

УДК: 623.4

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.81-87>Р.В. Філіпсов<sup>1</sup>, О.І. Аксіментьєва<sup>2</sup>, С.З. Малинич<sup>1</sup>, Р.В. Кузьменко<sup>1</sup><sup>1</sup> Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів<sup>2</sup> Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів

Article history: Received 21 February 2024; Revised 27 February 2024; Accepted 14 March 2024

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДУ КОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ВИСОКОТОЧНОЇ ЗБРОЇ З ЛАЗЕРНИМ НАВЕДЕННЯМ

Розроблено композитні покриття для підвищення захисту озброєння та військової техніки від дії високоточної зброї з лазерним наведенням. З метою оптимізації складу покриттів використані методи математичного моделювання, що дало змогу отримати математичний опис процесів формування композитних покриттів в оптимальній області концентрації компонентів. Отримані математичні моделі були використані для аналізу впливу окремих факторів на експлуатаційні властивості покриттів та покращити їх захисні властивості.

**Ключові слова:** захисні покриття, математичне моделювання, рівняння регресії, поверхня відклику, захисні властивості.

### Вступ

Зниження помітності військової техніки під час руху або пересування для захисту від ударів з повітря є пріоритетним напрямом забезпечення бойової спроможності Збройних Сил України [1]. Для протидії засобам лазерного наведення стрімко розвиваються стелс-технології, які передбачають комплекс засобів зниження помітності озброєння та військової техніки (ОВТ) та інфраструктурних об'єктів у радіолокаційному, інфрачервоному (ІЧ) та інших областях спектра за допомогою використання матеріалів і покриттів, що сильно поглинають електромагнітне випромінювання та істотно зменшують його відбивання [1-3], чим роблять ціль малопомітною для систем з лазерним наведенням.

### Формування мети статті

Розроблено композитні покриття для підвищення захисту озброєння та військової техніки (ОВТ) від дії високоточної зброї з лазерним наведенням. З метою оптимізації складу покриттів використані методи математичного моделювання, що дало змогу отримати математичний опис процесів формування композитних покриттів в оптимальній області концентрації компонентів. Отримані математичні моделі були використані для аналізу впливу окремих факторів на експлуатаційні властивості покриттів та покращення їх захисних властивостей.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

У відомих способах формування поглинаючих електромагнітне випромінювання (ЕМВ) захисних покриттів застосовують технологію створення багат шарових структур, що є досить перспективним для стелс-технологій, особливо в авіаційній техніці [4-6], натомість ускладнює процес нанесення захисних покриттів на поверхню ОВТ. Нами запропоновано [7, 8] використання термореактивних полімерних композицій для отримання захисних покриттів, які мають не тільки антирадарні функції, але й високі механічні та антикорозійні властивості, що поряд із забезпеченням ефективної протидії зброї з лазерним наведенням робить їх привабливими для широкого практичного застосування у військовій техніці як захисних покриттів бойових машин. Очікується, що втрати потужності на відбиття ЕМВ у синтезованих композитах перевищать відомі аналоги [9].

Покращення характеристик захисних покриттів досягається комбінованим включенням магнітного компонента (ферити, магнетит, максени) та електропровідної складової (карбоніві нанотрубки, графени, поліанілін) [10 – 15].

Завдяки синергетичному ефекту, що спостерігається у композиціях при оптимальній концентрації наповнювачів, досягаються бажані експлуатаційні характеристики.

Процес виготовлення антирадарних композитних покриттів включає технологічне формування матеріалу:

змішування компонентів – епоксидної смоли ЕД-20 і наповнювачів (високодисперсний магнетит, поліанілін), нагрівання суміші до 50°C, ультразвукове диспергування, деаерація суміші, введення затверджувача ПЕПА, перемішування, формування полімерної плівки (покриття) на поверхні броньованої сталі, його отвердіння. Попередньо вивчали процеси отримання модифікованих полімерних покриттів різними додатковими компонентами та їх вплив на якість отриманих матеріалів [7 – 9]. Для оптимізації складу покриттів з метою забезпечення їх високих механічних та антикорозійних властивостей нами застосовано методи математичного моделювання.

Технологічний процес формування та подальшої експлуатації композитних покриттів з точки зору моделювання має ряд особливостей, а саме: дискретно-неперервний характер технологічних процесів, недостатній рівень автоматизації, відсутність засобів і методів оперативного контролю показників якості інгредієнтів та модифікованих полімерних покриттів, складність спостереження за параметрами процесу.

