

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Макудери Аліни Олександрівни

« ZrO_2 , стабілізований рядом оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи, як основа для створення новітніх термобар'єрних покриттів », що подана на здобуття наукового ступеня кандидата хімічних наук за спеціальністю 02.00.04. - фізична хімія

Актуальність теми дисертації. Термобар'єрні покриття (ТБП) необхідні для тривалої експлуатації газотурбінних двигунів вище температури плавлення суперсплавів, з яких вироблено їх конструктивні елементи гарячої зони. Керамічний верхній шар ТБП забезпечує термоізоляцію поверхні та зазвичай складається з оксидного матеріалу з мінімальною теплопровідністю. У високопотужних газотурбінних двигунах наступного покоління передбачено зростання робочої температури до 1500–1600 °С, а матеріал, що широко використовують для верхнього шару - твердий розчин на основі ZrO_2 , стабілізованого 6-8 (мас. %) Y_2O_3 (YSZ), наближається до температурної межі свого використання (1200 °С). Для збільшення ресурсу експлуатації стаціонарних і авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) необхідна розробка нових матеріалів з нижчою теплопровідністю і вищою термічною стійкістю, ніж у шару YSZ.

Сучасні дослідження сфокусовано на композиційних матеріалах в подвійних, потрійних та складніших системах, що вміщують ZrO_2 та оксиди рідкісноземельних елементів; високоентропійній або складно – композиційній оксидній кераміці на основі середньоентропійних (нееквімолярних) композицій; наноструктурних покриттях комплексного складу.

Використання для стабілізації ZrO_2 концентрату оксидів РЗЕ, що утворюється в процесі переробки апатитових руд, розширює можливості створення матеріалів з необхідною теплопровідністю. При одночасному застосуванні оксидів РЗЕ, катіони яких мають різний розмір і валентність, утворюється твердий розчин з високим ступенем дефектності структури, що забезпечує низьку теплопровідність матеріалів. Крім цього, використання нерозділених концентратів оксидів РЗЕ для стабілізації ZrO_2 може істотно підвищити економічність виготовлення керамічного шару ТБП.

Визначення особливостей фазової взаємодії у системах, що вміщують ZrO_2 і компоненти концентрату оксидів РЗЕ природнього походження, дослідження основних фізико-хімічних властивостей нанодисперсних порошоків та матеріалів на основі комплексно стабілізованого ZrO_2 є **актуальним** для створення новітніх складно-композиційних матеріалів

керамічного шару ТБП зі збільшеним терміном експлуатації й підвищеним коефіцієнтом корисної дії ГТД.

Дана дисертаційна робота пов'язана з тематикою досліджень Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України і виконана в рамках тем відомчого замовлення НАН України: 0109U001284 “Дослідження фазових співвідношень у багатокомпонентних оксидних системах як фізико-хімічної основи для створення нових конструкційних матеріалів та матеріалів для медицини” (2009-2011 pp.); 0112U002087 “Дослідження фазових рівноваг в багатокомпонентних тугоплавких оксидних системах з метою створення фізико-хімічних основ для синтезу нанокристалічних порошків і композиційних матеріалів функціонального та конструкційного призначення” (2012-2014 pp.); 0115U002111 “Вивчення фазових співвідношень і властивостей утворюваних фаз в багатокомпонентних тугоплавких оксидних системах $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-NiO}$ і $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ та створення наукових основ розробки нових високотехнологічних керамічних матеріалів конструкційного та медичного призначення” (2015-2017 pp.); 0117U000258 “Розробка оксидних матеріалів на основі ZrO_2 , комплексно легованого оксидами гадолінію, лантану, ітрію, церію для створення нового покоління теплозахисних покриттів на деталях газотурбінних двигунів” (2017-2021 pp.); 0118U001054 “Дослідження фазовий рівноваг в багатокомпонентних тугоплавких оксидних системах $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO-Ln}_2\text{O}_3$, де $\text{Ln}=(\text{Nd}, \text{Er}, \text{Yb})$ і $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-CoO}$ та створення фізико-хімічних основ мікроструктурного проектування композиційних матеріалів функціонального і конструкційного призначення з нанокристалічних порошків” (2018-2020 pp.); 0120U101165 “Нові перспективні матеріали на основі діоксиду цирконію для керамічного шару термобар’єрних покриттів з пониженою теплопровідністю і збільшеним терміном експлуатації для лопаток газотурбінних двигунів різноманітного призначення” (2020-2021 pp.); 0221U102477 “Вивчення фазових співвідношень і властивостей утворюваних фаз в багатокомпонентних тугоплавких оксидних системах, що вміщують Al_2O_3 , TiO_2 , Ln_2O_3 (де $\text{Ln} - \text{La}, \text{Er}, \text{Dy}, \text{Yb}$); створення фізико-хімічних засад розробки нових багатокомпонентних матеріалів на основі системи $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ та стекол і волокон з розплавів гірських порід типу базальтів” (2021–2023 pp.); 0124U001072 “Створення фізико-хімічних засад розробки нових багатокомпонентних матеріалів військового призначення з підвищеними експлуатаційними характеристиками на основі оксидів алюмінію, цирконію, титану, рідкісноземельних елементів та природних гірських багатокомпонентних силікатних систем типу базальтів» (2024-2026 pp.).

Оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації, висновків, їх достовірність і новизна.

Обґрунтованість і достовірність отриманих у роботі результатів базується на застосуванні широкого комплексу сучасних експериментальних і аналітичних методів, які взаємно доповнюються: рентгенофазового та диференційно-термічного аналізів, скануючої електронної мікроскопії, методу БЕТ, хімічного і мікро-рентгеноспектрального аналізів. Для визначення теплопровідності матеріалів в інтервалі температур 313–673 К застосовано метод динамічного калориметра.

У процесі досягнення мети і вирішення завдань дослідження **вперше** отримано наступні наукові результати:

- Зроблено прогноз діаграм стану систем $\text{Ln}^{\text{I}}_2\text{O}_3\text{--Ln}^{\text{II}}_2\text{O}_3$ (Ln^{I} , Ln^{II} – лантаноїди ітрієвої Tb–Lu підгрупи) та $\text{Ce}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ та $\text{CeO}_2\text{--Ln}_2\text{O}_3$ (Ln –лантаноїди ітрієвої підгрупи Tb–Lu, Y). Передбачено, що в системах $\text{Ln}_2\text{O}_3\text{--Ln}_2\text{O}_3$ утворюються неперервні ряди твердих розчинів всіх поліморфних модифікацій РЗЕ, а в системах $\text{CeO}_2\text{--Ln}_2\text{O}_3$ – лише на основі флюориту.
- Побудовано ізотермічні перерізи діаграм стану систем: $\text{ZrO}_2\text{--Dy}_2\text{O}_3\text{--Er}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{--Dy}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{--Er}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$, $\text{Dy}_2\text{O}_3\text{--Er}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$ при 1400 °С. Визначено, що об'єм твердих розчинів на основі фази F- ZrO_2 сягає 10–30 мол.% досліджуваного концентрату оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи.
- Встановлено фазові рівноваги у системі $\text{ZrO}_2\text{--Dy}_2\text{O}_3\text{--Er}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$ при 1400 °С, перспективної для підвищення ресурсу експлуатації ТБП.
- Побудовано ізотермічний переріз діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2\text{--Sc}_2\text{O}_3$ при 1300 °С. Встановлено, що внаслідок утворення сполуки ScAlO_3 в ТБП на основі матеріалів вказаної системи необхідне нанесення проміжного шару для запобігання взаємодії з шаром термічно вирощеного Al_2O_3 .
- Вивчено фізико-хімічні властивості складно-композиційних порошків і матеріалів, при виготовленні яких застосовано нанокристалічні порошки M- ZrO_2 , одержані двома хімічними методами. Показано, що при 800 °С фазові переходи ZrO_2 і збільшення розміру первинних частинок в порошках практично завершуються після витримки протягом 10 год. Особливості варіювання питомої поверхні порошків при 800 °С визначаються еволюцією структурних складових.
- Встановлено, що складно-композиційні матеріали, що вміщують концентрат оксидів РЗЕ природного походження, в процесі термічної обробки при 1400 °С відповідають вимогам фазової стабільності і відсутності спікання, що пред'являються до керамічного шару ТБП.
- Визначено, що в залежності від терміну спікання при 1600 °С і вмісту

ВК теплопровідність складно-композиційних матеріалів на основі ZrO_2 (10-30 мас. % концентрату оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи) в інтервалі 313–673 К (40–400 °С) змінюється від $0,65 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$ до $1,6 \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$. Встановлено, що теплопровідність матеріалу при вмісті 30 мас. % концентрату на ~50 % нижча теплопровідності YSZ.

