

ВІДГУК
офіційного опонента ЛУЦЮК Ірини Володимирівни
на дисертаційну роботу **Кривобок Руслана Вікторовича**
“Теоретичні основи технології керамічних матеріалів на основі

системи
RO–Al₂O₃–SiO₂ для авіакосмічної техніки”,

що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних
матеріалів

Актуальність теми дисертаційної роботи. У сучасному матеріалознавстві особливу увагу заслуговують електротехнічні матеріали зі спеціальними властивостями, які можуть бути використані в оборонних технологіях. До таких матеріалів належить радіопрозора кераміка, головною перевагою якої є здатність ефективно пропускати електромагнітні хвилі. Це критично важливо для належної роботи авіоніки, яка забезпечує функцію радіолокації, зв'язку та навігації літальних апаратів. Керамічні матеріали характеризуються високою стійкістю до ерозії, що виникає через високошвидкісний рух літальних апаратів в атмосфері. Порівняно з традиційними матеріалами кераміка демонструє підвищену стійкість до вологи, ультрафіолетового випромінювання та температурних коливань, що значно підвищує її термін експлуатації в авіаційній галузі.

Основні напрямки розвитку технологій радіопрозорої кераміки спрямовані на вдосконалення її хімічного складу, що дає можливість забезпечувати оптимальне поєднання радіопрозорості з іншими важливими властивостями матеріалу, такими як міцність, термічна стабільність і хімічна стійкість. Забезпечення необхідного балансу цих характеристик відкриває нові перспективи для підвищення надійності та безпеки вітчизняної авіаційної техніки, що є особливо актуальним в умовах зростаючих вимог до ефективності літальних апаратів.

Вдосконалення технологічних процесів виробництва радіопрозорої кераміки є ключовим завданням, яке забезпечує як покращення характеристик матеріалів, так і зниження матеріальних та енергетичних виробничих витрат. Такий підхід сприятиме підвищенню ефективності, економічної доцільності та швидкому впровадженню технологій, що набуває особливої значущості в контексті зміцнення обороноздатності України в умовах сьогодення.

Отже, науково-практична проблема розробки фізико-хімічних основ, концепцій і технологій створення керамічних матеріалів для авіакосмічної техніки з комплексом удосконалених та стабільних електрофізичних, електродинамічних та експлуатаційних характеристик на основі алюмосилікатних оксидних систем є надзвичайно актуальною. Актуальність дисертаційної роботи також підтверджується тим, що дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукової роботи кафедри технологій кераміки, вогнетривів, скла та емалі НТУ «ХП» та увійшла до 11 фундаментальних та прикладних держбюджетних НДР, затверджених МОН України, в рамках яких

здобувач брав участь як відповідальний виконавець.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи. Обґрунтованість основних наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Кривобока Р. В. є високою і базується на ретельному аналізі наукових джерел за даною проблемою, логічній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, зіставленні та критичному аналізі отриманих результатів. Дослідження будови базової системи $RO-Al_2O_3-SiO_2$ та її підсистем виконані з використанням сучасного теоретичного апарату фізичної хімії силікатів, зокрема відомих методів вивчення фазової рівноваги багатокомпонентних оксидних систем, та надійного математичного планування експерименту. Результати експериментальних досліджень отримані на статистично великій вибірці даних, є взаємоузгодженими, відповідають сучасному рівню знань, представлених у роботах вітчизняних та зарубіжних науковців, і підтверджені під час промислової апробації, забезпечуючи їх відтворення.

Висновки як за окремими розділами, так і для дисертації в цілому є обґрунтованими, ґрунтуються на результатах, отриманих особисто здобувачем, та повністю відображають наукову новину й практичну значущість положень, сформульованих у дисертації.

Достовірність результатів досліджень. Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановки його задач, застосуванням комплексу сучасних методів фізико-хімічного аналізу, використанням сучасних апаратурних засобів вимірювання властивостей, математично-статистичних методів планування експерименту, співставлення та перевірки отриманих моделей на адекватність. Достовірність результатів підтверджується також відповідністю властивостей лабораторних зразків матеріалів та керамічних виробів із промислової партії, що отримані у заводських умовах. Наукові результати роботи успішно апробовані в умовах КДНВП «Кварсит» (ДК «Укроборонпром»), ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля», ДНВП «Кварсит» та ТОВ «Радіонікс», що підтверджує достовірність отриманих теоретичних і практичних результатів дисертації.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи. В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему розроблення фізико-хімічних основ та технології радіопрозорі кераміки на основі системи $RO (SrO, BaO, ZnO)-Al_2O_3-SiO_2$, в якій відбувається синтез цільових фаз та їх композицій, здатних забезпечити комплекс необхідних електрофізичних, електродинамічних і техніко-експлуатаційних характеристик кераміки для авіакосмічної техніки.