Вибір методів ідентифікації математичних моделей визначається, з одного боку, обмеженнями із сировинними та іншими ресурсами на проведення активних багатофакторних експериментів на промисловому обладнанні, з іншого боку, низькою інформативністю пасивних статистичних методів дослідження об'єктів ідентифікації. Крім того, такі технологічні процеси маловивчені, відсутній кількісний опис всього комплексу операцій, які протікають при переробці полімерних композицій, що ускладнює побудову аналітичного математичного опису.

Найбільш ефективними слід вважати статистичні методи активного експерименту. Першим етапом планування багатофакторного активного експерименту

є вибір показників якості, які значною мірою визначають властивості композитного полімерного покриття.

### Викладення основного матеріалу

Шляхом проведення експериментів та визначення фізико-хімічних властивостей покриттів як основні параметри, які визначають якість захисного покриття (при високій поглинаючій та антивідбивній здатності), були вибрані: мікротвердість –  $y_1$  та водопоглинання покриття –  $y_2$ .

Згідно з ортогональним планом другого порядку Бокса-Вілсона [16-18] число експериментальних точок (або дослідів) визначається за формулою

$$N = m_e + m_0 + 2k, \quad (1)$$

де  $m_0$  – число точок повного факторного експерименту;  $m_e$  – число дослідів у центрі плану;  $k$  – число факторів.

У ході досліджень визначили, що найбільш значимими факторами, що найсуттєвіше впливають на захисні властивості сформованих композитних покриттів, є: концентрація магнетиту ( $x_1$ ), концентрація поліаніліну ( $x_2$ ) та концентрація затверджувача в полімерній матриці ( $x_3$ ).

З метою знаходження оптимальної області значень факторів були визначені умови планування експерименту згідно з ортогональним планом другого порядку. Оскільки вміст затверджувача залишався постійним, значення фактора  $x_3$  було фіксованим і факторний експеримент здійснювався з використанням 2-х змінних. У табл. 1 наведено основні рівні та інтервали зміни досліджуваних незалежних величин  $x_1$  (концентрація магнетиту) та  $x_2$  (концентрація поліаніліну) для проведення експерименту.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Фактори та основні рівні факторів	$x_1$ , ваг. %	$x_2$ , ваг. %
Основний рівень	5,0	5,0
Інтервал зміни	5,0	5,0
Верхній рівень	10,0	10,0
Нижній рівень	0	0
Зоряне плече (+ $\alpha$ )	2,243	0
Зоряне плече (- $\alpha$ )	0	2,243

Такий вид планування експерименту можна віднести до центрального композиційного ортогонального плану. Точки на осях композиційного плану другого порядку називаються *зоряними плечима* і розраховуються за методикою [18].

Матриця планування і результати дослідів наведені у табл. 2. При цьому показані закодовані (ненатуральні) значення факторів відповідно до рівня їх варіювання. Параметри оптимізації властивостей  $y_1$  та  $y_2$  відповідають дослідним натуральним значенням

мікротвердості та водопоглинання відповідно. Експериментальне оцінювання показника  $y_1$  здійснювали за відомою методикою з використанням консистометра Хепплера, як описано в [7, 9]. Експериментальне визначення параметра  $y_2$  (водопоглинання) проводили ваговим методом. У табл. 2 також наведені значення  $\hat{y}_1$  та  $\hat{y}_2$  – розраховані за отриманими рівняннями регресії. Для статистичного аналізу рівнянь регресії було поставлено по 2 паралельних досліди у центрі плану.

Таблиця 2

Експериментальні дані для розрахунку коефіцієнтів регресії

№ Точки	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> Y <sub>1</sub>	X <sub>2</sub> Y <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> Y <sub>2</sub>	X <sub>2</sub> Y <sub>1</sub>
1	+	+10	-10	23,2	0,19	-100	100	100	+232	-1,9	+1,9	-232
2	+	-10	-10	9,6	1,12	100	100	100	-96	-11,2	-11,2	-96
3	+	+10	+10	37,2	0,35	100	100	100	+327	+3,5	+3,5	+372
4	+	-10	+10	15,7	0,17	-100	100	100	-157	+1,7	-1,7	+157
5	+	0 (5)	0(5)	68	0,15	25	25	25	0(340)	(0)75	0(0,75)	0(340)
6	+	+α2,243	0(5)	15,6	0,29	11,215	5,031	25	+α34,99	(0)1,45	+α0,65	0(78)
7	+	-α2,243	0(5)	16,2	0,31	-11,215	5,031	25	-α36,33	(0)1,55	-α0,69	0(81)
8	+	0 (5)	+α2,243	23	0,39	11,215	25	5,031	(0)115	+α0,87	0(1,95)	+α51,58
9	+	0 (5)	-α2,243	17,4	0,15	-11,215	25	5,031	(0)87	-α0,33	0(0,75)	-α39,02
10	+	+α2,243	+α2,243	12,8	0,21	5,031	5,031	5,031	+α28,71	+α0,26	+α0,47	+α28,71
				Σ	Σ3	30,031	490,093	490,093				
				Ÿ <sub>1</sub> =	Ÿ <sub>2</sub> =	3,0031	49,0093	49,0093				

