

## Рецензія

рецензента, к.т.н., доцента Лаврової І.О.

на дисертаційну роботу Волощук Валентини Василівни

### «РАДІОПРОЗОРИ КЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ $RO - Al_2O_3 - SiO_2$ »

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161-Хімічні технології та інженерія

#### 1. Актуальність теми та зв'язок з науковими планами і програмами.

На сьогоднішній день створення нових радіопрозорих матеріалів, що здатні пропускати електромагнітні хвилі радіочастотного діапазону, відноситься до числа завдань, які потребують свого негайного рішення. Це рішення полягає в переході до розробки та впровадження неорганічних радіопрозорих матеріалів (РПМ), що характеризуються високою однорідністю структури, термостійкістю та стабільністю електродинамічних параметрів у широкому радіочастотному діапазоні. Такий підхід прийнятий в країнах ЄС, США, Китаї, Японії, Південній Кореї.

Враховуючи це, тема дисертаційної роботи є своєчасною та вельми актуальною для сучасного матеріалознавства, бо теоретичні та експериментальні дослідження, які представлені в роботі, орієнтовані на встановлення фізико-хімічних закономірностей формування структури та фазового складу керамічних РПМ із заданими електрофізичними характеристиками, що є стабільними в широкому температурному та частотному діапазонах, та забезпечують тривалий термін ефективної експлуатації виробів з них.

#### 2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась здобувачем у рамках фундаментальних та прикладних держбюджетних НДР МОН України: «Розробка теоретичних основ синтезу радіопрозорих керамічних матеріалів на основі системи  $RO - RO_2 -$

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>» (№ ДР 0116U000856), «Підвищення корозійної стійкості та довговічності високотемпературної радіопрозрадної кераміки для об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки» (№ ДР 0120U001004) та держбюджетне замовлення «Розроблення складів та технології виготовлення керамічних радіопрозорих носових обтічників для захисних елементів конструкцій літальних апаратів» (№ ДР 0118U02230), що виконувались у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».

### **3. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.**

Дисертація є довершеною науково-дослідною роботою, яка містить анотацію, зміст, перелік позначень та символів, перелік скорочень, шість розділів, висновки до розділів і загальні висновки, список використаних джерел та додатки.

Дисертаційна робота спрямована на розвиток наукових основ і уявлень щодо отримання радіопрозорих керамічних матеріалів на основі системи RO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> (RO – SrO, BaO) та дослідження їх електродинамічних та експлуатаційних властивостей.

*Об'єкт дослідження* – процеси спікання та фазоутворення керамічних матеріалів з комплексом діелектричних властивостей, здатних забезпечити максимальне пропускання електромагнітних хвиль радіочастотного діапазону.

*Предмет дослідження* – фізико-хімічні закономірності формування, властивості, фазовий склад і структура радіопрозорих керамічних матеріалів на основі композицій системи RO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>; (RO = SrO, BaO) та технологічні параметри виготовлення захисних конструкцій радіотехнічних систем авіаційних об'єктів.

В дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання, яке характеризується науковою новизною і має практичне значення, а саме – створення технології виготовлення носових обтічників та елементів захисних

конструкції антенних систем авіаційних об'єктів з використанням розроблених радіопрозорих керамічних матеріалів, які володіють комплексом заданих функціональних та високих експлуатаційних властивостей.

У *вступі* обґрунтована актуальність задач дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, сформульована мета та основні задачі, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, відзначена апробація результатів роботи.

В *першому розділі* здійснений аналітичний огляд вітчизняних та світових джерел інформації щодо основних характеристик існуючих радіопрозорих матеріалів та проаналізовані їх властивості у взаємозв'язку із структурою та фазовим складом. Зазначено переваги та недоліки існуючих радіопрозорих матеріалів і технології виробництва антенних обтічників з них.

У *другому розділі* охарактеризовано необхідний і достатній набір інструментальних, переважно, стандартизованих методів досліджень, сировини і матеріалів, а також методів отримання зразків.

Теоретичні дослідження проводили з використанням методів аналізу згідно сучасних уявлень про фізичну хімію і термодинаміку силікатів. Діелектричні та фізико-механічні властивості отриманих матеріалів визначали згідно діючих стандартів та визначених методик. Визначення параметрів газодинаміки та напружено-деформованого стану проводили за допомогою ліцензійного програмного забезпечення ANSYS (пакет ANSYS CFX та пакет ANSYS Mechanical).

У *третьому розділі* обґрунтовано вибір складів для отримання цельзіанової та славсонітової кераміки на основі систем  $RO-Al_2O_3-SiO_2$  ( $RO = SrO, BaO$ ). Досліджено вплив добавок  $MgO, Cr_2O_3, ZrSiO_4, TiO_2, CaCO_3, B_2O_3, MoO_3$  та евтектичної композиції  $Li_2O : SnO_2$  на процеси структуро- та фазоутворення цельзіанової кераміки за умови зниженої температури синтезу.

