenko V.M. et al. Influence of the “wetting–drying” compaction on the adsorptive characteristics of nanosilica A-300 // *Adsorpt. Sci. Technol.* – 2018. – V. 36, N 1–2. – P. 300–310.
8. Gun'ko V.M., Turov V.V., Pakhlov E.M. et al. Blends of amorphous/crystalline nanoalumina and hydrophobic amorphous nanosilica // *J. Non-Cryst. Solids*. – 2018. – V. 500. – P. 351–358.
9. Barany S., Kartel N., Meszaros R. Electrokinetic potential of multilayer carbon nanotubes in aqueous solutions of electrolytes and surfactants // *Colloid J.* – 2014. – V. 76, N 5. – P. 509–513.
10. Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupskaya T.V. et al. Polymethylsiloxane alone and in composition with nanosilica under various conditions // *J. Colloid Interface Sci.* – 2019. – V. 541. – P. 213–225.
11. Biliuk A.A., Semchuk O.Y., Havryliuk O.O. Kinetic theory of absorption of ultrashort laser pulses by ensembles of metallic nanoparticles under conditions of surface plasmon resonance // *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. – 2022. – V. 13, N 2. – P. 190–196.
12. Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupskaya T.V., Pakhlov E.M. Behavior of water and methane bound to hydrophilic and hydrophobic nanosilicas and their mixture // *Chem. Phys. Lett.* – 2017. – V. 690. – P. 25–30.
13. Gun'ko V.M., Turov V.V., Protsak I. et al. Interfacial phenomena in composites with nanostructured succinic acid bound to hydrophilic and hydrophobic nanosilicas // *Colloid Interface Sci. Commun.* – 2020. – V. 35. – P. 100251.
14. Protsak I., Gun'ko V.M., Turov V.V. et al. Nanostructured polymethylsiloxane/fumed silica blends // *Materials*. – 2019. – V. 12, N 15. – P. 2409.
15. Turov V.V., Gun'ko V.M., Krupskaya T.V. et al. Interfacial behavior of polar and nonpolar frozen/unfrozen liquids interacting with hydrophilic and hydrophobic nanosilicas alone and in blends // *J. Colloid Interface Sci.* – 2021. – V. 588. – P. 70–83.
16. Zaginaichenko S.Y., Lysenko E.A., Golovchenko T.N., Javadov N.F. The forming peculiarities of C₆₀ molecule // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Part F2*. – 2008. – P. 53–65.
17. Золотаренко Ол.Д., Рудакова О.П., Аханова Н.Е. та ін. Порівняльний аналіз продуктів синтезу фуллеренів і вуглецевих наноструктур при використанні графіту марки ЕГСП та МПГ-7 // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. – 2022. – Т. 20, № 3. – С. 725–744.
18. Gun'ko V.M., Turov V.V., Zarko V.I. et al. Unusual interfacial phenomena at a surface of fullerite and carbon nanotubes // *Chem. Phys.* – V. 459. – P. 172–185.
19. Nishchenko M.M., Likhatorovich S.P., Dubovoy A.G., Rashevskaya T.A. Positron annihilation in C₆₀ fullerites and fullerene-like nanovoids // *Carbon*. – 2003. – V. 41, N 7. – P. 1381–1385.
20. Lad'yanov V.I., Nikonova R.M., Larionova N.S. et al. Deformation-induced changes in the structure of fullerites C_{60/70} during their mechanical activation // *Phys. Solid State*. – 2013. – V. 55, N 6. – P. 1319–1324.
21. Kartel M.T., Voitko K.V., Grebelna Y.V. et al. Changes in the structure and properties of graphene oxide surfaces during reduction and modification // *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. – 2022. – V. 13, N 2. – P. 179–189.
22. Sementsov Yu.I., Cherniuk O.A., Zhuravskiy S.V. et al. Synthesis and catalytic properties of nitrogen-containing carbon nanotubes // *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. – 2021. – V. 12, N 2. – P. 135–143.
23. Matysina Z. A., Zolotarev O. D., Rudakova O. P. et al. Iron in Endometallofullerenes // *Prog. Phys. Met.* – 2022. – V. 23, N 3. – P. 510–527.
24. Schur D.V., Dubovoy A.G., Zaginaichenko S.Yu. et al. Synthesis of carbon nanostructures in gaseous and liquid medium // *NATO Security through Science Series A: Chemistry and Biology*. – 2007. – P. 199–212.
25. Zaginaichenko S.Y., Matysina Z.A. The peculiarities of carbon interaction with catalysts during the synthesis of carbon nanomaterials // *Carbon*. – 2003. – V. 41, N 7. – P. 1349–1355.

26. Rud A.D., Kiryan I.M. Quantitative analysis of the local atomic structure in disordered carbon // *J. Non-Cryst. Solids*. – 2014. – V. 386. – P. 1–7.
27. Matvienko Y., Rud A., Polishchuk S. et al. Effect of graphite additives on solid-state reactions in eutectic Al–Cu powder mixtures during high-energy ball milling // *Appl. Nanosci.* – 2020. – V. 10, N 8. – P. 2803–2811.
28. Boguslavskii L.Z., Rud' A.D., Kir'yan I.M. et al. Properties of carbon nanomaterials produced from gaseous raw materials using high-frequency electrodischarge processing // *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* – 2015. – V. 51, N 2. – P. 105–110.
29. Matysina Z.A., Zolotareno O.I.D., Ualkhanova M. et al. Electric Arc Methods to Synthesize Carbon Nanostructures // *Prog. Phys. Met.* – 2022. – V. 23, N 3. – P. 528–559.
30. Yakymchuk O.M., Perepelytsina O.M., Rud A.D. et al. Impact of carbon nanomaterials on the formation of multicellular spheroids by tumor cells // *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*. – 2014. – V. 211, N 12. – P. 2778–2784.
31. Kartel N.T., Gerasimenko N.V., Tsyba N.N. et al. Synthesis and study of carbon sorbent prepared from polyethylene terephthalate // *Russ. J. Appl. Chem.* – 2001. – V. 74, N 10. – P. 1765–1767.
32. Zolotareno O.I.D., Ualkhanova M.N., Rudakova E.P. et al. Advantages and disadvantages of electric arc methods for the synthesis of carbon nanostructures // *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni.* – 2022. – V. 13, N 2. – P. 209–235. [in Ukrainian].