Статистичний аналіз отриманих даних проводили за оцінкою однорідності дисперсії вимірювань ( $m=2$ ), яку порівнювали з критерієм Кохрена [18]. Для цього обраховували середнє квадратичне відхилення експериментально отриманого параметра ( $Y_1$  або  $Y_2$ ).

Достатнім є проведення двох паралельних дослідів, тому що для перевірки адекватності рівняння регресії використовують середню дисперсію відтворюваності

$$S_i^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (y_{iu} - \hat{y}_i)^2}{n-1}, \quad (2)$$

де  $n$  – число паралельних дослідів (у нашому випадку воно дорівнює 2),  $y_i$  – середньоарифметичне значення, знайдене за значеннями параметра оптимізації у всіх точках.

Однорідність дисперсій перевіряється за критерієм Кохрена

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^m S_i^2} \leq G_{кр}, \quad (3)$$

Експериментально визначене  $G = 0,2334$ . За довідниковими таблицями, наведеними в роботі [18], знаходимо, що  $G_{0,05(1,10)} = 0,6020$ . Оскільки  $G < G_{кр}$ , то дисперсія  $S_i^2$  є однорідною

$$S_e^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i^2, \quad (4)$$

де  $S_e^2 = 2,6739/10 = 0,26739$  є числом ступенів свободи, що дорівнює

$$f = m(n-1). \quad (5)$$

Після розрахунку середньої дисперсії відтворюваності склали таблицю для розрахунків коефіцієнтів регресії (табл. 2). До неї, крім колонок лінійних ефектів, включаються колонки ефектів взаємодії.

Розрахунок коефіцієнтів регресії та їх дисперсії здійснювали за формулами:

$$b_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i, \quad (6)$$

$$b_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} y_i. \quad (7)$$

Розраховували дисперсію коефіцієнтів регресії за формулою

$$S^2(b_i) = \frac{S_e^2}{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} = \frac{S_e^2}{m}. \quad (8)$$

Далі перевіряли значимість коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента (t-критерій)

$$t_i = \frac{b_j}{S(b)} \leq t_{кр}, \quad (9)$$

величину  $t_{кр}$  у формулі (9) знаходили за табличними даними [18].

Знайдено, що для параметра  $\hat{y}_1$ :  $b_0 = 1,29$ ;  
 $b_1 = 4,26589$ ;  $b_2 = -0,02725$ ;  $b_{12} = 3,0031$ ;  
 $b_{11} = 49,0093$ ;  $b_{22} = 49,0093$ .

Перевірка значимості коефіцієнтів за критерієм Стьюдента дає змогу відкинути незначимий коефіцієнт  $b_2$  і отримати рівняння регресії у вигляді

$$\hat{y}_1 = 1,29 + 4,26589x_1 + 3,0031x_1x_2 + 49,0093x_1^2 + 49,0093x_2^2.$$

Для  $\hat{y}_2$  коефіцієнти регресії будуть:  $b_0 = 0,13$ ;  
 $b_1 = 0,29135$ ;  $b_2 = -0,25888$ ;  $b_{12} = 3,0031$ ;  
 $b_{11} = 49,0093$ ;  $b_{22} = 49,0093$ , тобто всі коефіцієнти регресії виявились значимими. Тоді рівняння регресії буде

$$\hat{y}_1 = 0,13 + 0,29135 x_1 - 0,25888 x_2 + 3,0031 x_1 x_2 + 49,0093 x_1^2 + 49,0093 x_2^2.$$

Оскільки всі нульові члени коваріаційної матриці розміщені на головній діагоналі, то дисперсії коефіцієнтів регресії також рівні і можуть бути вираховані за наступною формулою

$$S(b) = \frac{S_e^2}{m}. \quad (10)$$

За знайденою залишковою дисперсією і дисперсією відтворюваності перевірка адекватності рівнянь регресії розраховували за критерієм Фішера [18]

$$F_{он} = \frac{S_{LP}^2}{S_e^2} \leq F_{кр}. \quad (11)$$

На 0,05% рівні математичного сподівання  $f_1 = 10$ ,  $f_2 = 1$ ; тоді  $F_{табл} = 5$ ,  $F_{пор} = 3,33$ .

