

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Кириленко Катерини Всеволодівни

“Резистивні композиційні матеріали з багатокомпонентним перколяційним кластером для нагрівачів з інтенсивною тепловіддачею”, що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю **05.02.01 – матеріалознавство**

Актуальність теми дисертації.

Проблема розроблення нових високоефективних резистивних керамічних матеріалів для різноманітних нагрівних пристроїв високої надійності є актуальною проблемою сучасного матеріалознавства. Особливо це важливо для малогабаритних енергозберігаючих керамічних нагрівачів, що повинні володіти інтенсивною тепловіддачею. Робота побудована на основі досліджень резистивних матеріалів систем « $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{ZrC}$ та $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{HfC}$ », що проводились в ІПМ НАНУ. Було встановлено, що фази, які входять до складу провідникового кластера можуть суттєво впливати на його питомий опір і значення ТКО в робочому діапазоні температур. Слід також зазначити, що на сьогодні відсутні дані щодо особливостей утворення таких фаз під час формування резистивних композитів з різними діелектричними матрицями. Отже розробка нових багатокомпонентних резистивних композиційних матеріалів для систем з інтенсивною тепловіддачею є безперечно актуальною проблемою як з теоретичної, так і з практичної точки зору.

Загальна характеристика роботи. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, 6 додатків та списку використаних джерел зі 132 найменувань. Робота має обсяг 7,5 авторських аркуша, з них 6,4 - основного тексту, що містить 83 рисунки та 14 таблиць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, наведено відомості про апробацію та публікацію основних результатів дисертації.

У **першому розділі** проаналізовано актуальні проблеми й тенденції розвитку композитних резистивних матеріалів та використання нових технологій їх продукування. Подано стислу характеристику існуючих нагрівних

пристроїв, способів їх виготовлення та особливості їх роботи. Проаналізовано умови синтезування резистивного композиту, описано методологію вибору вихідних матеріалів та обгрунтовано вибір матеріалу провідникових компонентів композиту. На основі цього автором сформульовано мету та окреслено задачі, що потрібно вирішити у роботі.

У **другому розділі** описано використані у роботі традиційні способи одержання керамічних композитів, наведено методи дослідження їх складу, мікроструктури та електрофізичних властивостей. Більш докладно описані запропоновані автором оригінальні методики, що стосуються моделювання температурної залежності електричного опору та розподілу температури в нагрівних елементах. Слід зазначити, що процес моделювання проводився з використанням розробленого автором програмного забезпечення.

У **третьому розділі** представлено результати досліджень порошків вихідних матеріалів та проаналізовано вплив технологічних режимів на мікроструктуру та фазовий склад резистивних композитів систем $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-HfC}$ та $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ZrC}$. Проведено аналіз результатів фракційного аналізу досліджуваних порошкових сумішей. Рентгеноструктурним фазовим аналізом ідентифіковано основні фази вихідного порошку. Встановлено, що під час термічного розкладання біндерів утворюються не тільки газоподібні продукти, але і твердий вуглецевий залишок. Електронно-мікроскопічними дослідженнями показано, що резистивний матеріал переважно складається з дрібних (0,5-3 мкм) включень провідникової фази в діелектричній матриці. Крім того спостерігається утворення агломератів у вигляді суцільних прошарків, до складу яких входять Si, Al, O, C та Hf.

В **четвертому розділі** наведено дослідження електрофізичних властивостей композитів та показано взаємозв'язок між структурою та особливостями формування електропровідності резистивних композитів. Встановлено, що матеріал діелектричної матриці впливає на питомий опір композита за умов аналогічної концентрації провідникової фази. Досліджено вплив резистивних композитів на основі систем $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-HfC}$ і $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ZrC}$ на електропровідність. Показано, що анізотропія питомого опору в досліджуваних

матеріалах, отриманих без використання біндера, складає 5-10, з використанням каучуку до 90, а з використанням КМЦ – до 150. Цінні результати одержані в композиційних матеріалах систем Si₃N₄ – HfC та Si₃N₄ – HfC за температур 20 – 700 °С, а саме - вперше встановлено і досліджено явище гістерезису температурної залежності електричного опору.

У п'ятому розділі приведені результати моделювання явищ в резистивних композитах та в нагрівачах. Концентраційні залежності опору матеріалів апроксимовані за рівнянням МакЛахлана, на основі чого автором визначено перколяційний індекс t .

Розглянуті питання оцінки енергоефективності і надійності шаруватих керамічних нагрівачів на основі розроблених матеріалів, оцінено механізми їх руйнування та описані конструкція і результати випробувань гідродинамічного теплообмінного блоку медичинського стерилізатора. Показано, що залежно від призначення нагрівача – чи це конвективний нагрівач чи ІЧ-випромінювач - його ефективність визначається температурою поверхні і ступенем її чорноти. Встановлено, що причини відмови нагрівачів пов'язані із низкою супутніх факторів, які необхідно відслідковувати або передбачати. Це важливо для забезпечення тривалої та надійної експлуатації нагрівних пристроїв.