В *четвертому розділі* встановлено оптимальні технологічні параметри (час помелу синтезованого матеріалу, температура випалу, час витримки за максимальної температури випалу) отримання цельзіанової та славсонітової

кераміки. Встановлено структурно-фазові особливості отриманої кераміки методами рентгенофазового аналізу та скануючої електронної мікроскопії.

Представлено розроблені технології виготовлення носових обтічників для захисту антенного обладнання авіаційних об'єктів, отриманих з радіопрозорих керамічних матеріалів на основі цельзіану та славсоніту із заданими функціональними та високими експлуатаційними властивостями.

В *п'ятому розділі* обґрунтовано вірогідність взаємодії розробленої кераміки з кислотними та лужними реагентами, проведено розрахунки параметрів газодинаміки та напружено-деформованого стану керамічних антенних обтічників, на основі розроблених складів. Експериментально підтверджено доцільність виготовлення виробів та деталей конструкцій для захисту радіоелектронного обладнання у ракетній, авіаційній та космічній галузях за розробленими технологічними параметрами з використанням отриманих радіопрозорих керамічних матеріалів.

В *шостому розділі* наведено результати апробації та впровадження отриманих результатів дисертаційних досліджень.

*Висновки* сформульовано чітко, вони повністю висвітлюють отримані результати та відповідають поставленим завданням дослідження. За своїм рівнем висновки повністю відповідають вимогам, які висувуються до результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

*Список використаних джерел* достатньо повно охоплює предметну галузь та відображає опрацювання автором значної кількості сучасних вітчизняних та закордонних джерел.

*Додатки* до роботи містять матеріали досліджень, що не увійшли в основну частину.

#### **4. Наукова новизна отриманих результатів.**

До найбільш суттєвих та науково нових результатів дисертаційної роботи, на мою думку, можна віднести наступні:

1. теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість отримання радіопрозорих керамічних матеріалів на основі композицій систем SrO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> та BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, які характеризуються високими показниками механічної міцності та низькими показниками діелектричних характеристик (діелектрична проникність, тангенс кута діелектричних втрат);
2. вперше досліджено вплив добавок (ZrSiO<sub>4</sub>, MgO, TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MoO<sub>3</sub>) та евтектичної композиції LS (Li<sub>2</sub>O: SnO<sub>2</sub> зі співвідношенням 1:1) на інтенсифікацію процесів спікання, фазо- та структуроутворення цельзіанової кераміки за умови зниженої температури випалу. Доведено інтенсифікуючу дію добавки LS (1 мас. % понад 100 мас. % на суху речовину) на синтез цельзіану та спікання кераміки за температури 1200 °C;
3. вперше здійснено прогнозну оцінку хімічної стійкості термодинамічно підтверджених фаз, які приймають участь у синтезі цельзіану та славсоніту, з лужними та кислотними реагентами (NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, HNO<sub>3</sub>) та встановлено, що радіопрозора кераміка славсонітового та цельзіанового складів виявлятиме високу хімічну стійкість до стандартних розчинів луг (NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) та кислот (HCl та в меншій мірі H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), що підтверджено експериментально;
4. вперше за результатами аналізу параметрів газодинаміки та напружено-деформованого стану антенних обтічників для випадку використання цельзіанової кераміки визначено, що еквівалентні ( $\leq 69,3$  МПа) та головні ( $\leq 40$  МПа) напруження, що виникають у виробі, не перевищують меж міцності при згині для цельзіанової кераміки (290 МПа), а різниця температур на внутрішній та зовнішній поверхні носового обтічника відрізняється в середньому не більше ніж на  $\pm 1$  °C Це свідчить про те, що обтічник, виготовлений із зазначеної кераміки зберігатиме свою цілісність в жорстких умовах експлуатації;
5. вперше доведено, що функціональність носових обтічників з цельзіанової та славсонітової кераміки, а саме сталість їх діелектричних та електродинамічних характеристик ( $\epsilon = 4,5 - 5,3$ ;  $\text{tg}\delta = 0,008 - 0,015$ ,  $k_{\text{пер}} = -5,5 -$

-2,0 дБ;  $k_{\text{відб}} = -1,8 - -6,1$  дБ) в робочому температурному (20-1500 °С) та частотному (26 – 37,5 ГГц) діапазонах забезпечується за рахунок спрямованого твердофазного синтезу цільових сполук із середнім розміром 5 мкм за умови збереження стехіометричного відношення відповідних фазотвірних оксидів, а також завдяки високій однорідності та максимальному ступеню спікання ( $W = 0,7-1,4$  %) отриманих керамічних матеріалів.

### **5. Достовірність отриманих результатів та висновків.**

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректною постановкою задачі, мети та завдань дисертаційного дослідження, які розв'язуються послідовно та аргументовано. Достовірність наукових положень базується на основних принципах фізичної хімії, термодинаміки та хімічної технології силікатів та підтверджується багатьма експериментальними дослідженнями, проведеними з використанням сучасного лабораторного обладнання та стандартизованих методів досліджень.

