



ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор НТУ «ХПІ»
Євген СОКОЛ

(підпис)
М.П.

АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2020/2021 роках в рамках реалізації проєкту
із виконання наукових досліджень і розробок
«Композиційні матеріали на основі кераміки для захисту від електромагнітного
випромінювання»

Назва конкурсу: Підтримка досліджень провідних та молодих учених.
Рєєстраційний номер Проєкт: 2020.02/0337.

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок
рєєстраційний номер 2020.02/0337 «Композиційні матеріали на основі кераміки для захисту від
електромагнітного випромінювання».

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» протокол від «16–17» вересня 2020 року № 21.

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Тривалість виконання Проєкту:

Початок – 05.11.2020 рік дата укладання Договору про виконання наукових досліджень і розробок.

Закінчення – 15.12.2021 рік.

Загальна вартість Проєкту: 2 160 480,00 грн.

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік – 533 780,00 грн.

2-й рік – 1 626 700,00 грн.

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту буде залучено 8 виконавців, з них:

доктори наук 2;

кандидати наук 4;

інші працівники 2.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут».

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2 (КОД ЄДРПОУ 02071180)

КВЕД 85.42 (основний); 72.19.

Організація субвиконавець проєкту – відсутня.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту: розробка наукових основ технології електропровідної та сегнетомагнітної композиційної кераміки, яка виготовляється за швидкісним режимом випалу, з ефективною захисною дією від впливу електромагнітного випромінювання.

4.2. Основні завдання Проєкту: здійснити обґрунтований вибір діелектричної матриці та спеціальних добавок для одержання кераміки із захисними властивостями від дії електромагнітного випромінювання; визначити фізико-механічні та електромагнітні властивості діелектричних матриць і добавок, а також композицій на їхній основі з метою визначення найбільш перспективних складів для одержання керамічних матеріалів із захисними властивостями; встановити закономірності зміни фізико-механічних, експлуатаційних і електромагнітних властивостей керамічних композиційних матеріалів залежно від концентрації електропровідних та магнітних добавок, а також від технологічних параметрів їхнього виготовлення; розробити технологію і склади композиційної кераміки з ефективною захисною дією від впливу електромагнітного випромінювання та вивчити її мікроструктуру; відпрацювати технологічні параметри виготовлення та здійснити впровадження композиційної кераміки з полив'яним покриттям в умовах українських підприємств з виготовлення керамічної плитки; провести натурні випробування розроблених керамічних матеріалів в сертифікованій лабораторії електромагнітного сумісництва.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми. Перед матеріалознавцями стоїть завдання по створенню матеріалів, які ефективно захищають біологічні та технічні об'єкти від дії електромагнітного випромінювання в широкому частотному діапазоні і мають мінімальну товщину. Основними недоліками сучасних матеріалів є використання органічних матриць, які можуть виділяти токсичні речовини під час експлуатації; крім того, органічні матриці не забезпечують міцного зчеплення з неорганічними наповнювачами, що є активною складовою матеріалу і забезпечують заданий рівень механічних, магнітних і діелектричних властивостей. Тому для розширення області застосування захисних матеріалів доцільним є використання діелектричної матриці з функціональної кераміки.

- Новизна Проєкту. Перспективним напрямом створення радіопоглинаючих матеріалів є розробка неорганічних оксидних композицій, яким притаманна висока однорідність властивостей. Неорганічні діелектрики є оптимальною базою для створення композиційних матеріалів, оскільки цілеспрямований підбір функціональних наповнювачів, близьких за природою до керамічної матриці, забезпечує комплекс заданих специфічних властивостей. Наукова новизна проєкту, що виконується, полягає в теоретичному обґрунтуванні та експериментальному підтвердженні можливості синтезу за технологією швидкісного режиму випалу композиційної кераміки з захисними властивостями від дії електромагнітного випромінювання.