- Досліджено мікроструктуру та стійкість до термоциклювання двошарового ТБП метал/складно-композиційна кераміка, нанесеного за один технологічний цикл на лопатки першої ступені турбіни, що виготовляють на ЗМКБ «Прогрес», методом EB-PVD, складно – композиційного керамічного шару ТБП. Визначено, що термоциклічна довговічність покриття на 16 % вища, ніж у стандартного покриття YSZ.

Значимість результатів дисертаційної роботи для науки і практики.

Представлена робота – це комплексне дослідження, що поєднує вивчення фазових рівноваг у системах, що містять ZrO_2 та оксиди церію, скандію, РЗЕ ітрієвої підгрупи, які входять до складу концентрату, вивчення фізико-хімічних властивостей складно-композиційних порошків і матеріалів, при виготовленні яких застосовано нанокристалічні порошки $M-ZrO_2$, одержані двома хімічними методами і концентрат оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи. Проведено порівняльний аналіз осаджених ТБП з керамічними шарами стандартного і новітнього складу.

Склад мішеней для нанесення ТБП методом EB-PVD, яке показало на 16 % вищий ресурс експлуатації, ніж стандартне покриття YSZ, обрано на основі спрогнозованих діаграм стану систем $Ln^I_2O_3 - Ln^{II}_2O_3$ (Ln^I, Ln^{II} – лантаноїди ітрієвої Tb–Lu підгрупи), $Ce_2O_3 - Ln_2O_3$ (Ln – лантаноїди ітрієвої підгрупи Tb–Lu, Y) та побудованих ізотермічних перерізів діаграм стану систем $ZrO_2 - Dy_2O_3 - Er_2O_3$, $ZrO_2 - Dy_2O_3 - Yb_2O_3$, $ZrO_2 - Er_2O_3 - Yb_2O_3$, $Dy_2O_3 - Er_2O_3 - Yb_2O_3$, $ZrO_2 - Dy_2O_3 - Er_2O_3 - Yb_2O_3$ при 1400 °С.

На підставі порівняльних досліджень властивостей новітнього і стандартного YSZ покриттів в двошарових ТБП, осаджених методом EB-PVD визначена перспективність використання концентратів оксидів РЗЕ природного походження при створенні новітніх ТБП з підвищеними температурою експлуатації та терміном служби. Це дозволить підвищити надійність газотурбінних двигунів, збільшити їх коефіцієнт корисної дії, економити паливо і забезпечити більш повне його згоряння, що знижує забруднення довкілля. Проведені дослідження необхідні для застосування у оборонно-промисловому комплексі, для розвитку машинобудівної галузі, авіа- та суднобудування.

Повнота викладу основних результатів дисертації.

Основні положення дисертації викладено в повному обсязі у 37

друкованих працях, з них 10 статей (з яких 5 віднесено до Q3, проіндексованих у базах Scopus та Web of Science у виданнях держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку (США та ОК), 3 опубліковано у фахових виданнях України (категорія Б), 2 додаткові статі і 27 тез доповідей на наукових конференціях.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних друкованих джерел з 212 найменувань, одного додатку. Робота складається із 219 сторінок, 83 рисунків, 18 таблиць, 1 додатку.

У вступі обґрунтовано актуальність вибраної теми дисертації, сформульовано мету та завдання роботи, вказано методи, об'єкт та предмет дослідження, а також визначено наукову новизну одержаних результатів та їх практичну цінність, особистий внесок автора, наведені дані щодо апробації роботи та кількості публікацій, а також описано структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі представлено огляд літературних джерел за темою дисертаційної роботи. Розглянуто будову та вимоги до ТБП лопаток газотурбінних двигунів на основі твердих розчинів ZrO_2 , властивості стандартного покриття на основі ZrO_2 , стабілізованого 6 – 8 мас. % Y_2O_3 (YSZ). Проаналізовано сучасні напрями досліджень щодо створення нових матеріалів керамічного шару ТБП і показано, що пошук матеріалів наступного покоління в основному сфокусовано на трьох-, чотирьох- компонентних і більш складних оксидних системах (модифікація складу твердих розчинів на основі ZrO_2 завдяки частковому або повному заміщенню Y_2O_3 оксидами рідкісноземельних елементів або скандію, створення високоентропійної або складно – композиційної оксидної кераміки). Визначено перспективність використання концентрату оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи для нанесення ТБП методом електронно-променевого випаровування-конденсація (атомно-молекулярного осадження парів в вакуумі (ЕВ-РВД)).