Наукова новизна дослідження полягає у теоретичному обґрунтуванні та розробленні технології отримання радіопрозорих керамічних матеріалів на основі композицій системи $RO-Al_2O_3-SiO_2$, що забезпечує формування заданих кристалічних фаз – алюмосилікатів стронцію, барію, силікату цинку та їх комбінацій. Розроблена концепція створення керамічних матеріалів для авіакосмічної техніки полягає у контрольованому синтезі цільових

кристалічних фаз за їхнього раціонального співвідношення у фазовому складі кераміки. Удосконалено базу термодинамічних констант потрібних алюмосилікатів вказаної вище оксидної системи, досліджено її субсолідусну будову, надано геометро-топологічну характеристику фаз, визначено їхню фазову стабільність у температурному діапазоні 300–1700 К, що в сукупності дало можливість ідентифікувати комбінації фаз, придатних для створення радіопрозорої кераміки. Експериментально встановлено механізми формування і температурні області існування фаз славсоніту, цельзіану, їх твердого розчину та фазового комплексу «славсоніт-віллеміт», підтверджено вплив евтектичних добавок, ($\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$ та KAlSi_3O_8) на інтенсифікацію фазоутворення. Розроблено матеріали, які характеризуються стабільними діелектричними властивостями ($\varepsilon = 4,4\text{--}5,7$; $\text{tg}\delta = 0,005\text{--}0,013$) у частотному діапазоні 26–37,5 ГГц, високою хімічною стійкістю до кислих та лужних середовищ, а також до морської води. За результатами аналізу газодинаміки та напружено-деформованого стану складнопрофільних виробів із розроблених видів кераміки визначено, що вони зберігають структурну цілісність за умов високих термічних і механічних навантажень і мають високий запас міцності конструкції.

Технологія виготовлення радіопрозорої кераміки удосконалена через двостадійний підхід із оптимізацією параметрів формування синтетичного напівфабрикату та введенням точно визначених кількостей інтенсифікаторів фазоутворення. Це дало можливість зменшити температуру синтезу цільових фаз, що підвищило адаптивність розроблених матеріалів і забезпечило їхню високу надійність в умовах інтенсивних експлуатаційних навантажень.

Технічна новизна розробок захищена 7 патентами України на корисну модель та 1 патентом України на винахід.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи. Отримані результати мають важливе значення для галузей вітчизняного авіа- та ракетобудування. На основі проведених досліджень будови багатокомпонентної системи $\text{RO} (\text{SrO}, \text{BaO}, \text{ZnO})\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ оптимізовані області складів, придатних для отримання матеріалів, які задовольняють вимоги до радіопрозорої кераміки. Завдяки контрольованому процесу фазоутворення, радіопрозорі матеріали, створені на основі дослідженої системи, мають високі робочі температури та стабільні діелектричні властивості. Це забезпечує надійну роботу радіотехнічного обладнання літальних апаратів навіть за несприятливих погодних умов, а також під час впливу механічних і теплових навантажень.

Теоретичні та практичні результати дисертації впроваджено в навчальний процес кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ«ХП».

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях. Результати дисертаційного дослідження достатньо повно відображені у 56 наукових публікаціях, серед яких 23 статті у періодичних виданнях, що відповідають науковому напрямку роботи. Серед цих статей 16 опубліковано у фахових виданнях України, зокрема 8 статей, що включено до наукометричної бази даних Scopus, та 7 статей у періодичних виданнях інших країн, з яких

2 статті представлені у журналах Scopus і 5 – у виданнях, індексованих у WoS. Крім того, до публікацій включено 3 статті, що додатково ілюструють результати дослідження, а також 1 монографія та 4 розділи у колективних монографіях, 7 патентів України на корисну модель та 1 патент України на винахід, а також 17 праць, опублікованих у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

Аналіз змісту дисертаційної роботи. Дисертаційна робота має структуру та обсяг, що відповідають вимогам, які висуваються до докторських дисертацій технічного напрямку. Робота складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 408 сторінок, основний текст викладено на 282 сторінках.