### **6. Практична цінність отриманих результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання.**

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. На основі комплексу проведених досліджень створено монофазні радіопрозорі керамічні матеріали, властивості яких задовольняють вимоги до РПМ:

– цельзіанова кераміка RTC-C-14: водопоглинання –  $1,2 \div 1,4$  %, уявна густина –  $2,6 \div 2,8$  г/см<sup>3</sup>, відкрита пористість –  $1,9 \div 2,5$  %, межа міцності при згині –  $260 \div 280$  МПа, вогнетривкість – 1690 °С, діелектрична проникність –  $5,1 \div 5,3$ , тангенс кута діелектричних втрат –  $0,013...0,015$ ,  $k_{\text{пер}} = -4,7...-2,5$  дБ;  $k_{\text{відб}} = -1,8 ... -5,9$  дБ (при частоті 26 – 37,5 ГГц);

– славсонітова кераміка RTC-S-14: водопоглинання –  $0,7 \div 0,9$  %, уявна щільність –  $2,6 \div 2,8$  г/см<sup>3</sup>, відкрита пористість –  $1,6 \div 2,2$  %, межа міцності при згині –  $340 \div 360$  МПа, вогнетривкість – 1640 °С, діелектрична проникність –

4,5 ÷ 4,8, тангенс кута діелектричних втрат – 0,008...0,010,  $k_{пер} = -5,5...-2,0$  дБ;  $k_{відб} = -2,1...-6,1$  дБ (при частоті 26 – 37,5 ГГц).

2. Новизна розробок захищена 2 патентами на корисну модель.

3. На прикладі розробленої цельзіанової кераміки показана ефективність використання прогнозних розрахунків за методом кінцевих елементів для аналізу поведінки носових обтічників в умовах експлуатації при дії газодинамічних (термічних та механічних) навантажень.

4. Опрацьовано технологічну схему та параметри виготовлення носових обтічників, які забезпечують функціональність та комплекс високих експлуатаційних властивостей виробів. Практичні рекомендації щодо особливостей технології виготовлення носових обтічників викладено в розроблених технічних умовах.

5. Дослідна партія носових обтічників, виготовлених з розроблених радіопрозорих керамічних матеріалів за запропонованою технологією, пройшла напівпромислові та промислові випробування на ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля» (м. Дніпро, Дніпропетровська обл.) та Костянтинівському ДНВП «Кварсит» Державного концерну «Укроборонпром» (м. Костянтинівка, Донецька обл.).

6. Теоретичні та практичні результати, отримані при виконанні науково-дослідної роботи, впроваджені у практику навчального процесу кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХП» під час підготовки студентів I – III кваліфікаційних рівнів освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія.

**7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень і результатів в опублікованих працях.**

Дисертаційна робота має логічну структуру. Основні висновки повністю відповідають поставленим завданням дослідження та логічно витікають з отриманих результатів дослідження.

Проведено перевірку дисертації на наявність академічного плагіату, отримані результати свідчать про високу індивідуальність дисертаційної роботи. Використання результатів, отриманих іншими науковцями супроводжується посиланнями на відповідні джерела.

Всі основні положення та найбільш важливі наукові результати дисертації, опубліковані в необхідному обсязі у фахових наукових виданнях України та закордонних періодичних виданнях, пройшли відповідну апробацію на міжнародних науково-практичних конференціях.

За темою дисертації опубліковано 27 наукових праць, в тому числі: 2 статті опубліковано в журналах, що включені до наукометричної бази Web of Science (Угорщина); 6 статей, що входять до фахових видань України (з них 1 стаття категорії А, Scopus); розділи у 3 колективних монографіях; 14 тез доповідей опубліковано у збірниках матеріалів конференцій (з них 1 матеріал конференції включені до наукометричних баз Scopus); 2 патенти України на корисну модель.

#### **8. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. У другому розділі дисертації, бажано було б навести програму дослідження.
2. Було б доцільно навести в додатках розрахунок економічної ефективності прийнятих рішень з огляду на існуючі на світовому ринку аналоги, а також дані щодо відтворюваності експериментальних досліджень.
3. В описах технологічних схем виробництва носових антенних обтічників доречно навести характеристику відходів виробництва, вказати їх кількість.
4. В роботі присутня невелика кількість стилістичних помилок.

Слід відмітити, що зазначені вище недоліки та зауваження не є суттєвими, істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукової і практичної цінності.

## 9. Висновки.

Представлена дисертація є довершеною науково-дослідною роботою, яка містить нові обґрунтовані результати. У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, яка має важливе значення для галузі знань 16 «Хімічна та біоінженерія». Тема і зміст дисертації повною мірою відповідають спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія».

З огляду на актуальність теми дисертації, обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх новизну та практичну цінність, повноту викладення матеріалу в наукових публікаціях, відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що дисертація здобувача Волощук Валентини Василівни «Радіопрозорі керамічні матеріали на основі системи  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$ » за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія», повністю відповідає вимогам пп. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», від 12.01.2022 р. № 44 та «Вимогам до оформлення дисертацій», затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 р. № 40, а її автор, Волощук Валентина Василівна, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія».

Рецензент – кандидат технічних наук,  
доцент, професор кафедри технології  
переробки нафти, газу та твердого палива  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»

Інна ЛАВРОВА



ЗАПЕЧЕНО