Отже, рівняння регресії адекватно описують процес формування якості модифікованих захисних покриттів (табл. 3)

Таблиця 3

Результати перевірки однорідності вибірових дисперсій за критерієм Кохрена та адекватності рівнянь за критерієм Фішера ( $\alpha = 0,05$ )

$y_i$	$S^2$	G	$G_{кр}$	$S_e^2$	$S_{(b)}$	$F_{пор.}$	$F_{табл}$
$Y_1$	2,6739	0,2334	0,6020	0,26739	0,1635	3,33	5,0
$Y_2$	0,031	0,2064	0,6020	0,0031	0,0176	3,32	5,0

Попередній аналіз отриманих рівнянь свідчить, що всі коефіцієнти регресії переважно мають додатний знак. Отже, антикорозійна здатність покриттів зростає при збільшенні концентрації обох компонентів – магнетиту і поліаніліну в полімерної матриці. Однак одночасний вплив цих параметрів на корозійну стійкість до кінця не з'ясовано.

Першим кроком дослідження рівнянь регресії є їх приведення до канонічної форми, тобто перехід до нової системи координат, що описує поверхню відгуку [16–18].

Координати центра поверхні відгуку в старій системі координат вираховуємо з коефіцієнтів із рівнянь регресії та отримуємо наступні значення координат центру поверхні відгуку:

$$x_{c1} = \frac{b_2 b_{12} - 2b_1 b_{22}}{4b_1 b_{22} - b_{12}^2}; \quad (12)$$

$$x_{c2} = \frac{b_1 b_{12} - 2b_2 b_{11}}{4b_1 b_{22} - b_{12}^2}. \quad (13)$$

Обрахунок за формулами (12), (13) дає такі значення:  $x_{1c} = -0,04$ ,  $x_{2c} = -0,0016$  (для  $\hat{y}_1$ ) та  $x_{1c} = -0,0031$ ,  $x_{2c} = -0,0027$  (для  $\hat{y}_2$ ).

Після підстановки значень координат центра поверхні відгуку в рівняння регресії, вираховували значення параметрів  $Y_1$  та  $Y_2$  у центрі поверхні відгуку ( $Y_1 = 1,1977$  та  $Y_2 = 0,1293$ ).

У загальному вигляді канонічна форма рівняння має вигляд

$$\hat{Y}_i - Y_c = B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2, \quad (14)$$

де  $B_{ii}$  – коефіцієнти канонічного рівняння.

Для розрахунку склали характеристичний детермінант і прирівнювали його до нуля

$$\begin{vmatrix} b_{11} - B & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} - B \end{vmatrix} = 0.$$

Звідси формуємо канонічні рівняння другого порядку:

$$\hat{Y}_1 - 1,1977 = 20,03 X_1^2 - 118,02 X_2^2; \quad (15)$$

$$\hat{Y}_2 - 1,1293 = 20,03 X_1^2 - 118,02 X_2^2. \quad (16)$$

Побудова просторового зображення поверхні відгуку, яка відповідає отриманим канонічним рівнянням, наведена на рисунку 1 (а, б).

Як можна бачити з рисунку, поверхня відгуку відноситься до типу “міні-макс”, тобто має області мінімальних (посередині області) та максимальних значень (по краях) параметрів оптимізації.

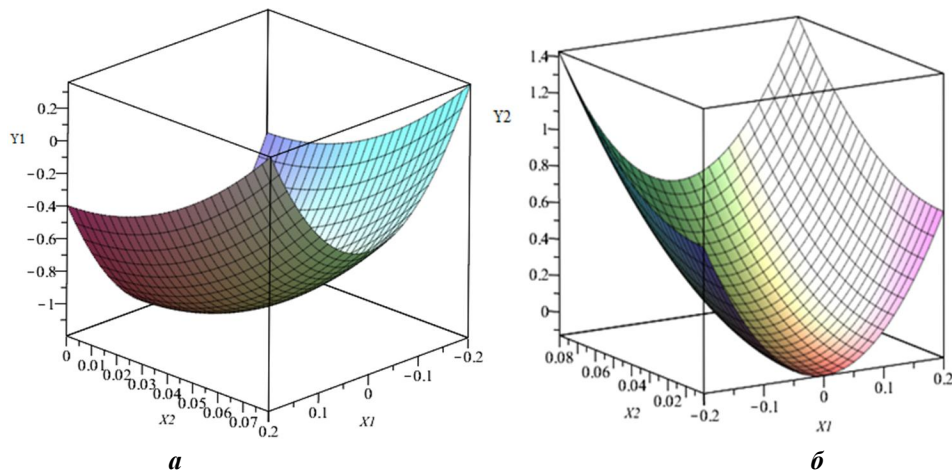


Рис. 1. Просторове зображення поверхні відгуку для параметрів:

(а) –  $Y_1$  – мікротвердість та (б) –  $Y_2$  – водопоглинання

Аналіз вигляду канонічних рівнянь та поверхні відгуку дозволяє дійти висновку, що рух вздовж осі  $X_1$  у напрямку збільшення концентрації магнетиту веде до зростання мікротвердості композитів, а в напрямку  $X_2$  (збільшення вмісту поліаніліну) – до зменшення цього показника. Для канонічного рівняння з водопоглинання, навпаки, ріст концентрації магнетиту буде приводити до зменшення показника водопоглинання, а поліаніліну – до збільшення цього показника. Отже, оптимальні значення концентрації компонентів можуть бути знайдені при вирішенні так званої «компромісної задачі» [19].

Проведені розрахунки дали змогу визначити оптимальні значення концентрації компонентів – магнетиту ( $x_1$ ) та поліаніліну ( $x_2$ ), які забезпечують найкращі експлуатаційні властивості захисних покриттів, становлять 4,95 і 5,18 ваг % відповідно. Результати перевірки властивостей покриттів, отриманих при цьому оптимальному складі, добре узгоджуються з результатами експериментальних спостережень і свідчать про доцільність використання регресивного аналізу для вироблення підходів до формування якості захисних антирадарних покриттів.

### Висновки

Для оптимізації складу композиційних покриттів для підвищення захисту ОБТ, під час руху, від дії високоточної зброї з лазерним наведенням застосовано методи математичного моделювання і статистичного аналізу. Отримані рівняння регресії, які адекватно описують вплив окремих факторів на мікротвердість і водопоглинання композитів. Розраховано канонічні рівняння процесу формування покриттів, на цій основі графічно побудовано поверхню відклику та проаналізовано вплив концентрації магнетиту і поліаніліну на властивості покриттів. Встановлено, що поверхні відклику відповідають типу «міні-макс». Отримані

математичні моделі були використані для аналізу впливу окремих факторів на експлуатаційні властивості покриттів та оптимальне управління процесом.

Запропоновані покриття характеризуються високими механічними, антикорозійними властивостями, низьким водопоглинанням, масло-бензостійкістю, що передбачає можливість їхнього використання для захисту поверхні військової техніки, і забезпечити ефективну протидію від зброї з лазерним наведенням.

У перспективі передбачається удосконалення математичних моделей проходження ІЧ-випромінювання крізь атмосферу та його взаємодію з компонентами середовища композиційного покриття. На цій основі буде проведена оптимізація складу композиційного покриття з метою покращення його здатності до розсіювання ІЧ-випромінювання за рахунок покращення електричних та теплопровідних властивостей композиту.

### Список літератури

1. Оборонні дослідження Національної академії наук України [Електронний ресурс] // НАН України. 2019. Режим доступу до ресурсу: [https://www.nas.gov.ua/text/pdf/News/3\\_presentation\\_12.02.2019\\_Horbulin.pdf](https://www.nas.gov.ua/text/pdf/News/3_presentation_12.02.2019_Horbulin.pdf)
2. Доля Г.Н., Кагунин А.Н. О возможности снижения заметности целей при защите от высокоточного оружия (ВТО) на основе использования дифракционно-отражающих покрытий. *Збірник наукових праць ХВУ*. Харків, 2000. № 2. С. 75–81.
3. Криворучко Я.С., Лерман Л.Б., Шкода Н.Г. Многокомпонентные гетерогенные системы: эффективная диэлектрическая проницаемость и поглощения. *Вісник НТУ ХП*. Харків, 2012. № 66 (972). С. 167–173.
4. Чубукін О.С. Отримання багатоповітряного радіопоглинаючого покриття на основі феритів з використанням генетичного алгоритму оптимізації ефективної поверхні розсіювання електромагнітних хвиль в діапазоні частот 8–12 ГГц. *Системи озброєння і військова техніка*, Київ, 2019. № 2(58). С. 132–142.

