

## ВІДГУК

офіційного опонента

Зайчука Олександра Вікторовича

на дисертаційну роботу Тимофєєва Вадима Дмитровича

«УДАРОСТІЙКІ МУЛІТОКОРДІЄРИТОВІ СКЛОКРИСТАЛІЧНІ  
МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЗАХИСТУ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія»

### **Актуальність теми**

Аналіз сучасного стану ринку передових керамічних бронематеріалів свідчить про стрімке зростання попиту на високоміцну кераміку, зумовлене необхідністю підвищення захищеності легкоброньованої техніки в умовах зростання рівня загроз та модернізації озброєння. При цьому основними тенденціями розвитку бронезахисних матеріалів є пошук ефективного співвідношення експлуатаційних властивостей і вартості шляхом застосування новітніх композиційних матеріалів на основі кераміки. Однак, висока вартість традиційних керамічних матеріалів, таких як карбід бору та силіцій карбід, обмежує їх широке застосування, що актуалізує розробку більш доступних за вартістю альтернативних матеріалів з високими показниками міцності і ударостійкості. Перспективним напрямом є створення склокристалічних матеріалів (СКМ) на основі алюмосилікатних систем, зокрема, дисилікату літію, магнійалюмінатної шпінелі, кордієриту, які здатні забезпечити високу ударостійкість, тріщиностійкість, низьку щільність та високий ступінь світлопроникності.

Водночас реалізація потенціалу таких матеріалів стримується високими температурами синтезу та складністю їх формування через високу в'язкість склорозплавів. Особливої уваги потребує розробка технологій отримання високоміцних склокристалічних матеріалів із самоорганізованою наноструктурою в умовах низькотемпературної короткотривалої термічної обробки.

Враховуючи важливість підвищення військового потенціалу і обороноздатності країни, розробка інноваційних склокристалічних матеріалів на

основі магнійалюмосилікатного скла для конструкцій бронезахисту є актуальним науковим і практичним завданням. Саме цим питанням присвячено дослідження, результати яких представлені у даній дисертаційній роботі.

Дисертаційна робота виконувалась в рамках науково-дослідних робіт кафедр «Технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХП» та «Хімії та інтегрованих технологій ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, прикладних ДБ НДР МО України: «Наноструктуровані прозорі матеріали для захисту оптичних систем озброєння та військової техніки» (№ д/р 0118U003983, 2018 р.), «Удосконалення технічних рішень підвищення ефективності роботи механізму заряджання танка Т-64Б та його модифікацій за рахунок впровадження системи самодіагностування» (№ д/р 0121U111756, 2021 р.) та держбюджетного наукового дослідження МО України за спеціальною темою, яке присвячене розробленню технічних рішень для забезпечення ефективного захисту основних зразків озброєння та військової техніки, (розпорядження начальника Генерального штабу ЗС України від 25.09.2024 № 130246/С, 2024 р.), в яких здобувач був відповідальним виконавцем.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.**

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі, є обґрунтованими та достовірними, що підтверджується комплексом проведених теоретичних і експериментальних досліджень.

Проведений ретельний аналіз світових тенденцій розвитку бронематеріалів дозволив обґрунтувати актуальність створення високоміцних склокристалічних матеріалів на основі скла магнійалюмосилікатної системи як перспективної альтернативи дорогим традиційним видам кераміки. У дисертаційній роботі Тимовєєва В.Д. використано сучасні стандартні і спеціальні методи фізико-хімічного аналізу для дослідження фазових перетворень, кристалізаційної здатності, мікроструктури, механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей СКМ.

Експериментальні дослідження проводились із застосуванням термогравіметричних досліджень, рентгенофазового аналізу, петрографічного аналізу, растрової електронної мікроскопії, ІЧ-спектроскопії, механічних випробувань, вимірювань електрофізичних властивостей.

Достовірність результатів досліджень забезпечило застосування міжнародних та національних стандартів (ASTM, ISO, EN, ДСТУ) при випробуваннях, проведення політермічних випробувань для встановлення фазових переходів, балістичні випробування відповідно до ВСТ 01.055.001–2021 (01), що підтвердили ефективність розроблених матеріалів для бронезахисту.

Таким чином, комплексність підходу, використання сучасного обладнання, відповідність міжнародним стандартам випробувань і глибокий аналіз результатів забезпечують високий ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, викладених у дисертаційній роботі.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів досліджень та верифікацію даних на високому науковому рівні забезпечено за допомогою використання сучасних взаємодоповнюючих та уточнюючих методів аналізу та застосування міжнародних і національних стандартів при проведенні випробувань.

### **До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

У дисертаційній роботі вперше:

1. Встановлено особливості формування твердих розчинів у магнійалюмосилікатних склокристалічних матеріалах, що проявляються у зміні індексу упорядкування ( $\Delta$ ) структури в залежності від співвідношення оксидних компонентів та температурних режимів обробки.