- Методологія дослідження. Запропоновано новий методологічний підхід до проєктування і розробки композиційних радіопоглинаючих матеріалів, який передбачає визначення раціонального фазового складу матеріалу на основі експериментального визначення комплексу експлуатаційних властивостей. До переліку таких властивостей, окрім традиційних для керамічних виробів міцності і термостійкості, віднесено питомий об'ємний опір, діелектричну та магнітну проникності в області широких частот.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту

Аналіз існуючих матеріалів і покриттів, що захищають від дії електромагнітного випромінювання, показав, що ефективними в цій області є провідники, напівпровідники, феромагнетики та сегнетоелектрики. Однак використання їх в чистому вигляді для захисту приміщень від негативного впливу електромагнітного випромінювання не є доцільним з багатьох причин (масивність, дорожнеча, дефіцитність, складність в експлуатації). Тому перспективним напрямком слід вважати створення композиційних матеріалів шляхом введення в діелектричну керамічну матрицю добавок, що характеризуються електропровідними, сегнетоелектричними або магнітними властивостями.

З використанням фізико-хімічних та термодинамічних розрахунків проведено тріангуляцію систем $RO - Al_2O_3 - Fe_2O_3$, ($RO - CoO, NiO$) та $BaO - SrO - TiO_2$ з урахуванням утворення кристалічних фаз, які мають магнітні та сегнетоелектричні властивості, встановлено положення полів первинної кристалізації фаз та температури евтектик. У побудованих діаграмах з використанням графо-аналітичних розрахунків обрано склади, які мають найнижчу температуру утворення, оптимальне співвідношення фазоутворюючих оксидів. Встановлено, що найбільша кількість фериту кобальту утворюється при кристалізації розплавів системи $CoO - Al_2O_3 - Fe_2O_3$ складу 2С (49,2 % $CoO \cdot Fe_2O_3$), а в системі $NiO - Al_2O_3 - Fe_2O_3$ найбільша кількість фериту нікелю виділяється при кристалізації розплаву складу 2N (42,9 % $NiO \cdot Fe_2O_3$).

Встановлено ймовірність утворення феритів міді, кобальту і цинку в інтервалі температур 1173–1473 К. Виявлено, що зі всіх синтезованих феритів ($CoO \cdot Fe_2O_3, ZnO \cdot Fe_2O_3, CuO \cdot Fe_2O_3$) тільки ферит кобальту має магнітні властивості (максимальне значення магнітної проникності – 252). Іншим феритам ($ZnFe_2O_4, CuFe_2O_4$), синтезованим в аналогічних умовах (температура синтезу 1150 °С, тривалість 8 годин), не притаманні магнітні властивості. Тому, використовуючи ферит кобальту як спеціальну добавку для створення керамічних композиційних матеріалів, можна отримати магнітні покриття, що захищають від дії електромагнітного випромінювання, в яких буде відбуватися ослаблення електромагнітної енергії за рахунок втрат енергії на перемагнічування і втрат на вихрові струми.

Проведено синтез діелектричних матриць та спеціальних добавок та вивчено їх фізико-механічні та електромагнітні властивості. Встановлено, що всі досліджувані діелектричні матриці (керамічна маса та поливи) відносяться до класу діелектриків і мають високі фізико-механічні, експлуатаційні властивості в широкому інтервалі температур, що задовольняє як вимогам ДСТУ Б В.2.7-282:2011, так і вимогам, що пред'являються до діелектричних матриць при створенні електропровідних і магнітних керамічних композиційних матеріалів, що захищають від дії електромагнітного випромінювання.

Розроблено технологію та склади магнітних композиційних покриттів, із захисними властивостями, які наносяться на традиційно вироблену керамічну підкладку, до складу яких входить ферит кобальту в кількості 30 мас. % (температура – 960-980 °С і тривалість – 30 хв випалу). Для отриманих покриттів виявлено підвищення магнітної проникності від 1 до 5,1...5,18 (для покриття з магнітною добавкою) і зниження питомого об'ємного опору від $(4,15...9,2) \cdot 10^8$ до $(1,62...2,04) \cdot 10^6$ Ом·м зі збереженням експлуатаційних властивостей (термостійкість – 150 °С, мікротвердість – 6849...9535 МПа) на рівні стандарту;

Встановлена можливість отримання спеціальної добавки на основі титанатів стронцію та барію з регульованою діелектричною проникністю залежно від хімічного складу композиції та температури і тривалості випалу. Отримані склади характеризуються значеннями діелектричної проникності в межах 35–45.