5. Jayalakshmi C.G., et al. (2019). Polymer matrix composites as broadband radar absorbing structures for stealth aircrafts. *J. Appl. Polym. Sci.*, 136(14), 47241. <https://doi.org/10.1002/app.47241>

6. Folgueras L.C., Rezende M.C. Research Progress on Nanostructured Radar Absorbing Materials. *Energy and Power Engineering*. 2011. N 3. pp. 580–584. DOI: [10.4236/epe.2011.34072](https://doi.org/10.4236/epe.2011.34072)

7. Aksimentyeva O., Martynyuk G., Horbenko Yu., Malynych S., Filipsonov R. Polymer–magnetite thermosetting composites with protective and antiradar functions. *Physical-chemical mechanics of materials*. 2020. Special Issue N13. P. 137–141.

8. Aksimentyeva O.I., Chepkov I. B., Filipsonov R. V., Malynych S.Z., Gamernyk R. I., Martyniuk G. S., Horbenko Y.Y. Hybrid composites with protective and antiradar functions. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. N 21(4). pp. 764–770. DOI: [10.15330/pess.21.4.764-770](https://doi.org/10.15330/pess.21.4.764-770).

9. Aksimentyeva O., Malynych S., Filipsonov R., Gamernyk R. Broadband Electromagnetic Radiation Absorber Based on Bifunctional Polymer–Magnetite Composite. *Acta Physica Polonica A*. 2022. Vol. 141, No. 4. pp. 356–360. DOI: [10.12693/APhysPolA.141.356](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.141.356)

10. Das K., Mandal A. Microwave Absorbing Properties of DBSA-doped Polyaniline/BaTiO<sub>3</sub>-Ni<sub>0.5</sub>Zn<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposites. *Journal of Materials Science Research*. 2012. Vol. 1(1). pp. 45–53. DOI: [10.5539/jmsr.v1n1p45](https://doi.org/10.5539/jmsr.v1n1p45)

11. Qin F.X., Peng H.X., Pankratov N. Exceptional electromagnetic interference shielding properties of ferromagnetic microwires enabled polymer composites. *Polymer composites*. 2010. No 108. pp. 044510–1–044510–5. DOI: [10.1063/1.3471816](https://doi.org/10.1063/1.3471816)

12. Tavakolinia F., Yousefi M., Afghahi S. Salman, Baghshahi S., Samadi S. Effect of Polyaniline on Magnetic and Microwave Absorption Properties in SrFe<sub>2</sub>O<sub>19</sub>/Zn<sub>0.4</sub>Co<sub>0.2</sub>Ni<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Ferrite Nanocomposites. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. 2020. Vol. 30. pp. 4014–4026. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01547-0>.

13. Патент на винахід № 122747 Україна. Корозійностійке нанокompозитне радіопоглинаюче покриття / Махно С.М., Лісова О. М., Гуня Г.М., та ін.; заявники та патентовласники: Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України; Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України. № a201908403; заявл. 17.07.2019; опубл. 28.12.2020, Бюл. № 24. <https://base.uipv.org/searchINV/search.phpaction=viewdetails&IdClaim=273128>

14. Thomas P., Abdulhakim L.V., Pushkaran N.K., Karuvandi A.C. Wideband Radar Absorbing Structure Using Polyaniline-Graphene Nanocomposite. *Journal of Carbon research*. 2020, Vol. 6, No 72. pp. 1–16.; <https://doi.org/10.3390/c6040072>

15. Wu, B., et al. (2023). Hierarchically flexible polyamide composite films for thermal management and electromagnetic shielding. *ACS Appl. Eng. Mater.*, 1(1), pp. 568–576. <https://doi.org/10.1021/acsaenm.2c00138>

16. Білецький В.С., Смирнов В.О., Сергєєв П.В. Моделювання процесів переробки корисних копалин: Посібник. НТУ «Харківський політехнічний інститут», Львів: «Новий Світ- 2000», 2020. 399 с

17. Луговський В.І, Білоус В.М., Брем В.В. Конспект лекцій з курсу “Моделювання та застосування ЕОМ в хімічній

технології”. Одеса: Одеський національний політехнічний університет, 2003. 101 с.

18. Супрунович С.В., Кормош Ж.О., Сливка Н.Ю. Статистичні та хемометричні методи в хімії. Луцьк: ВНУ імені Лесі Українки, 2022. 210 с.

19. Ковальчук Е.П., Аксиментьєва Е.И. Оптимизация процесса полимеризации акрилонитрила методом неопределенных множителей Ж. Лагранжа. *Прикладна хімія*, 1981. Т. 54. № 2. С. 348-351.