2. Визначено вплив пониження температури зародкоутворення на формування зміцненої ситалізованої структури через механізм ендоксидації при фазовому розпаді.

3. Виявлено фактори формування наноструктурованої тонкодисперсної структури СКМ, що забезпечують високу механічну міцність, ударостійкість, знижену щільність та стійкість до динамічних і термічних навантажень.

4. Одержано ударостійкі та радіопрозорі склокомпозиційні матеріали для скління оглядових вікон легкоброньованої техніки, а також розроблено тришарову структуру радіопоглинаючих СКМ з градієнтом діелектричних властивостей для захисту від електромагнітного випромінення.

Розроблені матеріали відповідають вимогам ВСТ 01.055.001–2021 (01) та

придатні для практичного застосування у системах пасивного захисту легкоброньованої військової техніки.

### **Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

Практична значимість виконаної дисертаційної роботи полягає у вирішенні ряду актуальних завдань оборонного та промислового характеру для України, а саме:

1. Зменшення імпортозалежності у сфері матеріалів військового призначення шляхом розробки вітчизняних високоміцних склокристалічних матеріалів на основі магнійалюмосилікатного скла, що характеризуються високими механічними властивостями, ударостійкістю, вогнестійкістю і відповідають сучасним міжнародним стандартам щодо бронезахисту.

2. Підвищення рівня захисту особового складу (екіпажу та пасажирів автомобільної легкоброньованої техніки) за рахунок застосування СКМ із поліпшеними експлуатаційними властивостями, що забезпечують ефективне поглинання кінетичної енергії при влучанні та зменшують ризик пробиття і вторинних ушкоджень.

3. Забезпечення можливості польового ремонту легкоброньованої техніки завдяки використанню технологічних склокристалічних матеріалів, які відзначаються меншою складністю у виготовленні та обробці у порівнянні з традиційними керамічними бронематеріалами.

4. Розробка універсальних СКМ, придатних до створення високоміцних радіопрозорих або радіопоглинаючих склокристалічних композиційних матеріалів (СКпМ), що відкриває можливості для швидкого реагування виробників на потреби оборонного комплексу у створенні спеціалізованих елементів бронезахисту та систем маскування техніки від радіолокаційного виявлення.

5. Підвищення маневреності легкого автомобільного транспорту за рахунок зниження ваги бронеконструкції, що досягається завдяки зменшенню щільності СКМ при одночасному збереженні або покращенні захисних характеристик.

Результати дисертаційної роботи мають важливе значення для розвитку сучасної матеріалознавчої науки, зокрема у таких аспектах:

1. Розширення уявлень про механізми фазових перетворень у

магнійалюмосилікатних склокристалічних матеріалах. Вперше встановлено закономірності зміни індексу упорядкування твердих розчинів та його вплив на структуроутворення при різних температурних режимах, що поглиблює розуміння механізмів кристалізації у багатокомпонентних оксидних системах.

2. Розвиток теорії фазового розділення у скломатеріалах, що дозволило обґрунтувати нові підходи до формування наноструктурованої склокристалічної структури в умовах низькотемпературної короткотривалої термічної обробки магнійалюмосилікатних склокристалічних матеріалів.

3. Наукове обґрунтування параметрів синтезу ударостійких склокристалічних матеріалів, що включає оптимізацію складу, термічних режимів та технологічних процесів для формування високощільної, тріщиностійкої та енергоабсорбуючої структури на мікро- та нанорівнях.

4. Внесок у розвиток нових класів функціональних склокристалічних матеріалів, здатних забезпечувати не лише механічний захист, але й електрофізичні властивості (радіопрозорість, радіопоглинання), що є актуальним для створення багатофункціональних захисних елементів у військовій та аерокосмічній техніці.

5. Методологічне вдосконалення підходів до комплексного фізико-хімічного аналізу матеріалів шляхом поєднання термогравіметрії, рентгенофазового аналізу, електронної мікроскопії, ІЧ-спектроскопії та механічних випробувань, що сприяє підвищенню достовірності та відтворюваності наукових досліджень.

Таким чином, дисертаційна робота вносить вагомий внесок у розвиток наукових основ отримання та вивчення склокристалічних матеріалів нового покоління для оборонної та промислової сфери.

#### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Основні положення і результати дисертаційних досліджень, які виносяться на захист, опубліковані у 22 наукових праць, в тому числі: 6 статей опубліковано в журналах, що включені до наукометричних баз Scopus та/або Web of Science; 4 статті в журналах, що входять до фахових видань України та 2 статті в інших журналах; 11 тез доповідей опубліковано у збірниках матеріалів конференцій (з них 2 опубліковані у виданнях, що включені до наукометричних баз Scopus та/або Web of Science). Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві зазначена у

дисертаційній роботі.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

### **Оцінка змісту дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота Тимофеева Вадима Дмитровича складається з анотації двома мовами (українською та англійською), вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 234 сторінки, з них – 19 рисунків по тексту, 36 рисунків на 23 окремих сторінках, 10 таблиць по тексту, 23 таблиця на 15 окремих сторінках списку використаних літературних джерел 187 найменування на 20 сторінках.