Підкреслено, що необхідною умовою створення новітніх ТБП є знання взаємодії між компонентами складно-композиційних матеріалів на основі ZrO_2 і суміші оксидів РЗЕ природного походження. Встановлено закономірність реалізації поліморфних перетворень у всьому ряду оксидів лантанодів. Проведено аналіз подвійних $ZrO_2-Ln^I_2O_3$, $Ln^I_2O_3-Ln^{II}_2O_3$ та потрійних діаграм стану систем $ZrO_2-Ln^I_2O_3-Ln^{II}_2O_3$, де $Ln = Ce, Tb, Dy, Y, Ho, Er, Tm, Yb, Lu$ і зроблено висновок, що комплексні добавки можна розглядати як один компонент у квазіподвійній системі ZrO_2 – комплексна добавка. Проаналізовано діаграми стану систем $Al_2O_3-ZrO_2-Y_2O_3$, $Al_2O_3-ZrO_2-Er_2O_3$, $Al_2O_3-ZrO_2-Yb_2O_3$ для розуміння взаємодії керамічного шару ТБП на основі твердого розчину ZrO_2 , легованого оксидами РЗЕ з термічно вирощеним

шаром Al_2O_3 . Аналіз літературних джерел показав, що взаємодія в подвійних, потрійних і більше компонентних системах за участю оксидів лантаноїдів вивчена недостатньо. На основі аналізу даних літератури сформульовано мету та завдання дослідження.

У другому розділі обґрунтовано вибір об'єктів дослідження, розглянуто методи, які використано для визначення властивостей складно-композиційних порошків та матеріалів ZrO_2 – концентрат оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи (ВК), представлено результати дослідження вихідного порошку ВК. Склад ВК (мас.%): Y_2O_3 – 13,3; Tb_4O_7 – 1.22; Dy_2O_3 –33.2; Ho_2O_3 –8.9; Er_2O_3 –21.8; Tm_2O_3 –1.86; Yb_2O_3 –12.5; Lu_2O_3 –0.57; сумарний вміст інших оксидів – 6.65 (у тому числі Al_2O_3 – 3,2).

У третьому розділі викладено прогноз характеру взаємодії в подвійних системах CeO_2 – Ln_2O_3 , Y_2O_3 – Ln_2O_3 ; представлено уточнені діаграми стану систем ZrO_2 – Sc_2O_3 та Al_2O_3 – Sc_2O_3 , побудовано ізотермічні перерізи потрійних діаграм стану ZrO_2 – $\text{Ln}^{\text{I}}_2\text{O}_3$ – $\text{Ln}^{\text{II}}_2\text{O}_3$ (при 1400 °С) та ZrO_2 – Al_2O_3 – Sc_2O_3 (при 1300 °С). Вперше представлена чотирьохкомпоненту діаграму стану системи ZrO_2 – $\text{Ln}^{\text{I}}_2\text{O}_3$ – $\text{Ln}^{\text{II}}_2\text{O}_3$ – $\text{Ln}^{\text{III}}_2\text{O}_3$.

В подвійних системах встановлено повну розчинність компонентів нижче солідуса з утворенням твердих розчинів зі структурою типу флюориту (F); появу областей твердих розчинів на основі поліморфних модифікацій оксидів лантаноїдів H, A, B та C різної протяжності, що приводить до виникнення нижче солідуса каскадів перитектоїдних перетворень, температури яких поступово підвищуються відповідно до зростанням температур поліморфних перетворень оксидів Tb—Lu.