33. Oreshkin V.I., Chaikovskii S.A., Labetskaya N.A. et al. Phase transformations of carbon under extreme energy action // *Tech. Phys.* – 2012. – V. 57, N 2. – P. 198–202.
34. Rud A.D., Lakhina A.M., Mikhailova S.S. et al. Structure of Mg–C nanocomposites produced by mechanochemical synthesis // *J. Alloys Compd.* – 2011. – V. 509, N 2. – P. S592–S594.
35. Havryliuk O.O., Semchuk O.Y. Formation of periodic structures on the solid surface under laser irradiation // *Ukr. J. Phys.* – 2017. – V. 62, N 1. – P. 20–32.
36. Ivashchenko V.I., Shevchenko V.I. Effects of short-range disorder upon electronic properties of a–SiC alloys // *Appl. Surf. Sci.* – 2001. – V. 184, N 1–4. – P. 137–143.
37. Biliuk A.A., Semchuk O.Y., Havryliuk O.O. Width of the surface plasmon resonance line in spherical metal nanoparticles // *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* – 2020. – V. 23, N 3. – P. 308–315.
38. Baglyuk G.A., Poznyak L.A. The sintering of powder metallurgy high-speed steel with activating additions // *Powder Metall. Met. Ceram.* – 2002. – V. 41, N 7–8. – P. 366–368.
39. Ilyin A.P., Mostovshchikov A.V., Root L.O. et al. Effect of beta-radiation exposure on the parameters of aluminum micropowders activity // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. – 2019. – V. 330, N 8. – P. 87–93.
40. Ivashchenko V.I., Turchi P.E.A., Shevchenko V.I. Phase transformation B₁ to B₂ in TiC, TiN, ZrC and ZrN under pressure // *Condens. Matter Phys.* – 2013. – V. 16, N 3. – P. 33602.
41. Onoprienko A.A., Ivashchenko V.I., Dub S.N. et al. Microstructure and mechanical properties of hard Ti–Si–C–N films deposited by dc magnetron sputtering of multicomponent Ti/C/Si target // *Surf. Coat. Technol.* – 2011. – V. 205, N 21–22. – P. 5068–5072.
42. Khomenko E.V., Baglyuk G.A., Minakova R.V. Effect of deformation processing on the properties of Cu–50 % Cr composite // *Powder Metall. Met. Ceram.* – 2009. – V. 48, N 3–4. – P. 211–215.
43. Kozak A.O., Ivashchenko V.I., Porada O.K. et al. Structural, optoelectronic and mechanical properties of PECVD Si–C–N films: An effect of substrate bias // *Mater. Sci. Semicond. Process.* – 2018. – V. 88. – P. 65–72.
44. Semchuk O.Y., Biliuk A.A., Havryliuk O.O. The Kinetic Theory of the Width of Surface Plasmon Resonance Line in Metal Nanoparticles // *Springer Proceedings in Physics*. – 2021. – V. 264. – P. 3–10.
45. Ivashchenko V.I., Turchi P.E.A., Shevchenko V.I., Olifan E.I. First-principles study of phase stability of stoichiometric vanadium nitrides // *Phys. Rev. B*. – 2011. – V. 84, N 17. – P. 174108.
46. Baglyuk G.A., Terekhov V.N., Ternovoi Y.F. Structure and properties of powder austenitic die steels // *Powder Metall. Met. Ceram.* – 2006. – V. 45, N 7–8. – P. 317–320.
47. Tolochyn O.I., Baglyuk G.A., Tolochyna O.V. et al. Structure and Physicomechanical Properties of the Fe₃Al Intermetallic Compound Obtained by Impact Hot Compaction // *Mater. Sci.* – 2021. – V. 56, N 4. – P. 499–508.
48. Ivashchenko V.I., Vepřek S. First-principles molecular dynamics study of the thermal stability of the BN, AlN, SiC and SiN interfacial layers in TiN-based heterostructures: Comparison with experiments // *Thin Solid Films*. – 2013. – V. 545. – P. 391–400.
49. Nastasiienko N., Palianytsia B., Kartel M. et al. Thermal transformation of caffeic acid on the nanoceria surface studied by temperature programmed desorption mass-spectrometry, thermogravimetric analysis and ft–ir spectroscopy // *Colloids and Interfaces*. – 2019. – V. 3, N 1. – P. 34.
50. Abdullin K.A., Gabdullin M.T., Gritsenko L.V. et al. Electrical, optical, and photoluminescence properties of ZnO films subjected to thermal annealing and treatment in hydrogen plasma // *Semiconductors*. – 2016. – V. 50, N 8. – P. 1010–1014.

51. Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Zabrodina I.K. et al. Measuring the changes in copper nanopowder conductivity during heating as a method for diagnosing its thermal stability // Key Eng. Mater. – 2018. – V. 769. – P. 146–151.
52. Baglyuk G.A., Ivasyshyn O.M., Stasyuk O.O., Savvakina D.G. Sintered metals and alloys: The effect of charge component composition on the structure and properties of titanium matrix sintered composites with high-modulus compounds // Powder Metall. Met. Ceram. – 2017. – V. 56, N 1–2. – P. 59–68.
53. Baglyuk G.A., Sosnovskii L.A., Volfman V.I. Effect of carbon content on the properties of sintered steels doped with manganese and copper // Powder Metall. Met. Ceram. – 2011. – V. 50, N 3–4. – P. 189–193.
54. Baglyuk G.A., Tolochin A.I., Tolochina A.V. et al. Effect of Process Conditions on the Structure and Properties of the Hot-Forged Fe₃Al Intermetallic Alloy // Powder Metall. Met. Ceram. – 2016. – V. 55, N 5–6. – P. 297–305.
55. Baglyuk G.A., Poznyak L.A. Sintered wear-resistant iron-based materials. I. Materials fabricated by sintering and impregnation // Poroshkovaya Metallurgiya. – 2001. – V. 1–2. – P. 44–53.
56. Sizonenko O.N., Baglyuk G.A., Taftai E.I. et al. Dispersion and carburization of titanium powders by electric discharge // Powder Metall. Met. Ceram. – 2013. – V. 52, N 5–6. – P. 247–253.