Висновки належним чином відображають основні результати дисертаційної роботи.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації, їх достовірність.

Достовірність наукових положень, висока точність експериментальних результатів, рекомендацій та висновків дисертаційної роботи забезпечено використанням сучасного обладнання науково-дослідних лабораторій, вивірених методів оцінювання електрофізичних властивостей, використанням копінтких методів дослідження структури розроблених у роботі матеріалів та коректною інтерпретацією одержаних експериментальних результатів, що узгоджуються з існуючими теоретичними розробками в галузі матеріалознавства.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів.

Вважаю, що найбільш цінним науковим здобутком роботи є реалізація принципу створення нового резистивного матеріалу для керамічних нагрівачів, що полягає у використанні хімічної активності діелектричної матриці Si_3N_4 у формуванні електрофізичних властивостей резистивних композитів. До важливого наукового результату можна також віднести встановлення ролі карбіду кремнію SiC , що входить до складу вихідної шихти та активізує процес утворення резистивних композитів систем $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-HfC}$ та $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ZrC}$ під час гарячого пресування.

Практичне значення отриманих результатів

Практичну цінність даного дослідження підтверджує той факт, що розроблені резистивні композиційні матеріали на основі Si_3N_4 з добавкою провідникової фази HfC використані для виготовлення елементів гідродинамічного теплообмінного блоку повітряного стерилізатора. Даний пристрій забезпечує надійний режим експлуатації та створює вихідний струмінь повітря з температурою 325°C при швидкості повітряного потоку 22 км/год . Впровадження здійснено в ООО «Науково-виробниче підприємство «Градiєнт».

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Основні результати та висновки дисертаційної роботи в повному обсязі висвітлено у **22** наукових працях, у тому числі, **13** статей у наукових фахових виданнях, з яких **4** статті у виданнях іноземних держав, **5** статей - у наукових фахових виданнях України, які входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus та **9** тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій. Автореферат дисертації повністю відповідає основним положенням дисертації. Матеріал у роботі викладено логічно, розділи взаємопов'язані і повністю розкривають поставлену в роботі мету.

Оцінка мови та стилю дисертації. Відповідність дисертації спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Дисертаційна робота викладена професійно, кваліфіковано та грамотно. Матеріали досліджень логічно систематизовані та графічно оформлені. За змістом дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Зауваження до дисертації та автореферату

1. У першому розділі роботи (стор. 36, табл. 1.1 і далі за текстом) багато уваги приділено розрахунковим методам визначення електрофізичних властивостей, але в той самий час належним чином не висвітлені особливості структуроутворення, що відбуваються на різних етапах синтезування резистивних композитів. Не проаналізовано взаємозв'язок між структурою композиту та його експлуатаційними властивостями.

2. На стор.88 третього розділу автор говорить про те, що «дисперсний склад порошків нітриду кремнію пічного синтезу..... практично не залежить від середовища змішування». Але цей факт не обгрунтовано поясненнями. Далі по тексту йдеться про «...екстремальний характер залежностей вмісту фракцій з проміжними розмірами частинок» (рис.3.6), хоча судячи по графічній залежності це не відповідає дійсності.

3. На стор.90 автор говорить про «...хімічні перетворення», що це за перетворення?

4. Не можу погодитись із твердженням автора про те, що пористість резистивного композита не залежить від типу біндера (стор. 99). В той же час у роботі існують експериментальні підтвердження цього.

5. Не бачу узгодженості між описом на стор. 129, де зроблено посилання на рис. 3.18, фотографії якого ілюструють «..текстуру розподілу провідникової фази...». Насправді на цих фотографіях можна лише побачити будову композиту з часточками провідникової фази різного розміру та форми.

6. У розділі 5, зокрема на підписі до рис. 5.11 (стор.170) і далі за текстом у багатьох місцях йдеться про «..міру чорноти» та її вплив на електрофізичні властивості, адже далі у роботі наведені дані про коефіцієнт чорноти, через який оцінка впливу цього фактору на електропровідність композиту буде більш коректною.

Однак слід підкреслити, що зроблені зауваження не знижують цінності досягнутих результатів і наукового рівня дисертаційної роботи.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому.

Вважаю, що за актуальністю, науковою новизною, обсягом проведених експериментальних досліджень, їхньою науковою та практичною значущістю, дисертація **Кириленко Катерини Всеволодівни** на тему “Резистивні композиційні матеріали з багатокомпонентним перколяційним кластером для нагрівачів з інтенсивною тепловіддачею”, відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю **05.02.01 – матеріалознавство.**

Офіційний опонент:

Доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри прикладного
матеріалознавства та обробки
матеріалів Національного університету
«Львівська політехніка»

З.А. Дурягіна

Підпис професора Дурягіної З.А. засвідчую:

Вчений секретар Національного
університету “Львівська політехніка”
доцент, к.т.н.



Р. Б. Брилинський