В анотації наведено основний зміст дисертаційної роботи автора (українська та англійська мова). Наведено список опублікованих праць за темою дисертації.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, висвітлено зв'язок роботи з науковою тематикою держбюджетних тем МОН України, сформульовано мету, об'єкт і предмет дослідження, наведено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, відомості про структуру дисертації, публікації та апробації результатів дисертаційного дослідження, відзначено особистий внесок здобувача у спільні публікації.

Перший розділ дисертації присвячений аналізу вітчизняної та міжнародної науково-технічної літератури з питань створення радіопрозорих керамічних матеріалів для авіаційної промисловості, їхніх перспективних складів на основі алюмосилікатів. Автором розглянуто питання щодо будови алюмосилікатних систем, що містять оксиди барію, стронцію і цинку, та їхнє використання для створення радіопрозрачної кераміки. Встановлено, що багатокомпонентна система $RO (SrO, BaO, ZnO)-Al_2O_3-SiO_2$ вивчена недостатньо. Розглянуто способи вдосконалення технологій виготовлення радіопрозорих виробів складної конфігурації.

У другому розділі автором наведено перелік та характеристику сировинних матеріалів, технологічні особливості виготовлення лабораторних зразків. Описано методики стандартизованих та спеціальних визначень основних властивостей керамічних матеріалів, дослідження їхньої структури та фазового складу. Автором для оптимізації складів і пошуку оптимальних рішень використано методи математичного планування експерименту.

У третьому розділі здійснено теоретичне дослідження субсолідусної будови систем $SrO-BaO-Al_2O_3-SiO_2$ та $SrO-ZnO-Al_2O_3-SiO_2$ з метою розроблення на їхній основі радіопрозорих керамічних матеріалів із заданими діелектричними властивостями. Систематизовано термодинамічні дані для алюмосилікатних сполук, визначено умови синтезу славсоніту, цельзіану та віллеміту, а також оптимальні температурно-часові режими їхнього утворення. Аналіз фазоутворення в цих системах показав придатні тетраедри для отримання матеріалів на основі цільових фаз, таких як славсоніт, цельзіан і віллеміт.

Четвертий розділ дисертації присвячений важливій проблемі – розробленню композицій для синтезу цільових фаз у керамічних матеріалах-напівфабрикатах за зниженої температури їхнього формування. Автором розроблені композиції на основі славсоніту та цельзіану з температурами формування 1350 °С та 1450 °С, які забезпечили комплекс необхідних властивостей, такі як густина 2090–2330 кг/м³, діелектрична проникність 7,4–9,7 та межа міцності при стиску 38–99 МПа.

Надзвичайно важливими є дослідження щодо впливу різного роду добавок як інтенсифікаторів фазоутворення та спікання. Здобувачем детально проаналізовано вплив таких добавок як SnO₂, Li₂O, SnO₂:Li₂O на умови синтезу цільових фаз, встановлено механізм фазоутворення, визначено шляхи його інтенсифікації. Показано, що оптимальною добавкою для покращення спікання є SnO₂:Li₂O, яка забезпечує формування кристалічної фази монофазної кераміки (цельзіанової, славсонітової і цельзіан-славсонітової) за температури 1250 °С, високощільну структуру матеріалу та його покращені механічні характеристики. Встановлено, що добавка калієвого польового шпату у кількості 4 мас. % покращує спікання гетерофазної славсоніт-віллемітової кераміки, що підтверджено зменшенням водопоглинання кераміки до 0,67 % за температури синтезу 1150 °С.

У п'ятому розділі виконано значний об'єм досліджень, пов'язаний з розробленням технологічного процесу виготовлення радіопрозорої кераміки, зокрема вивченням чинників, що впливають на властивості сумішей і готових матеріалів. Визначено оптимальні параметри помелу матеріалів-напівфабрикатів, реологічні властивості суспензій (вологість 30 %, розріджувачі) та параметри випалювання. Автором розроблено технологічні схеми виготовлення виробів складної конфігурації на основі двостадійної технології з оптимальними параметрами для кожного етапу.

У шостому розділі детально вивчено поведінку складнопрофільних виробів із радіопрозорої кераміки за визначених умов експлуатації. Використано 3D-моделювання газодинаміки і напружено-деформованого стану моделей виробів із розроблених видів кераміки за високих коефіцієнтів запасу міцності конструкцій. Автором експериментально підтверджено високу хімічну стійкість матеріалів до агресивних середовищ, зокрема морської води. Показано, що діелектричні та електродинамічні властивості матеріалів відповідають вимогам, які висуваються до радіопрозорої кераміки, яка може працювати в діапазоні частот 26–37,5 ГГц. Експериментально визначена вогнетривкість дала змогу встановити можливість використання матеріалів за температур до 1500 °С.