57. Ivashchenko V.I., Veprek S., Turchi P.E.A. et al. First-principles molecular dynamics investigation of thermal and mechanical stability of the TiN(001)/AlN and ZrN(001)/AlN heterostructures // Thin Solid Films. – V. 564. – P.284–293.
58. Baglyuk G.A., Napara-Volgina S.G., Vol'fman V.I. et al. Thermal synthesis of Fe-B 4C powder master alloys // Powder Metall. Met. Ceram. – 2009. – V. 48, N 7–8. – P. 381–383.
59. Zolotareno O.D., Rudakova E.P., Zolotareno A.D. et al. Platinum-containing carbon nanostructures for the creation of electrically conductive ceramics using 3D printing of CJP technology // Him. Fiz. Tehnol. Poverhni. – 2022. – V. 13, N 3. – P. 259–273.
60. Zolotareno O.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y. et al. Plasmochemical Synthesis of Platinum-Containing Carbon Nanostructures Suitable for CJP 3D-Printing // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2022. – V. 44, N 3. – P. 343.
61. Zolotareno O.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y. et al. Electrically conductive composites based on TiO₂ and carbon nanostructures manufactured using 3D printing of CJP technology // Him. Fiz. Tehnol. Poverhni. – 2022. – V. 13, N 4. – P. 415–424.
62. Zolotareno O.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y. et al. Electric Conductive Composites Based on Metal Oxides and Carbon Nanostructures // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2021. – V. 43, N 10. – P. 1417–1430.
63. Stavitskaya S.S., Mironyuk T.I., Kartel N.T., Strelko V.V. Sorption characteristics of “food fibers” in secondary products of processing of vegetable raw materials // Russ. J. Appl. Chem. – 2001. – V. 74, N 4. – P. 592–595.
64. Zakutevskii O.I., Psareva T.S., Strelko V.V., Kartel N.T. Sorption of U(VI) from aqueous solutions with carbon sorbents // Radiochemistry. – 2007. – V. 49, N 1. – P. 67–71.
65. Kartel M., Galysh V. New composite sorbents for caesium and strontium ions sorption // Chemistry Journal of Moldova. – 2017. – V. 12, N 1. – P. 37–44.
66. Gun'ko V.M., Turov V.V., Protsak I.S. et al. Effects of pre-adsorbed water on methane adsorption onto blends with hydrophobic and hydrophilic nanosilicas // Colloid Surf. A. – 2019. – V. 570. – P. 471–480.
67. Galysh V., Sevastyanova O., Kartel M. et al. Impact of ferrocyanide salts on the thermo-oxidative degradation of lignocellulosic sorbents // J. Therm. Anal. Calorim. – 2017. – V. 128, N 2. – P. 1019–1025.
68. Ivashchenko V.I., Turchi P.E.A., Shevchenko V.I. et al. Atomic and electronic structures of a-SiC:H from tight-binding molecular dynamics // J. Phys.: Condens. Matter. – 2003. – V. 15, N 24. – P. 4119–4126.
69. Gabdullin M.T., Khamitova K.K., Ismailov D.V. et al. Use of nanostructured materials for the sorption of heavy metals ions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 511, N 1. – P. 12044.
70. Sementsov Yu.I., Prikhod'ko G.P., Melezhik A.V. et al. Physicochemical properties and biocompatibility of polymer/carbon nanotubes composites // Nanomaterials and Supramolecular Structures. – Springer, 2009. – P. 347–368.
71. Gun'ko V.M., Lupascu T., Krupskaya T.V. et al. Influence of tannin on aqueous layers at a surface of hydrophilic and hydrophobic nanosilicas // Colloid Surf. A. – 2017. – V. 531. – P. 9–17.
72. Khamitova K.K., Kayupov B.A., Yegemova S.S. et al. The use of fullerenes as a biologically active molecule // Int. J. Nanotechnol. – V. 16, N 1–3. – P. 100–108.
73. Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupskaya T.V., Tsapko M.D. Interactions of human serum albumin with doxorubicin in different media // Chem. Phys. – 2017. – V. 483–484. – P. 26–34.

74. Krupskaya T.V., Turova A.A., Un'ko V.M., Turov V.V. Influence of highly dispersed materials on physiological activity of yeast cells // *Biopolymers and Cell*. – 2009. – V. 25, N 4. – P. 290–296.
75. Savenko A.F., Bogolepov V.A., Meleshevich K.A. et al. Structural and methodical features of the installation for the investigations of hydrogen-sorption characteristics of carbon nanomaterials and their composites // *NATO Security through Science Series A: Chemistry and Biology*. – 2007. – P. 365–382.
76. Zaginaichenko S., Nejat Veziroglu T. Peculiarities of hydrogenation of pentatomic carbon molecules in the frame of fullerene molecule C₆₀ // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2008. – V. 33, N 13. – P. 3330–3345.
77. Zaginaichenko S.Yu., Veziroglu T.N., Lototsky M.V. et al. Experimental set-up for investigations of hydrogen-sorption characteristics of carbon nanomaterials // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2016. – V. 41, N 1. – P. 401–406.
78. Lakhnik A.M., Kirian I.M., Rud A.D. The Mg/MAX-phase composite for hydrogen storage // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2022. – V. 47, N 11. – P. 7274–7280.
79. Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Savenko A.F. et al. Hydrogenation of fullerite C₆₀ in gaseous phase // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. – 2011. – V.2. – P.87–105.
80. Pylypova O., Havryliuk O., Antonin S. et al. Influence of nanostructure geometry on light trapping in solar cells // *Appl. Nanosci*. – 2022. – V. 12, N 3. – P. 769–774.
81. Semchuk O.Y., Biliuk A.A., Havryliuk O.O., Biliuk A.I. Kinetic theory of electroconductivity of metal nanoparticles in the condition of surface plasmon resonance // *Appl. Surf. Sci. Adv*. – 2021. – V. 3. – P. 100057.
82. Havryliuk O.O., Evtukh A.A., Pylypova O.V. et al. Plasmonic enhancement of light to improve the parameters of solar cells // *Appl. Nanosci*. – 2020. – V. 10, N 12. – P. 4759–4766.