Встановлено особливості синтезу феритвмісного склокристалічного покриття шляхом попередньої термообробки шихти (800 °С) та подальшого її плавлення ((1250–1300) °С), що забезпечує значення магнітної проникності на рівні ($\mu = 5,19 - 7,28$ ум. од.) та питомого об'ємного опору в межах $(1,5 - 3,4) \cdot 10^4$ Ом·м.

Розроблено склади і технологію композиційних керамічних матеріалів, які за фізико-механічними, експлуатаційними властивостями відповідають ДСТУ Б В.2.7-281:2011 та характеризуються ефективною захисною дією від впливу електромагнітного випромінювання в діапазоні частот 50 Гц-1200 МГц – коефіцієнт екранного загасання дорівнює ~ 20 дБ.

Результати роботи впроваджені на ТОВ «Дніпрокераміка», де випущена дослідно-промислова партія композиційної кераміки, яка пройшла натурні випробування в високовольтному залі НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» для захисту персоналу від дії електромагнітного випромінювання.

За результатами досліджень опубліковано 8 тез на міжнародних конференціях, 4 статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б». Подана стаття до журналу «Journal of Nano and Electronic Physics» (Категорія «А»). На технологію отримання електропровідної композиційної кераміки подано заявку на корисну модель в Україні та подано заявку на видачу патенту Республіки Білорусь на винахід. Перелік публікацій за проектом:

1. Лісачук Г.В., Ведь В.М., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Волощук В.В., Сарай В.В.,

Гребенюк А.П. Розробка керамічної плитки зі збільшеними характеристиками захисту від дії електромагнітного випромінювання. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я MicroCAD-2020* : збірник тези доповідей XXVIII міжнар. наук.-практ. конф., 28-30 жовтня 2020 р.: у 5 ч. Ч. II. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. С. 227.

http://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2020/10/Programma_MicroCad_2020.pdf

2. Майстат М.С., Пітак Я.М., Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Сарай В.В., Гребенюк А.П., Кривобок А.В., Карпутін Б.А. Технологія отримання радіопоглинаючої кераміки на основі титанату барію. *Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів (м. Харків 1-4 грудня 2020 р.) / за ред. проф. Є.І. Сокола. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. С. 364. <http://web.kpi.kharkov.ua/masters/wp-content/uploads/sites/135/2020/11/Program-TPRYS-2020.pdf>

3. Відпрацювання технології електропровідної кераміки / [Г. В. Лісачук, М. В. Ведь, Р. В. Кривобок та ін.]. // Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – 2020. – №6. – С. 12–16.

<https://doi.org/10.20998/2220-4784.2020.06.02>

4. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Сахненко М.Д., Захаров А.В., Волощук В.В., Майстат М.С., Чиркіна М.А., Романова О.О. Вивчення впливу електропровідних добавок на властивості кераміки. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я MicroCAD-2021* : збірник тези доповідей XXIX міжнар. наук.-практ. конф., 18-20 травня 2021 р.: у 5 ч. Ч. II. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. С. 186.

http://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2021/05/Tezi_dopovidey_MicroCAD-2021_chastina_2.pdf

5. Voloshchuk V.V., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Sarai V.V., Grebeniuk A.P., Maistat M.S., Kryvobok A.V. Study of the influence of ferromagnetic additives on composite ceramics / // *Proceedings of Ukrainian Conference with International Participation «Chemistry, Physics and Technology of Surface»* devoted to the 35th anniversary of the Chuiko Institute of Surface Chemistry of NAS of Ukraine and Workshop «Nanostructures and Nanomaterials in Medicine: Challenges, Tasks and Perspectives». Kyiv, 2021. P. 214.

