

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Кириленко Катерини Всеволодівни

на тему "**Резистивні композиційні матеріали з багатокомпонентним перколяційним кластером для нагрівачів з інтенсивною тепловіддачею**",
що представлена на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю **05.02.01 – матеріалознавство**.

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційна робота Кириленко Катерини Всеволодівни присвячена розробці методами порошкової металургії і дослідженню електрофізичних властивостей нових за складом електротехнічних резистивних матеріалів для малогабаритних керамічних нагрівачів з інтенсивною тепловіддачею на основі діелектричної матриці з нітриду кремнію Si_3N_4 з високонагрівостійкими безкисневими металопоподібними добавками карбідів гафнію HfC та цирконію ZrC , що відрізняються підвищеним на три-чотири порядки питомим опором в порівнянні з існуючими на даний час нечисленними подібними електротехнічними матеріалами за рахунок прогнозованого використання дисертанткою процесів утворення і входження в перколяційний кластер напівпровідникового карбиду кремнію SiC , що і зумовлює актуальність та практичне значення дисертаційної роботи Кириленко К.В. для матеріалознавства.

Актуальність дисертації підтверджується й тим, що в ній використано і узагальнено матеріали наукових досліджень по темах, що виконувалися в Інституті матеріалознавства НАН України з 2007 по 2016 роки.

Загальна характеристика змісту 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 дисертації, охарактеризовано зв'язок роботи з науковими програмами ПІМ НАНУ, сформульовано мету,

об'єкт, предмет та задачі дослідження, наведено інформацію про методи дослідження, новизну і практичне значення дисертаційної роботи, публікації та апробацію матеріалів дисертації.

В **першому розділі** розглянуто недоліки матеріалів, що використовуються зараз у світі для виготовлення малогабаритних нагрівачів, і сформульовані вимоги до питомого опору резистивних матеріалів з перколяційним кластером для нагрівачів з інтенсивною тепловіддачею, що не задовольняються існуючими матеріалами. Проведено вибір матеріалів для діелектричної матриці та провідникових добавок резистивних матеріалів, наведений аналіз умов їх синтезу. На основі проведеного аналізу сформульовано мету і задачі дисертації.

В **другому розділі** описано методи виготовлення резистивного матеріалу, дослідження структури і складу вихідних порошків, шихти і гарячепресованих матеріалів, їх електрофізичних властивостей, а також розроблені автором методики комп'ютерного моделювання матеріалів і нагрівачів.

В **третьому розділі** наведені результати дисперсійних, металографічних, рентгенографічних та електронно-мікроскопічних досліджень структури і фазового складу вихідних порошків, шихти та гарячепресованих резистивних матеріалів, що складаються з зерен провідникової фази розміром 0,5 – 3 мкм, випадково розподіленої в діелектричній матриці. Досліджено термічне розкладання біндерів, встановлено утворення карбонітридів гафнію та цирконію, карбіду кремнію та оксидних фаз в незначній кількості.

В **четвертому розділі** розглянуто електрофізичні властивості розроблених матеріалів у взаємозв'язку із структурою. Показано, що входження SiC, наявного у вихідних порошках і утвореного *in situ* в процесі гарячого пресування, в провідниковий кластер, приводить до зсуву порогу протікання до 3 – 5% і збільшення питомого опору перколяційного кластера в 10^3 – 10^4 раз, що суттєво відрізняє розроблені матеріали від існуючих. Вперше встановлена наявність гістерезису опору резистивного композита, зумовленого входженням SiC в провідниковий кластер, і проведено його дослідження. Описана

нелінійність вольт-амперних характеристик і анізотропія електропровідності резистивних матеріалів вздовж і поперек напрямку гарячого пресування.

В п'ятому розділі розглянуто результати моделювання явищ в резистивних матеріалах і нагрівачах, питання енергоефективності, стабільності і надійності керамічних нагрівачів на основі розроблених резистивних матеріалів. Наведені результати впровадження нагрівачів в вузлах нагрівання повітряних стерилізаторів.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів.

Вперше шляхом досліджень електрофізичних характеристик резистивних матеріалів на основі діелектричних матриць Si_3N_4 , AlN і Al_2O_3 з провідниковою добавкою HfC акцентована увага на активній ролі Si_3N_4 . Показано, що фаза SiC , утворена *in situ* при гарячому пресуванні, приводить до зростання питомого опору резистивного матеріалу, а також нелінійності ВАХ і гістерезису опору в резистивних матеріалах. Вперше виявлено, досліджено і пояснено зумовлений наявністю SiC в перколяційному кластері гістерезис в температурних залежностях опору і його температурного коефіцієнта. Розроблено модель гістерезису питомого опору і ТКО резистивних композитів, які враховують різний характер провідності компонентів провідникового кластера і програмне забезпечення для розрахунків гістерезису та розподілу температури в суцільнокерамічних нагрівачах з врахуванням температурної залежності опору резистивного шару та різних умов теплообміну з навколишнім середовищем.