83. Bogolepov V.A., Veziroglu A., Zaginaichenko S.Y. et al. Selection of the hydrogen-sorbing material for hydrogen accumulators // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2016. – V. 41, N 3. – P. 1811–1818.
84. Shchur D.V., Zaginaichenko S.Y., Veziroglu A. et al. Prospects of Producing Hydrogen-Ammonia Fuel Based on Lithium Aluminum Amide // *Russ. Phys. J*. – 2021. – V. 64, N 1. – P. 89–103.
85. Matysina Z.A. Phase transformations $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow \delta \rightarrow \epsilon$ in titanium hydride tihx with increase in hydrogen concentration // *Russ. Phys. J*. – 2001. – V. 44, N 11. – P. 1237–1243.
86. Trefilov V.I., Pishuk V.K., Zaginaichenko S.Yu. et al. Solar furnaces for scientific and technological investigation // *Renewable Energy*. – 1999. – V. 16, N 1–4. – P. 757–760.
87. Lyashenko A.A., Adejev V.M., Voitovich V.B., Zaginaichenko S.Yu. Niobium as a construction material for a hydrogen energy system // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1995. – V. 20, N 5. – P. 405–407.
88. Lavrenko V.A., Adejev V.M., Kirjakova I.E. Studies of the hydride formation mechanism in metals // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1994. – V. 19, N 3. – P. 265–268.
89. Matysina Z.A., Gavrylyuk N.A., Kartel M. et al. Hydrogen sorption properties of new magnesium intermetallic compounds with MgSnCu₄ type structure // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2021. – V. 46, N 50. – P. 25520–25532.
90. Matysina Z.A., Pogorelova O.S., Zaginaichenko S.Yu. The surface energy of crystalline CuZn and FeAl alloys // *J. Phys. Chem. Solids*. – 1995. – V. 56, N 1. – P. 9–14.
91. Rud A.D., Schmidt U., Zelinska G.M. et al. Atomic structure and hydrogen storage properties of amorphous-quasicrystalline Zr-Cu-Ni-Al melt-spun ribbons // *J. Non-Cryst. Solids*. – 2007. – V. 353, N 32–40. – P.3434–3438.
92. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Yu. Hydrogen solubility in alloys under pressure // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 1996. – V. 21, N 11–12. – P. 1085–1089.
93. Zaginaichenko S.Yu., Matysina Z.A., Smityukh I., Pishuk V.K. Hydrogen in lanthan-nickel storage alloys // *J. Alloys Compd*. – 2002. –V. 330–332. – P. 70–75.
94. Lytvynenko Yu.M. Utilization the concentrated solar energy for process of deformation of sheet metal // *Renewable Energy*. – 1999. – V. 16, N 1–4. – P. 753–756.
95. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y. Sorption Properties of Iron–Magnesium and Nickel–Magnesium Mg₂FeH₆ and Mg₂NiH₄ Hydrides // *Russ. Phys. J*. – 2016. – V. 59, N 2. – P. 177–189.
96. Rud A.D., Schmidt U., Zelinska G.M. et al. Peculiarities of structural state and hydrogen storage properties of Ti-Zr-Ni based intermetallic compounds // *J. Alloys Compd*. – 2005. – V. 404–406. – P. 515–518.
97. Zaginaichenko S.Y., Matysina Z.A., Teslenko L.O., Veziroglu A. The structural vacancies in palladium hydride. Phase diagram // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2011. – V. 36, N 1. – P. 1152–1158.
98. Zaginaichenko S.Y., Zaritskii D.A., Matysina Z.A. et al. Theoretical study of hydrogen-sorption properties of lithium and magnesium borocarbides // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2015. – V. 40, N 24. – P. 7644–7651.
99. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y. Hydrogen-sorption properties of magnesium and its intermetallics with Ca₇Ge-Type structure // *Phys. Met. Metall*. – 2013. – V. 114, N 4. – P. 308–321.
100. Tikhotskii S.A., Fokin I.V. Traveltime seismic tomography with adaptive wavelet parameterization // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2011. – V. 47, N 4. – P. 327.

101. Kulnitsky B.A. Structural and phase transformations in carbon nanomaterials produced in a wide pressure range. Manuscript of the dissertation of Doctor of Physical and Mathematical Sciences: 01.04.07 / Moscow, 2010. – 273 p. [in Russian].

REFERENCES

1. Ushakova L.M., Ivanenko K.I., Sigareva N.V., Terets M.I., Kartel M.T., Sementsov Yu.I. Influence of nanofiller on the structure and properties of macromolecular compounds. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2022. **23**(2): 394.
2. Sementsov Y., Prikhod'ko G., Kartel M., Tsebrenko M., Aleksyeyeva T., Ulyanchychi N. Carbon nanotubes filled composite materials. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2011. **2**: 183.
3. Harea E., Stoček R., Storozhuk L., Sementsov Y., Kartel N. Study of tribological properties of natural rubber containing carbon nanotubes and carbon black as hybrid fillers. *Appl. Nanosci*. 2019. **9**(5): 899.
4. Karachevtseva L., Kartel M., Kladko V., Gudymenko O., Bo W., Bratus V., Lytvynenko O., Onyshchenko V., Stronska O. Functionalization of 2D macroporous silicon under the high-pressure oxidation. *Appl. Surf. Sci*. 2018. **434**: 142.
5. Kozak A.O., Porada O.K., Ivashchenko V.I., Ivashchenko L.A., Scrynskyy P.L., Tomila T.V., Manzhara V.S. Comparative investigation of Si-C-N Films prepared by plasma enhanced chemical vapour deposition and magnetron sputtering. *Appl. Surf. Sci*. 2017. **425**: 646.
6. Ivashchenko V.I., Turchi P.E.A., Shevchenko V.I. Simulations of indentation-induced phase transformations in crystalline and amorphous silicon. *Phys. Rev. B*. 2008. **78**(3): 035205.
7. Krupskaya T.V., Turov V.V., Barvinchenko V.M., Filatova K.O., Suvorova L.A., Iraci G., Kartel M.T. Influence of the “wetting–drying” compaction on the adsorptive characteristics of nanosilica A-300. *Adsorpt. Sci. Technol*. 2018. **36**(1–2): 300.