<https://drive.google.com/file/d/1lf2S61f8nSWn9bbhJ5TXPIOCz4iUUX6x/view>

6. Лісачук Г.В., Пітак Я.М., Сахненко М.Д., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Волощук В.В., Майстат М.С., Сарай В.В., Гребенюк А.П., Кривобок А.В. Керамічні композиційні матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання. *Актуальні проблеми хімії, матеріалознавства та екології* : матеріали I Міжнар. наук. конф. (Луцьк, 12-14 травня 2021 р.). Луцьк: Волинський національний університет імені Лесі Українки. 2021. С. 157-158. <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/19844/1/Proceedings%20Conf%20Lutsk-157-158.pdf>

7. Лісачук Г.В., Пітак Я.М., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Майстат М.С., Сарай В.В., Кривобок А.В., Гребенюк А.П. Композиційні керамічні матеріали з високою діелектричною проникністю. *Технологія та застосування вогнетривів і технічної кераміки у промисловості* : збірник тези доповідей Міжнар. наук.-техн. конф., Харків: ДІСА ПЛЮС. 2021. С. 26-28.

https://refractories-journal-ua.com/downloads/tezisy_2021.pdf

8. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Майстат М.С., Сарай В.В., Григоруk В.І., Олійник В.В., Загородній В.В. Вивчення радіопоглинаючих властивостей композиційної кераміки. *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах* : збірник XXI наук.-техн. конф., (м. Чернігів 02-03 вересня 2021 р.). Чернігів: ДНДІ ВС ОВТ Видавць Брагинець О.В.. 2021. С. 180. http://dintem.com.ua/files/zb_rnik_ukr.pdf

9. Influence of the firing temperature on the dielectric properties of ceramics based on barium titanate / [G. Lisachuk, R. Kryvobok, A. Zakharov та ін.]. // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2021. – №5. – С. 10–13. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.242865>

10. Створення електропровідної композиційної кераміки на основі облицювальної плитки з додаванням SiC / Г. В. Лісачук, д-р техн. наук М. Д. Сахненко, д-р техн. наук Я. М. Пітак, Р.В. Кривобок, М.С. Майстат, А.В. Захаров, В.В. Волощук, В.В. Сарай (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна) // *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки* : зб. наук. пр. – 2021. – № 121. – С.

11. Технологія виготовлення радіопоглинаючої кераміки / [Г. В. Лісачук, Р. В. Кривобок, А. В. Захаров та ін.]. // Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів – 2021, № 2. – С. 9-14. doi: 10.20998/2220-4784.2021.02.02

12. Рябініна А.С., Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Майстат М.С., Сарай В.В., Захаров А.В. Технологія виготовлення радіопоглинаючої кераміки. *Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців* : матеріали XV Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів (м. Харків 1-3 грудня 2021 р.) і / за ред. проф. Є.І. Сокола. Харків : НТУ «ХПІ», 2021. С. 380. <http://web.kpi.kharkov.ua/masters/wp-content/uploads/sites/135/2021/12/TPRYS-2021.pdf>

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

Проведений аналіз існуючих матеріалів зданих поглинати електромагнітне випромінювання і виявлені наступні аналоги: піноскло з вуглецевим наповнювачем - ефективність захисту 20 дБ у частотному діапазоні 3-4 ГГц; строк служби 10 років; скло з металізованим покриттям – ефективність захисту 20 дБ у частотному діапазоні 0,1-100 МГц; строк служби 5 років; Краска Тіколак - ефективність захисту 2-4 дБ (один шар) у частотному діапазоні 5-54 ГГц; строк служби 5-10 років; лако-фарбове покриття- ефективність захисту 12-20 дБ у частотному діапазоні 0,15 -1000 МГц ; строк служби 15 років. Розроблена кераміка в рамках проекту – ефективність захисту біля ~ 20 дБ у частотному діапазоні 50 Гц - 67 ГГц ; строк служби до 20 років;

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проекту для економіки та суспільства

Розроблено раціональний склад і технологію виробництва глазурованого (традиційна глазур) електропровідного керамічного композиційного матеріалу з захисними властивостями на основі традиційно застосовуваних сировинних матеріалів і добавки карбиду кремнію у кількості 30 мас. % (температура випалу – 1130 °С, тривалість випалу – 30 хв.). Для одержаних матеріалів виявлено зниження питомого об'ємного опору кераміки від $3,80 \cdot 10^8$ (для кераміки без електропровідних добавок) до $7,3 \cdot 10^5$ Ом·м зі збереженням фізико-механічних властивостей на рівні ДСТУ Б В.2.7-281:2011: межа міцності при згині – 26,2 МПа, водопоглинання – 5,8 %, термостійкість – 250 °С, твердість за Моосом – 7.