Вперше проведено систематичне дослідження впливу біндерів на питомий опір резистивних композитів і розвинуто уявлення про перебіг процесів при гарячому пресуванні $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{HfC}$ і $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{ZrC}$, зокрема про утворення карбонітридів гафнію і цирконію Hf_2CN , Zr_2CN , а також утворення SiC .

Обґрунтовано необхідні значення $\rho = 10^{-1} - 10^1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ та $\text{TK}\rho < 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ для резистивних матеріалів для малогабаритних керамічних нагрівачів з інтенсивною тепловіддачею і розроблено технологічні рекомендації щодо їх забезпечення шляхом вибору параметрів технологічного процесу виготовлення

матеріалу з врахуванням фаз, що утворюються в композиті *in situ* при гарячому пресуванні в резистивному матеріалі.

Практичне значення і впровадження отриманих результатів.

Практичне значення отриманих результатів підтверджено використанням розроблених резистивних матеріалів для виготовлення нагрівального елемента гідродинамічного теплообмінного блоку повітряного стерилізатора, а також позитивними результатами випробування розроблених керамічних нагрівачів в теплоаккумуляторах для зберігання теплової енергії. Крім того, практичне значення безсумнівно буде мати спосіб використання речовин, що утворюються *in situ* в технологічному процесі, для модифікації матеріалів з перколяційними властивостями.

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

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи Кириленко К.В. забезпечується використанням сучасних методів дослідження структури і фазового складу шихти і резистивних матеріалів, частково виконаних за кордоном, ретельним проведенням електрофізичних досліджень, широким співставленням отриманих результатів з відомими на даний час результатами, а також широким використанням обчислювальної техніки для моделювання електрофізичних явищ в розроблених резистивних матеріалах і теплофізичних процесів при нагріванні керамічних нагрівачів електричним струмом.

Публікація і апробація результатів роботи.

Аналіз списку опублікованих праць свідчить, що матеріали дисертаційної роботи Кириленко К.В. досить повно відображені в опублікованих 22 наукових працях, в тому числі в 13 статтях у фахових виданнях і в 5 статтях, у виданнях, що входять в міжнародну наукометричну базу Scopus, та пройшли відповідну

апробацію на наукових вітчизняних та міжнародних конференціях – 9 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Оцінка мови, стилю та відповідності спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Дисертаційна робота і матеріали досліджень викладені кваліфіковано, систематизовано, грамотно і логічно. Розділи роботи взаємопов'язані і повністю розкривають заявлену в роботі тему. Автореферат дисертації повністю відповідає основним положенням дисертації. За змістом дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Зауваження до дисертації та автореферату.

1. В п.1 розділу "Наукова новизна одержаних результатів" некоректно описана температурна залежність опору резистивного матеріалу Al_2O_3-HfC як залежність з мінімумом. Насправді, як впливає з матеріалів дисертації (с. 125-127), для цього матеріалу залежність опору від температури спадає.
2. В дисертації детально розглянуто вплив біндерів – каучуку і КМЦ – на властивості резистивного шару нагрівачів і встановлено, що КМЦ більше впливає на них, але не запропоновано пояснення цьому факту.
3. Результати розрахунків розподілу температури в нагрівальному елементі (с. 180-181) необхідно було б описати більш детально і зрозуміло. Рисунок 5.19 перевантажений інформацією, з підпису важко визначити, для яких умов отримані наведено на ньому криві.
4. В тексті дисертації і в авторефераті, на жаль, зустрічаються орфографічні помилки, наприклад, «провыдноковою» (рис. 3.12), «внаслідок» (с. 175), та граматичні неузгодженості.

Однак, слід відзначити, що наведені зауваження не відносяться до принципів, не стосуються основних положень роботи і не знижують цінності отриманих результатів і наукового рівня, а також загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Висновок.

Виходячи з наведеного аналізу змісту дисертації, автореферату і опублікованих робіт по темі дисертації Кириленко К.В. можна зробити висновок, що вона є кваліфікованим науковим співробітником, здатним самостійно ставити і розв'язувати важливі задачі в області матеріалознавства. Її дисертаційна робота є закінченою кваліфікаційною науковою працею, яка вирішує важливу науково-технічну задачу в галузі матеріалознавства, що полягає у встановленні взаємозв'язків технологія – мікроструктура – властивості композиційних матеріалів функціонального призначення. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 "Положення про присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України за №567 від 24.07.2013 р, та змінами згідно з постановами КМ України №656 від 19 серпня 2015, №1159 від 30.12.2015 та №567 від 27.07.2016 рр. щодо кандидатських дисертацій, а автор дисертації, Кириленко Катерина Всеволодівна, заслуговує на присудження ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний спонент:

Д.т.н. (за спеціальністю 05.02.01 - матеріалознавство),

професор, завідувач кафедри транспортних технологій

Херсонської державної морської академії

А.В.Букетов

Підпис д.т.н., професора А.В.Букетова засвідчую:

Проректор з науково-педагогічної роботи

Херсонської державної морської академії

к.т.н., доцент



А.П.Бень