8. Gun'ko V.M., Turov V.V., Pakhlov E.M., Matkovsky A.K., Krupskaya T.V., Kartel M.T., Charmas B. Blends of amorphous/crystalline nanoalumina and hydrophobic amorphous nanosilica. *J. Non-Cryst. Solids*. 2018. **500**: 351.
9. Barany S., Kartel N., Meszaros R. Electrokinetic potential of multilayer carbon nanotubes in aqueous solutions of electrolytes and surfactants. *Colloid J*. 2014. **76**(5): 509.
10. Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupskaya T.V., Protsak I.S., Borysenko M.V., Pakhlov E.M. Polymethylsiloxane alone and in composition with nanosilica under various conditions. *J. Colloid Interface Sci*. 2019. **541**: 213.
11. Biliuk A.A., Semchuk O.Y., Havryliuk O.O. Kinetic theory of absorption of ultrashort laser pulses by ensembles of metallic nanoparticles under conditions of surface plasmon resonance. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. 2022. **13**(2): 190.
12. Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupskaya T.V., Pakhlov E.M. Behavior of water and methane bound to hydrophilic and hydrophobic nanosilicas and their mixture. *Chem. Phys. Lett*. 2017. **690**: 25.
13. Gun'ko V.M., Turov V.V., Protsak I., Krupskaya T.V., Pakhlov E.M., Zhang D. Interfacial phenomena in composites with nanostructured succinic acid bound to hydrophilic and hydrophobic nanosilicas. *Colloid Interface Sci. Commun*. 2020. **35**: 100251.
14. Protsak I., Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupskaya T.V., Pakhlov E.M., Zhang D., Dong W., Le Z. Nanostructured polymethylsiloxane/fumed silica blends. *Materials*. 2019. **12**(15): 2409.
15. Turov V.V., Gun'ko V.M., Krupskaya T.V., Borysenko M.V., Kartel M.T. Interfacial behavior of polar and nonpolar frozen/unfrozen liquids interacting with hydrophilic and hydrophobic nanosilicas alone and in blends. *J. Colloid Interface Sci*. 2021. **588**: 70.
16. Zaginaichenko S.Y., Lysenko E.A., Golovchenko T.N., Javadov N.F. The forming peculiarities of C₆₀ molecule. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. Part F2. 2008. P. 53.
17. Zolotareno O.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Yu., Zolotareno A.D., Shchur D.V., Matysina Z.A., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N.A., Zolotareno A.D., Chymbai M.V., Zagorulko I.V. Comparative Analysis of Products of the Fullerenes' and Carbon-Nanostructures' Synthesis Using the SIGE and FGDG-7 Grades of Graphite. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*. 2022. **20**(3): 725.
18. Gun'ko V.M., Turov V.V., Zarko V.I., Prykhod'ko G.P., Krupskaya T.V., Golovan A.P., Skubiszewska-Zięba J., Charmas B., Kartel M.T. Unusual interfacial phenomena at a surface of fullerite and carbon nanotubes. *Chem. Phys*. **459**: 172.

19. Nishchenko M.M., Likhtorovich S.P., Dubovoy A.G., Rashevskaya T.A. Positron annihilation in C₆₀ fullerites and fullerene-like nanovoids. *Carbon*. 2003. **41**(7): 1381.
20. Lad'yanov V.I., Nikonova R.M., Larionova N.S., Aksenova V.V., Mukhgalin V.V., Rud' A.D. Deformation-induced changes in the structure of fullerites C_{60/70} during their mechanical activation. *Phys. Solid State*. 2013. **55**(6): 1319.
21. Kartel M.T., Voitko K.V., Grebelna Y.V., Zhuravskiy S.V., Ivanenko K.O., Kulyk T.V., Makhno S.M., Sementsov Y.I. Changes in the structure and properties of graphene oxide surfaces during reduction and modification. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. 2022. **13**(2): 179.
22. Sementsov Yu.I., Cherniuk O.A., Zhuravskiy S.V., Bo W., Voitko K.V., Bakalinska O.M., Kartel M.T. Synthesis and catalytic properties of nitrogen-containing carbon nanotubes. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. 2021. **12**(2): 135.
23. Matysina Z. A., Zolotarenko Ol. D., Rudakova O. P., Akhanova N. Y., Pomytkin A. P., Zolotarenko An. D., Shchur D. V., Gabdullin M. T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N. A., Zolotarenko A. D., Chymbai M. V., Zagorulko I. V. Iron in Endometallofullerenes. *Prog. Phys. Met.* 2022. **23**(3): 510.
24. Schur D.V., Dubovoy A.G., Zaginaichenko S.Yu., Adejev V.M., Kotko A.V., Bogolepov V.A., Savenko A.F., Zolotarenko A.D., Firstov S.A., Skorokhod V.V. Synthesis of carbon nanostructures in gaseous and liquid medium. *NATO Security through Science Series A: Chemistry and Biology*. 2007. P. 199.
25. Zaginaichenko S.Y., Matysina Z.A. The peculiarities of carbon interaction with catalysts during the synthesis of carbon nanomaterials. *Carbon*. 2003. **41**(7): 1349.
26. Rud A.D., Kiryan I.M. Quantitative analysis of the local atomic structure in disordered carbon. *J. Non-Cryst. Solids*. 2014. **386**: 1.
27. Matvienko Y., Rud A., Polishchuk S., Zagorodniy Y., Rud N., Trachevski V. Effect of graphite additives on solid-state reactions in eutectic Al–Cu powder mixtures during high-energy ball milling. *Appl. Nanosci*. 2020. **10**(8): 2803.
28. Boguslavskii L.Z., Rud' A.D., Kir'yan I.M., Nazarova N.S., Vinnichenko D.V. Properties of carbon nanomaterials produced from gaseous raw materials using high-frequency electrodischarge processing. *Surf. Eng. Appl. Electrochem*. 2015. **51**(2): 105.
29. Matysina Z. A., Zolotarenko Ol. D., Ualkhanova M., Rudakova O.P., Akhanova N.Y., Zolotarenko An.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Gavrylyuk N. A., Zolotarenko O.D., Chymbai M.V., Zagorulko I.V. Electric Arc Methods to Synthesize Carbon Nanostructures. *Prog. Phys. Met.* 2022. **23**(3): 528.