Будова ізотермічного перерізу системи Al_2O_3 – ZrO_2 – Sc_2O_3 при 1300 °С визначається особливостями фазових рівноваг в обмежуючих подвійних системах, а саме утворенням фази S з широкою областю гомогенності, надструктури δ та твердих розчинів T, T', F та C. Ймовірність утворення сполуки ScAlO_3 викликає необхідність створення багатошарових керамічних термобар'єрних покриттів, щоб уникнути їх руйнування в процесі експлуатації при підвищених температурах.

Аналіз побудованої діаграми фазових рівноваг у квазічетвертній системі ZrO_2 – Dy_2O_3 – Er_2O_3 – Yb_2O_3 показав, що об'єм твердих розчинів на основі фази ZrO_2 (F) сягає 30–50 мол.% досліджуваного концентрату оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи. Оскільки сучасні ТБП створюються на основі твердих розчинів F– ZrO_2 , то вказаний інтервал концентрацій визначено оптимальним для одержання сучасних ТБП, призначених для експлуатації вище 1200 °С.

В четвертому розділі представлено результати вивчення фізико-хімічних властивостей складно-композиційних порошків і матеріалів в

залежності від вмісту ВК та термічної обробки при 800 °С та 1400 °С.

Застосовано нанокристалічні порошки $M\text{-ZrO}_2$, одержані двома методами: гідротермальним (HZrO_2) і промисловим (LZrO_2) (вміст ВК в сумішах становив 10, 30, 30 мас %). Встановлено, що в процесі їх термічної обробки при 800 °С фазовий перехід $M\text{-ZrO}_2 \rightarrow T\text{-ZrO}_2$ практично завершується після ізотермічної витримки 10 год. Розмір первинних частинок $M\text{-ZrO}_2$ (20 нм) і $T\text{-ZrO}_2$ (10 нм) суттєво не змінюються після витримки 12 та 14 год. Порошки $\text{HZrO}_2\text{-ВК}$ вміщують м'які агломерати сферичної форми, що складаються з первинних частинок. В порошках $\text{LZrO}_2\text{-ВК}$ сформувалась багаторівнева структура: первинні частинки – шари первинних частинок – ламінарні структури з цих шарів. Еволюція структурних складових та пористої структури порошків обумовлює особливості варіювання їх питомої поверхні в процесі термічної обробки.

Визначено, що складно – композиційні матеріали $\text{HZrO}_2\text{-ВК}$ та $\text{LZrO}_2\text{-ВК}$ при 1400 °С відповідають вимогам фазової стабільності і відсутності спікання, що пред'являються до керамічного шару ТБП. На процеси фазоутворення в матеріалах впливають вміст концентрату, термін витримки в ізотермічних умовах при 1400 °С, метод виготовлення вихідних порошків ZrO_2 . Матеріали досягають рівноважного стану після витримки 16 год і вміщують дві фази: $F\text{-ZrO}_2 + M\text{-ZrO}_2$. Термін ізотермічної витримки практично не впливає на відносну густину матеріалів та розмір кристалітів окремих фаз.

У п'ятому розділі представлено результати дослідження теплопровідності складно-композиційних матеріалів $\text{ZrO}_2\text{-ВК}$ в інтервалі 313–673 К (40–400 °С). Досліджено зразки складу (70–90 мас. %) $M\text{-ZrO}_2$ – (30–10 мас.%) ВК, спечені при 1600 °С (2–4 год). Встановлено, що їх теплопровідність значно нижча стандартного покриття YSZ, змінюється від 0,65 Вт м⁻¹ К до 1,6 Вт м⁻¹ К в залежності від терміну спікання при 1600 °С і вмісту ВК. Теплопровідність матеріалу 70 $M\text{-ZrO}_2$ – 30 ВК на ~50 % нижча ніж теплопровідність YSZ.

У шостому розділі приведено результати досліджень ТБП, що містять керамічний шар $\text{ZrO}_2\text{-ВК}$ у порівнянні з ТБП, що містить шар стандартного складу YSZ. Двошарові ТБП метал/ кераміка осаджено на промисловій електронно-променевої установці, що експлуатується в НВП «ЕЛТЕХМАШ», м. Вінниця методом EB-PVD на лопатки першої ступені турбіни ЗМКБ «Прогрес», виготовлені методом спрямованої кристалізації зі сплаву ЖС-26. Для формування внутрішнього жаростійкого шару використано сплав МЗП-6 (нікель-хром-алюміній-ітрій). Визначено, що термоциклічна довговічність покриття $\text{ZrO}_2\text{-ВК}$ на 16 % вища, ніж у стандартного покриття $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$.