У сьомому розділі наведені результати практичної апробації розробленої технології радіопрозорої кераміки з посиланням на акти впровадження в умовах провідних підприємств України в галузі авіабудування.

Висновки до розділів та за результатами дисертаційної роботи є ґрунтовними, повністю відображають результати виконаних досліджень, узгоджені із задачами дослідження та показують наукову новизну і практичне значення роботи.

У списку використаних джерел нараховується 241 найменування, що включають як вітчизняні, так і зарубіжні публікації сучасного періоду.

У додатках наведено список публікацій здобувача, акти впровадження результатів дисертаційних розробок, розроблена технічна документація, довідка про впровадження матеріалів дисертаційної роботи в практику навчального процесу «Харківський політехнічний інститут».

Ідентичність змісту автореферату та основних положень дисертації. Автореферат дисертації оформлений відповідно до чинних вимог, містить всі необхідні елементи, які повністю відображають основні структурні частини дисертації. Зміст автореферату є ідентичним основному змісту дисертації та опублікованим роботам.

Академічна доброчесність. Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Зауваження та пропозиції до дисертаційної роботи:

1. У дисертаційній роботі автор представив результати досліджень впливу добавок із різними механізмами дії (твердофазні, рідкофазні або їх поєднання) на процеси фазоутворення керамічних матеріалів та їхні властивості. Чи було вивчено вплив зазначених добавок на реологічні властивості шлікерів?

2. У пункті 5.3 при визначенні оптимальних параметрів випалювання виробів на основі славсоніт-віллемітової кераміки вказані змінні технологічні параметри проведеного експерименту. Однак у таблиці 5.10 наведено властивості лише для одного технологічного режиму. Було б доцільно представити результати для всіх зазначених режимів досліджень.

3. Однією з ключових вимог для надійної роботи зовнішніх систем радіокерування літальних апаратів є низька теплопровідність матеріалу захисних елементів, висока термостійкість, а також, можливо, морозостійкість. Однак у дисертаційній роботі відсутні дані щодо цих властивостей для розроблених радіопрозорих керамічних матеріалів.

4. Наведений у роботі порівняльний аналіз технічних і технологічних характеристик існуючих аналогів (табл. 7.3) та керамічних матеріалів, розроблених автором, було б доцільно доповнити розрахунком економічної ефективності. Це дозволило б автору ґрунтовніше оцінити техніко-економічні переваги власних розробок.

5. Із тексту дисертації не зовсім зрозуміло, чому до вибору інтенсифікаторів фазоутворення здобувач підійшов диференційовано: для монофазних видів кераміки (славсонітової, цельзіанової та цельзіан-славсонітової) обрана евтектична добавка $\text{SnO}_2\text{:Li}_2\text{O}$, а для гетерофазної славсоніт-віллемітової кераміки – чистий калієвий польовий шпат. Яким чином буде забезпечена промислова технологія за умови використання цього виду сировини?

Однак варто зазначити, що вказані зауваження не мають принципового характеру і не зменшують теоретичної та науково-практичної цінності дисертаційної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота **Кривобок Руслана Вікторовича «Теоретичні основи технології керамічних матеріалів на основі системи $RO-Al_2O_3-SiO_2$ для авіакосмічної техніки»** є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-прикладну проблему розроблення теоретичних основ і технології радіопрозорих керамічних матеріалів для авіакосмічної техніки на основі алюмосилікатних систем. Дисертаційна робота відповідає вимогам до докторських дисертацій за структурою, об'ємом та оформленням. За актуальністю, науковою новизною отриманих результатів, їхньою достовірністю, ступенем обґрунтованості та практичною цінністю дисертаційна робота задовольняє вимоги п.п. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а здобувач **Кривобок Руслан Вікторович** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів.

Офіційний опонент,
завідувачка кафедри хімічної
технології силікатів
Національного університету
“Львівська політехніка”
доктор технічних наук, професор

 Ірина ЛУЦЮК

“Підпис доктора технічних наук, професора
Луцюк І. В. засвідчую”
Вчений секретар Національного університету
“Львівської політехніки”



Роман БРИЛИНСЬКИЙ