30. Yakymchuk O.M., Perepelytsina O.M., Rud A.D., Kirian I.M., Sydorenko M.V. Impact of carbon nanomaterials on the formation of multicellular spheroids by tumor cells. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*. 2014. **211**(12): 2778.
31. Kartel N.T., Gerasimenko N.V., Tsyba N.N., Nikolaichuk A.D., Kovtun G.A. Synthesis and study of carbon sorbent prepared from polyethylene terephthalate. *Russ. J. Appl. Chem.* 2001. **74**(10): 1765.
32. Zolotarenko Ol.D, Ualkhanova M.N., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotarenko An.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Gavrylyuk N.A., Zolotarenko A.D., Chymbai M.V., Zagorulko I.V., Havryliuk O.O. Advantages and disadvantages of electric arc methods for the synthesis of carbon nanostructures. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. 2022. **13**(2): 209. [in Ukrainian].
33. Oreshkin V.I., Chaikovskii S.A., Labetskaya N.A., Ivanov Y.F., Khishchenko K.V., Levashov P.R., Kuskova N.I., Rud' A.D. Phase transformations of carbon under extreme energy action. *Tech. Phys.* 2012. **57**(2): 198.
34. Rud A.D., Lakhnik A.M., Mikhailova S.S., Karban O.V., Surnin D.V., Gilmudtinov F.Z. Structure of Mg-C nanocomposites produced by mechano-chemical synthesis. *J. Alloys Compd.* 2011. **509**(2): S592.
35. Havryliuk O.O., Semchuk O.Y. Formation of periodic structures on the solid surface under laser irradiation. *Ukr. J. Phys.* 2017. **62**(1): 20.
36. Ivashchenko V.I., Shevchenko V.I. Effects of short-range disorder upon electronic properties of a-SiC alloys. *Appl. Surf. Sci.* 2001. **184**(1–4): 137.
37. Biliuk A.A., Semchuk O.Y., Havryliuk O.O. Width of the surface plasmon resonance line in spherical metal nanoparticles. *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.* 2020. **23**(3): 308.
38. Baglyuk G.A., Poznyak L.A. The sintering of powder metallurgy high-speed steel with activating additions. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2002. **41**(7–8): 366.
39. Ilyin A.P., Mostovshchikov A.V., Root L.O., Zmanovskiy S.V., Ismailov D.V., Ruzieva G.U. Effect of beta-radiation exposure on the parameters of aluminum micropowders activity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2019. **330**(8): 87.
40. Ivashchenko V.I., Turchi P.E.A., Shevchenko V.I. Phase transformation B₁ to B₂ in TiC, TiN, ZrC and ZrN under pressure. *Condens. Matter Phys.* 2013: **16**(3): 33602.

41. Onoprienko A.A., Ivashchenko V.I., Dub S.N., Khyzhun O.Y., Timofeeva I.I. Microstructure and mechanical properties of hard Ti-Si-C-N films deposited by dc magnetron sputtering of multicomponent Ti/C/Si target. *Surf. Coat. Technol.* 2011. **205**(21–22): 5068.
42. Khomenko E.V., Baglyuk G.A., Minakova R.V. Effect of deformation processing on the properties of Cu-50 % Cr composite. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2009. **48**(3–4): 211.
43. Kozak A.O., Ivashchenko V.I., Porada O.K., Ivashchenko L.A., Tomila T.V., Manjara V.S., Klishevych G.V. Structural, optoelectronic and mechanical properties of PECVD Si-C-N films: An effect of substrate bias. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2018. **88**: 65.
44. Semchuk O.Y., Biliuk A.A., Havryliuk O.O. The Kinetic Theory of the Width of Surface Plasmon Resonance Line in Metal Nanoparticles. *Springer Proceedings in Physics.* 2021. **264**: 3.
45. Ivashchenko V.I., Turchi P.E.A., Shevchenko V.I., Olifan E.I. First-principles study of phase stability of stoichiometric vanadium nitrides. *Phys. Rev. B.* 2011. **84**(17): 174108.
46. Baglyuk G.A., Terekhov V.N., Ternovoi Y.F. Structure and properties of powder austenitic die steels. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2006. **45**(7–8): 317.
47. Tolochyn O.I., Baglyuk G.A., Tolochyna O.V., Evych Y.I., Podrezov Y.M., Molchanovska H.M. Structure and Physicomechanical Properties of the Fe₃Al Intermetallic Compound Obtained by Impact Hot Compaction. *Mater. Sci.* 2021. **56**(4): 499.
48. Ivashchenko V.I., Vepřek S. First-principles molecular dynamics study of the thermal stability of the BN, AlN, SiC and SiN interfacial layers in TiN-based heterostructures: Comparison with experiments. *Thin Solid Films.* 2013. **545**: 391.
49. Nastasiienko N., Palianytsia B., Kartel M., Larsson M., Kulik T. Thermal transformation of caffeic acid on the nanoceria surface studied by temperature programmed desorption mass-spectrometry, thermogravimetric analysis and ft-ir spectroscopy. *Colloids and Interfaces.* 2019. **3**(1): 34.
50. Abdullin K.A., Gabdullin M.T., Gritsenko L.V., Ismailov D.V., Kalkozova Z.K., Kumekov S.E., Mukash Z.O., Sazonov A.Y., Terukov E.I. Electrical, optical, and photoluminescence properties of ZnO films subjected to thermal annealing and treatment in hydrogen plasma. *Semiconductors.* 2016. **50**(8): 1010.
51. Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Zabrodina I.K., Root L.O., Ismailov D.V. Measuring the changes in copper nanopowder conductivity during heating as a method for diagnosing its thermal stability. *Key Eng. Mater.* 2018. **769**: 146.
52. Baglyuk G.A., Ivasyshyn O.M., Stasyuk O.O., Savvakina D.G. Sintered metals and alloys: The effect of charge component composition on the structure and properties of titanium matrix sintered composites with high-modulus compounds. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2017. **56**(1–2): 59.
53. Baglyuk G.A., Sosnovskii L.A., Volfman V.I. Effect of carbon content on the properties of sintered steels doped with manganese and copper. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2011. **50**(3–4): 189.
54. Baglyuk G.A., Tolochin A.I., Tolochina A.V., Yakovenko R.V., Gripachevckii A.N., Golovkova M.E. Effect of Process Conditions on the Structure and Properties of the Hot-Forged Fe₃Al Intermetallic Alloy. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2016. **55**(5–6): 297.