Автореферат дисертації повною мірою відображає зміст та основні положення роботи.

Зауваження по дисертаційній роботі

1. Відомо декілька методів нанесення термобар'єрних покриттів на лопатки газотурбінних двигунів. Чому автор обрав саме метод електронно-променевого випаровування-конденсація (атомно-молекулярного осадження парів у вакуумі (ЕВ-РVD) ?
2. Автором досліджено фазову взаємодію і побудовано ізотермічні перерізи діаграм стану потрійних систем $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Dy}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{-Dy}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2\text{-Dy}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$ та $\text{ZrO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3$ при $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Чому на рис. 3.10 і 3.12 трифазні області зображено штриховими лініями?
3. В дисертаційній роботі показано, що будова ізотермічного перерізу діаграми стану системи $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-Sc}_2\text{O}_3$ при $1300\text{ }^\circ\text{C}$ визначається особливостями фазових рівноваг в обмежуючих подвійних системах. Чому утворення сполуки ScAlO_3 викликає потребу створення шаруватого керамічного покриття у ТБП при легуванні ZrO_2 оксидом скандію?
4. На підставі обговорення результатів диференційно-термічного аналізу концентрату оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи не зовсім зрозуміло за рахунок чого збільшується кількість оксидів диспрозію, ербію, ітербію після термообробки?
5. У п.п. 2.2 зазначено « Дослідження властивостей порошків, спечених матеріалів та покриттів проведено метами рентгенофазового аналізу, диференційно-термічного аналізу, СЕМ, ЛРСА, БЕТ, теплопровідність. Для дослідження морфології використовували метод рентгенофазового аналізу ...» Для дослідження морфології було б доцільно використовувати метод СЕМ а не РФА?
6. В дисертаційній роботі досліджено фізико-хімічні властивості складно-композиційних порошків і матеріалів в залежності від методу одержання порошку M-ZrO_2 , вмісту концентрату оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи та термічної обробки при $800\text{ }^\circ\text{C}$ та $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Чому обрано саме вказані температури термічної обробки?
7. В дисертації трапляються деякі неточності, наприклад: С. 37, рядок 6: «викривлення», а не «спотворення»; С. 55, рядок 5 знизу: «Всі потрійні не узгоджуються з подвійними (рис. 1.5),...», а не «потрійними»; С. 123, рядок 2: не в «шаровому», а в «кульовому» млині. На Рис. 4.14, 4.15. відсутні позначки 1, 2, 3 на кривих дифракції. У «Переліку умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів» відсутнє скорочення

ПЕМ.

Зроблені зауваження ніяким чином не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи, яка присвячена комплексному дослідженню від фазових рівноваг у подвійній та потрійних системах до створення новітнього матеріалу керамічного шару термобар'єрних покриттів.

Загальний висновок по дисертації.

Вважаю, що дисертаційна робота **Макудери А.О. «ZrO₂, стабілізований рядом оксидів РЗЕ ітрієвої підгрупи, як основа для створення новітніх термобар'єрних покриттів »** за своєю актуальністю, новизною, науковою і практичною значимістю та достовірністю результатів відповідає всім вимогам п.п. 9,11,13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженим постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2013 р., № 1159 від 30.12.2015 р., № 567 від 27.07.2016 р., № 943 від 20.11.2019 р., № 607 від 19.08.2020 р., № 1197 від 17.11.2021 р.) та всім вимогам Міністерства освіти і науки України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата хімічних наук, а її автор **Макудера Аліна Олександрівна** заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата хімічних наук за спеціальністю 02.00.04 - фізична хімія.

Офіційний опонент:

Доктор хімічних наук, професор,
Заслужений працівник освіти, завідувач
кафедри хімії Київського національного
університету будівництва і архітектури
МОН України

Віра ГРЕЧАНЮК

Підпис доктора хімічних наук, професора,
Заслуженого працівника освіти, завідувача
кафедри хімії Київського національного
університету будівництва і архітектури
МОН України, Гречанюк В.Г.

Затверджую:

Вчений секретар

Вченої ради КНУБА

к.т.н., доц.



Микола КЛИМЕНКО