## Reference

1. (2019), "Oboronni doslidzhennia Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy" [Defense research of the National Academy of Sciences of Ukraine]. Electronic resource // NAS of Ukraine. Mode of access to the resource: [https://www.nas.gov.ua/text/pdf/News/3\\_presentation\\_12.02.2019\\_Horbulin.pdf](https://www.nas.gov.ua/text/pdf/News/3_presentation_12.02.2019_Horbulin.pdf) [in Ukrainian]

2. Dolya G.N. and Katunin A.N. (2000), "Vozmozhnosty snyzheniya zametnosti tselei pry zashchite ot vysokotochnoho oruzhyia (VTO) na osnove yspolzovanyia dyfraktsionno-otrazhaiushchykh pokrytyi" [On the possibility of reducing the visibility of targets when protecting against high-precision weapons (VTO) based on the use of diffraction-reflective coatings]. *A collection of scientific works of KhVU*. Kharkiv. No. 2. pp. 75–81. [in Ukrainian]

3. Kryvoruchko Y.S., Lerman L.B. and Shkoda N.G. (2012), "Bahatokomponentni heterohenni systemy: efektyvna dielektrychna pronyknist ta pohlynnannia" [Multicomponent heterogeneous systems: effective dielectric permittivity and absorption]. *Bulletin of NTU KhPI*. Kharkiv. No. 66 (972). pp. 167–173. [in Ukrainian]

4. Chubukin O.S. (2019), "Otrymannia bahatosharovoho radiopohlynaiuchoho pokryttia na osnovi ferytiv z vykorystanniam henetychnoho alhorytmu optymizatsii efektyvnoi poverkhni rozsiuvannia elektromahnitnykh khvyl v diapazoni chastot 8–12 HHts" [Obtaining a multi-layered radio-absorbing coating based on ferrites using a genetic algorithm for optimizing the effective scattering surface of electromagnetic waves in the frequency range of 8–12 GHz]. *Weapons systems and military equipment*, Kyiv., No. 2(58). pp. 132–142. [in Ukrainian]

5. Jayalakshmi C.G. and etc. (2019), Polymer matrix composites as broadband radar absorbing structures for stealth aircrafts. *J. Appl. Polym. Sci.*, 136(14), 47241. <https://doi.org/10.1002/app.47241>

6. Folgueras L.C. and Rezende M.C. (2011), Research Progress on Nanostructured Radar Absorbing Materials. *Energy and Power Engineering*. N 3. P. 580–584. DOI: [10.4236/epe.2011.34072](https://doi.org/10.4236/epe.2011.34072)

7. Aksimentyeva O., Martynyuk G., Horbenko Yu., Malynych S. and Filipsonov R. (2020), Polymer–magnetite thermosetting composites with protective and antiradar functions. *Physical-chemical mechanics of materials*. Special Issue N13. pp. 137–141.

8. Aksimentyeva O.I., Chepkov I.B., Filipsonov R.V., Malynych S.Z., Gamernyk R.I., Martyniuk G.S. and Horbenko Y.Y. (2020), Hybrid composites with protective and antiradar functions. *Physics and Chemistry of Solid State*. N 21(4). pp. 764–770. DOI: [10.15330/pess.21.4.764-770](https://doi.org/10.15330/pess.21.4.764-770)

9. Aksimentyeva O., Malynych S., Filipsonov R. and Gamernyk R. (2022), Broadband Electromagnetic Radiation

Absorber Based on Bifunctional Polymer–Magnetite Composite. *Acta Physica Polonica A*. Vol. 141, No. 4. pp. 356–360. DOI: 10.12693/APhysPolA.141.356

10. Das K. and Mandal A. (2012), Microwave Absorbing Properties of DBSA-doped Polyaniline/BaTiO<sub>3</sub>-Ni<sub>0.5</sub>Zn<sub>0.5</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposites. *Journal of Materials Science Research*. Vol. 1(1). pp. 45–53. DOI: [10.5539/jmsr.v1n1p45](https://doi.org/10.5539/jmsr.v1n1p45)

11. Qin F.X., Peng H.X. and Pankratov N. (2010), Exceptional electromagnetic interference shielding properties of ferromagnetic microwires enabled polymer composites. *Polymer composites*. No 108. pp. 044510–1–044510–5. DOI: [10.1063/1.3471816](https://doi.org/10.1063/1.3471816)

12. Tavakolinia F., Yousefi M., Afghahi S. Salman, Baghshahi S. and Samadi S. (2020), Effect of Polyaniline on Magnetic and Microwave Absorption Properties in SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>/Zn<sub>0.4</sub>Co<sub>0.2</sub>Ni<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Ferrite Nanocomposites. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. Vol. 30. pp. 4014–4026. <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01547-0>