55. Baglyuk G.A., Poznyak L.A. Sintered wear-resistant iron-based materials. I. Materials fabricated by sintering and impregnation. *Poroshkovaya Metallurgiya.* 2001. **1–2**: 44.
56. Sizonenko O.N., Baglyuk G.A., Taftai E.I., Zaichenko A.D., Lipyana E.V., Torpakov A.S., Zhdanov A.A., Pristash N.S. Dispersion and carburization of titanium powders by electric discharge. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2013. **52**(5–6): 247.
57. Ivashchenko V.I., Vepřek S., Turchi P.E.A., Shevchenko V.I., Leszczynski J., Gorb L., Hill F. First-principles molecular dynamics investigation of thermal and mechanical stability of the TiN(001)/AlN and ZrN(001)/AlN heterostructures. *Thin Solid Films.* **564**: 284.
58. Baglyuk G.A., Napara-Volgina S.G., Vol'fman V.I., Mamonova A.A., Pyatachuk S.G. Thermal synthesis of Fe-B 4C powder master alloys. *Powder Metall. Met. Ceram.* 2009. **48**(7–8): 381.
59. Zolotareno O.D., Rudakova E.P., Zolotareno A.D., Akhanova N.Y., Ualkhanova M.N., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Gavrylyuk N.A., Myronenko T.V., Zolotareno A.D., Chymbai M.V., Zagorulko I.V., Tarasenko Yu.O., Havryliuk O.O. Platinum-containing carbon nanostructures for the creation of electrically conductive ceramics using 3D printing of CJP technology. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni.* 2022. **13**(3): 259.
60. Zolotareno O.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotareno A.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Sultangazina M., Gavrylyuk N.A., Chymbai M.V., Zolotareno A.D., Zagorulko I.V., Tarasenko Yu.O. Plasmochemical Synthesis of Platinum-Containing Carbon Nanostructures Suitable for CJP 3D-Printing. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* 2022. **44**(3): 343.
61. Zolotareno O.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotareno A.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N.A., Chymbai M.V., Myronenko T.V., Zagorulko I.V., Zolotareno A.D.,

- Havryliuk O.O. Electrically conductive composites based on TiO₂ and carbon nanostructures manufactured using 3D printing of CJP technology. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni*. 2022. **13**(4): 415.
62. Zolotareno O.I.D., Rudakova E.P., Akhanova N.Y., Zolotareno An.D., Shchur D.V., Gabdullin M.T., Ualkhanova M., Gavrylyuk N.A., Chymbai M.V., Tarasenko Yu.O., Zagorulko I.V., Zolotareno A.D. Electric Conductive Composites Based on Metal Oxides and Carbon Nanostructures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2021. **43**(10): 1417.
 63. Stavitskaya S.S., Mironyuk T.I., Kartel N.T., Strelko V.V. Sorption characteristics of "food fibers" in secondary products of processing of vegetable raw materials. *Russ. J. Appl. Chem.* 2001. **74**(4): 592.
 64. Zakutevskii O.I., Psareva T.S., Strelko V.V., Kartel' N.T. Sorption of U(VI) from aqueous solutions with carbon sorbents. *Radiochemistry*. 2007. **49**(1): 67.
 65. Kartel M., Galysh V. New composite sorbents for caesium and strontium ions sorption. *Chemistry Journal of Moldova*. 2017. **12**(1): 37.
 66. Gun'ko V.M., Turov V.V., Protsak I.S., Krupska T.V., Pakhlov E.M., Tsapko M.D. Effects of pre-adsorbed water on methane adsorption onto blends with hydrophobic and hydrophilic nanosilicas. *Colloid Surf. A*. 2019. **570**: 471.
 67. Galysh V., Sevastyanova O., Kartel M., Lindström M.E., Gornikov Y. Impact of ferrocyanide salts on the thermo-oxidative degradation of lignocellulosic sorbents. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2017. **128**(2): 1019.
 68. Ivashchenko V.I., Turchi P.E.A., Shevchenko V.I., Ivashchenko L.A., Rusakov G.V. Atomic and electronic structures of a-SiC:H from tight-binding molecular dynamics. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2003. **15**(24): 4119.
 69. Gabdullin M.T., Khamitova K.K., Ismailov D.V., Sultangazina M.N., Kerimbekov D.S., Yegemova S.S., Chernoshan A., Schur D.V. Use of nanostructured materials for the sorption of heavy metals ions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. **511**(1): 12044.
 70. Sementsov Yu.I., Prikhod'Ko G.P., Melezhik A.V., Aleksyeyeva T.A., Kartel M.T. Physicochemical properties and biocompatibility of polymer/carbon nanotubes composites. In: *Nanomaterials and Supramolecular Structures*. (Springer, 2009). P. 347.
 71. Gun'ko V.M., Lupascu T., Krupska T.V., Golovan A.P., Pakhlov E.M., Turov V.V. Influence of tannin on aqueous layers at a surface of hydrophilic and hydrophobic nanosilicas. *Colloid Surf. A*. 2017. **531**: 9.
 72. Khamitova K.K., Kayupov B.A., Yegemova S.S., Gabdullin M.T., Abdullin Kh.A., Ismailov D.V., Kerimbekov D.S. The use of fullerenes as a biologically active molecule. *Int. J. Nanotechnol.* 2019. **16**(1–3): 100.
 73. Gun'ko V.M., Turov V.V., Krupska T.V., Tsapko M.D. Interactions of human serum albumin with doxorubicin in different media. *Chem. Phys.* 2017. **483-484**: 26.
 74. Krupska T.V., Turova A.A., Un'Ko V.M., Turov V.V. Influence of highly dispersed materials on physiological activity of yeast cells. *Biopolymers and Cell*. 2009. **25**(4): 290.
 75. Savenko A.F., Bogolepov V.A., Meleshevich K.A., Zaginaichenko S.Yu., Lototsky M.V., Pishuk V.K., Teslenko L.O., Skorokhod V.V. Structural and methodical features of the installation for the investigations of hydrogen-sorption characteristics of carbon nanomaterials and their composites. *NATO Security through Science Series A: Chemistry and Biology*. 2007. P. 365.