У *вступі* дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено зв'язок досліджень із науковими програмами та темами, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, охарактеризовано використані методи, наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача та наведено дані про апробацію роботи. Дослідження виконувались на базі кафедр технології кераміки, скла та емалей НТУ "ХП", хімії та інтегрованих технологій ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, прикладної електродинаміки ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Інституту монокристалів НАН України та ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут". Балістичні випробування дослідних зразків проведені у науково-дослідній лабораторії Військового інституту танкових військ НТУ "ХП".

*Перший розділ* присвячений аналізу проблем створення полегшених високоміцних матеріалів для локального захисту та спеціальних технічних застосувань, обґрунтовано доцільність використання склокристалічних матеріалів.

У *другому розділі* викладено вибір методів дослідження процесів формування структури і властивостей СКМ, описано сировинні матеріали, результати попередніх досліджень та сформульовано робочу гіпотезу.

*Третій розділ* присвячено розробці скла магнійалюмосилікатних складів для створення високоміцних склокристалічних матеріалів із заданими

характеристиками, включаючи високу світлопроникність для теплотехнічного застосування.

У четвертому розділі наведено результати оптимізації складу та термічної обробки СКМ, описано технологію формування градієнтної структури мулітокордієритових СКпМ для полегшених бронееlementів та елементів радіо- й електротехніки.

П'ятий розділ містить опис технології виготовлення високоміцних СКМ і СКпМ військового та технічного призначення, результати дослідження їх електрофізичних властивостей, бронестійкості та вогнестійкості, а також оцінку конкурентоздатності матеріалів з урахуванням технологічності, вартості та маси виробів.

У висновках узагальнено основні наукові та практичні результати роботи та визначено шляхи впровадження запропонованих технологічних рішень. Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані чітко та відповідають змісту дисертаційної роботи.

#### **Академічна доброчесність**

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

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

#### **По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:**

1. На стор. 3 помилково зазначено, що «Третій розділ присвячений розробці модельних літійалюмосилікатних стекол для розробки високоміцних сподуменвмісних СКМ...».

2. В дисертаційній роботі необхідно дотримуватись загальноприйнятої термінології. Так на стор. 95 для назви модифікацій кордієриту автор вживає терміни «високий кордієрит» і «низький кордієрит», що практично не використовуються в науковій літературі.

3. На стор. 99 в табл. 3.9 для скла КСК-10 зазначена  $T_{кр2} = 990^{\circ}\text{C}$ , яка відсутня

на кривій диференційно-термічного аналізу цього скла (рис. 3.4).

4. На рис. 3.7 (стор. 108) і рис. 4.4 (стор. 161) відсутня розмірна шкала, що унеможливило б достовірну оцінку розміру кристалічних фаз в склокристалічному матеріалі.

5. На стор. 114 при описі ІЧ-спектрів застосовуються різні одиниці вимірювань для позначення смуг поглинання ( $\text{cm}^{-1}$ , мкм, нм). Необхідно використовувати загальноприйняті одиниці вимірювань.

6. Згідно реакції 3.2 (стор. 101) для складів скла II групи при підвищенні температури до  $1150^\circ\text{C}$  кордієрит розкладається на муліт і шпінель. Однак шпінель у складі склокристалічних матеріалів, зокрема КСК-10, не зафіксована жодним з прямих методів досліджень.

7. На стор. 125 наведені параметри виготовлення склокераміки, зокрема тиск пресування на першій стадії – 7,36 МПа, другій – 11,78 МПа, третій – 14,71 МПа. Яким чином контролюється точність тиску пресування (до сотих МПа) і чи буде спостерігатись відчутний вплив на властивості розроблених матеріалів при відхиленні тиску пресування від приведених значень?

8. В розділі 4 (стор. 159–161) приведений опис механізму фазоутворення за допомогою результатів електронної мікроскопії (рис. 4.4 і рис. 4.5). При цьому відсутні результати рентгенофазового аналізу і елементного аналізу кристалічних фаз методом рентгенівської енергодисперсійної спектроскопії в локальних ділянках зразків, що унеможливило б достовірну ідентифікацію кристалічних фаз на електронних мікрофотографіях.

9. В табл. 5.4 приведена порівняльна характеристика вартості комерційних керамічних та склокерамічних бронематеріалів. Яким чином визначалась вартість і які показники враховувались?

10. На рис. А.1 (стор. 223) відсутні підписи позначень на штрих-рентгенограмах дослідних склокристалічних матеріалів.

11. Технічну новизну прийнятих в роботі рішень доцільно підтверджувати патентами України на винахід чи на корисну модель.

Вказані зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертація є актуальною і має високу наукову цінність та