13. Patent of Ukraine (2020), Makhno S.M., Lisova O.M., Gunya H.M. and etc. "Patent na vynakhid № 122747 Ukraina. Koroziihostiike nanokompozytne radiopohlynaiuche pokryttia" [Patent for the invention No. 122747 Ukraine. Corrosion-resistant nanocomposite radio-absorbing coating]: applicants and patent owners: Institute of surface chemistry named after O.O. Chuyka of the National Academy of Sciences of Ukraine; Institute of Chemistry of High Molecular Weight Compounds of the National Academy of Sciences of Ukraine. No. a201908403; statement 17.07.2019; published 28.12.2020, Bul. No. 24. [in Ukrainian] <https://base.uipv.org/searchINV/search.phpaction=viewdetails&IdClaim=273128>

14. Thomas P., Abdulhakim L.V., Pushkaran N.K. and Karuvandi A.C. (2020), Wideband Radar Absorbing Structure Using Polyaniline-Graphene Nanocomposite. *Journal of Carbon research*. Vol. 6, No 72. pp. 1–16. <https://doi.org/10.3390/c6040072>

15. Wu B. and etc. (2023), Hierarchically flexible polyamide composite films for thermal management and electromagnetic shielding. *ACS Appl. Eng. Mater.*, 1(1), pp. 568–576. <https://doi.org/10.1021/acsaenm.2c00138>

16. Biletsky V.S., Smirnov V.O. and Sergeev P.V. (2020), "Modeliuvannia protsesiv pererobky korysnykh kopalyn" [Modeling of mineral processing processes]: Manual. NTU Kharkiv Polytechnic Institute, Lviv: Novy Svit-2000. 399 p. [in Ukrainian]

17. Luhovsky V.I., Bilous V.M. and Brem V.V. (2003), "Konspekt leksii z kursu "Modeliuvannia ta zastosuvannia EOM v khimichnii tekhnologii" [Synopsis of lectures from the course "Computer modeling and application in chemical technology"]. Odesa: Odesa National Polytechnic University. 101 p. [in Ukrainian]

18. Suprunovych S.V., Kormosh Zch.O., Slyvka N.Yu. (2022), "Statystychni ta khemometrychni metody v khimii" [Statistical and chemometrycal methods in the chemistry]. Lutsk: Lesya Ukrainka Volyn National University. 210 p. [in Ukrainian]

19. Kovalchuk E.P. and Aksyumentyeva E.I. (1981), "Optymyzatsiia protsesa polymeryzatsyy akrylonitryla metodom neopredelennykh mnozhytelei Zh. Lahranzha" [Optimizing the process of polymerization of acrylonitrile by the method of indefinite Lagrange multipliers]. *J. of Applied Chemistry*. T. 54. No. 2. pp. 348-351. [in Ukrainian]

## APPLICATIONS OF MATHEMATICAL MODELING METHODS FOR OPTIMIZING THE CONTENTS OF COMPOSITE COATINGS FOR THE PROTECTION AGAINST HIGH PRECISION LASER-GUIDED WEAPONS

R. Filipsonov, O. Aksimentyeva, S. Malynych, R. Kuzmenko

*The priority direction of ensuring the combat capability of the Armed Forces of Ukraine is to reduce the visibility of military equipment during its movement or movement to protect against air strikes. Stealth technologies are rapidly being developed to counter laser targeting devices, which include a complex of means of reducing the visibility of air defense systems and infrastructure objects in the radar, infrared and other areas of the spectrum by using materials and coatings that strongly absorb electromagnetic radiation, radiation and significantly reduce its reflection, making the target inconspicuous for laser targeting.*

*A composite coating has been developed to enhance the protection of military equipment from the action of high-precision weapons. By optimizing the composition of coatings, used mathematical modeling methods, which made it possible to obtain a mathematical description of the processes of forming composite coatings in the optimal range of concentration of components. By conducting experiments and determining the physico-chemical properties of the coatings, the following parameters were selected as the main parameters that determine the quality of the protective coating (with high absorption and anti-reflective capacity): microhardness -and water absorption of the coating. Mathematical models were developed to analyze the influence of other factors on the exploitation properties of coatings and improve their protection properties.*

*Regression equations that adequately describe the influence of individual factors on the microhardness and water absorption of composites have been obtained. The canonical equations of the coating formation process were calculated, the response surface was graphically constructed on this basis, and the effect of the concentration of magnetite and polyaniline on the properties of the coatings was analyzed. It is established that the response surfaces correspond to the "mini-max" type. The resulting mathematical models were used to analyze the influence of individual factors on the performance of coating properties and optimal process management.*

**Keywords:** protective coating, mathematical modeling, regression equation, response surface, protective properties.