 76. Zaginaichenko S., Nejat Veziroglu T. Peculiarities of hydrogenation of pentatomic carbon molecules in the frame of fullerene molecule C₆₀. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2008. **33**(13): 3330.
 77. Zaginaichenko S.Yu., Veziroglu T.N., Lototsky M.V., Bogolepov V.A., Savenko A.F. Experimental set-up for investigations of hydrogen-sorption characteristics of carbon nanomaterials. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2016. **41**(1): 401.
 78. Lakhnik A.M., Kirian I.M., Rud A.D. The Mg/MAX-phase composite for hydrogen storage. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2022. **47**(11): 7274.
 79. Schur D.V., Zaginaichenko S.Y., Savenko A.F., Bogolepov V.A., Anikina N.S., Zolotareno A.D., Matysina Z.A., Veziroglu T.N., Skryabina N.E. Hydrogenation of fullerite C₆₀ in gaseous phase. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2011. **2**: 87.
 80. Pylypova O., Havryliuk O., Antonin S., Evtukh A., Skryshevsky V., Ivanov I., Shmahlii S. Influence of nanostructure geometry on light trapping in solar cells. *Appl. Nanosci.* 2022. **12**(3): 769.
 81. Semchuk O.Y., Biliuk A.A., Havryliuk O.O., Biliuk A.I. Kinetic theory of electroconductivity of metal nanoparticles in the condition of surface plasmon resonance. *Appl. Surf. Sci. Adv.* 2021. **3**: 100057.
 82. Havryliuk O.O., Evtukh A.A., Pylypova O.V., Semchuk O.Y., Ivanov I.I., Zabolotnyi V.F. Plasmonic enhancement of light to improve the parameters of solar cells. *Appl. Nanosci.* 2020. **10**(12): 4759.
 83. Bogolepov V.A., Veziroglu A., Zaginaichenko S.Y., Savenko A.F., Meleshevich K.A. Selection of the hydrogen-sorbing material for hydrogen accumulators. *Int. J. Hydrogen Energy*. 2016. **41**(3): 1811.

84. Shchur D.V., Zaginaichenko S.Y., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Gavrylyuk N.A., Zolotareno A.D., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D. Prospects of Producing Hydrogen-Ammonia Fuel Based on Lithium Aluminum Amide. *Russ. Phys. J.* 2021. **64**(1): 89.
85. Matysina Z.A. Phase transformations $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow \delta \rightarrow \varepsilon$ in titanium hydride tihx with increase in hydrogen concentration. *Russ. Phys. J.* 2001. **44**(11): 1237.
86. Trefilov V.I., Pishuk V.K., Zaginaichenko S.Yu., Choba A.V., Nagornaya N.R. Solar furnaces for scientific and technological investigation. *Renewable Energy.* 1999. **16**(1–4): 757.
87. Lyashenko A.A., Adejev V.M., Voitovich V.B., Zaginaichenko S.Yu. Niobium as a construction material for a hydrogen energy system. *Int. J. Hydrogen Energy.* 1995. **20**(5): 405.
88. Lavrenko V.A., Adejev V.M., Kirjakova I.E. Studies of the hydride formation mechanism in metals. *Int. J. Hydrogen Energy.* 1994. **19**(3): 265.
89. Matysina Z.A., Gavrylyuk N.A., Kartel M., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Pomytkin A.P., Schur D.V., Ramazanov T.S., Gabdullin M.T., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D., Shvachko N.A. Hydrogen sorption properties of new magnesium intermetallic compounds with MgSnCu₄ type structure. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2021. **46**(50): 25520.
90. Matysina Z.A., Pogorelova O.S., Zaginaichenko S.Yu. The surface energy of crystalline CuZn and FeAl alloys. *J. Phys. Chem. Solids.* 1995. **56**(1): 9.
91. Rud A.D., Schmidt U., Zelinska G.M., Lakhnik A.M., Kolbasov G.Ya., Danilov M.O. Atomic structure and hydrogen storage properties of amorphous-quasicrystalline Zr-Cu-Ni-Al melt-spun ribbons. *J. Non-Cryst. Solids.* 2007. **353**(32–40): 3434.
92. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Yu. Hydrogen solubility in alloys under pressure. *Int. J. Hydrogen Energy.* 1996. **21**(11–12): 1085.
93. Zaginaichenko S.Yu., Matysina Z.A., Smityukh I., Pishuk V.K. Hydrogen in lanthan-nickel storage alloys. *J. Alloys Compd.* 2002. **330–332**: 70.
94. Lytvynenko Yu.M. Utilization the concentrated solar energy for process of deformation of sheet metal. *Renewable Energy.* 1999. **16**(1–4): 753.
95. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y. Sorption Properties of Iron–Magnesium and Nickel–Magnesium Mg₂FeH₆ and Mg₂NiH₄ Hydrides. *Russ. Phys. J.* 2016. **59**(2): 177.
96. Rud A.D., Schmidt U., Zelinska G.M., Lakhnik A.M., Perekos A.E., Kolbasov G.Ya., Danilov M.O. Peculiarities of structural state and hydrogen storage properties of Ti-Zr-Ni based intermetallic compounds. *J. Alloys Compd.* 2005. **404–406**: 515.
97. Zaginaichenko S.Y., Matysina Z.A., Teslenko L.O., Veziroglu A. The structural vacancies in palladium hydride. Phase diagram. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2011. **36**(1): 1152.
98. Zaginaichenko S.Y., Zaritskii D.A., Matysina Z.A., Veziroglu T.N., Kopylova L.I. Theoretical study of hydrogen-sorption properties of lithium and magnesium borocarbides. *Int. J. Hydrogen Energy.* 2015. **40**(24): 7644.
99. Matysina Z.A., Zaginaichenko S.Y. Hydrogen-sorption properties of magnesium and its intermetallics with Ca₇Ge-Type structure. *Phys. Met. Metall.* 2013. **114**(4): 308.
100. Tikhotskii S.A., Fokin I.V. Travelttime seismic tomography with adaptive wavelet parameterization. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth.* 2011. **47**(4): 327.
101. Kulnitsky B.A. Doctoral (Phys. Math.) Thesis. (Moscow, 2010). [in Russian].

Надійшла 22.03.2023, прийнята 05.06.2023