Розроблено технологію та склади магнітних композиційних покриттів, із захисними властивостями, які наносяться на традиційно вироблену керамічну підкладку, до складу яких входить ферит кобальту в кількості 30 мас. % (температура – 960-980 °С і тривалість – 30 хв випалу). Для отриманих покриттів виявлено підвищення магнітної проникності від 1 до $5,1 \dots 5,18$ (для покриття з магнітною добавкою) і зниження питомого об'ємного опору від $(4,15 \dots 9,2) \cdot 10^8$ до $(1,62 \dots 2,04) \cdot 10^6$ Ом·м зі збереженням експлуатаційних властивостей (термостійкість – 150 °С, мікротвердість – 6849...9535 МПа) на рівні стандарту;

Встановлено, що для запропонованих композиційних матеріалів зниження дії електромагнітного випромінювання у діапазоні частот 50 Гц – 1200 МГц становить у середньому 20 дБ порівняно з 2,2 дБ для керамічного матеріалу без добавки карбиду кремнію. За розробленою технологією була виготовлена дослідно-промислова партія композиційної кераміки в умовах ТОВ «Дніпрокераміка», яка за своїми фізико-механічними та експлуатаційними властивостями відповідає ДСТУ Б В.2.7-281:2011 і яка пройшла натурні випробування в лабораторії НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» для захисту персоналу від дії електромагнітного випромінювання у частотному діапазоні 50 Гц – 1200 МГц.

Розроблену композиційну кераміку рекомендовано для виробництва нового керамічного матеріалу з високими фізико-механічними, експлуатаційними властивостями та високим ступенем захисту від дії електромагнітного випромінювання, що дозволить поліпшити екологічну безпеку біологічних та технічних об'єктів.

Результати досліджень, отриманих при виконанні Проекту, впроваджені в навчальний процес при підготовці бакалаврів, магістрів та аспірантів за спеціальністю 161 «Хімічна технологія та інженерія».

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Наукові результати проєкту впроваджено в навчальний процес при підготовці бакалаврів, магістрів та аспірантів на кафедрах технологія кераміки, вогнетривів, скла та емалей», загальна та неорганічна хімія та фізична хімія. В результаті виконання завдань проєкту захищені кваліфікаційні роботи бакалаврів: Тимченка О.Р., Масаликіна Р.А. та кваліфікаційні роботи магістрантів: Вабішевіча П.П., Лимаренко Л.С., Рябініної Г.С. та кваліфікаційна робота аспіранта (учасника проєкту) Чефранова Є.В., а також планується захист під безпосереднім керівництвом керівника та виконавців проєкту кваліфікаційної роботи бакалавра Гребенюка О.О. та аспірантів: Сарая В.В. «Радіопоглинаючі керамічні феритвмісні матеріали спеціального призначення», Баглая В.Ю. «Композиційні керамічні матеріали для маскуванню військових об'єктів».

Наукові результати роботи впроваджено в навчальний процес викладачами кафедр технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей, загальна та неорганічна хімія, фізична хімія в рамках курсів «Фізична хімія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів», «Технологія отримання радіопоглинаючої кераміки», «Засоби захисту від електромагнітних перешкод природного та штучного походження», «Матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання» і «Електростійка кераміка».

Результати досліджень, що проведені в роботі «Композиційні матеріали на основі кераміки для захисту від електромагнітного випромінювання», мають практичну значимість при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія».

За результатами виконаної роботи будуть захищені 2 роботи доктора філософії та 1 робота доктора наук.

Примітка: Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування.

Науковий керівник Проєкту

Завідувач науково-дослідної частини НТУ «ХПІ»

(посада)

доктор технічних наук, професор ЛІСАЧУК Георгій Вікторович

(ПІБ)

(підпис)

