

В.О. Скирденко, аспір.

О.В. Акімов, ст. викл.

*Херсонська державна морська академія*

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБРОБКИ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

*(Представлено д.т.н., проф. Букетовим А.В.)*

*Досліджено вплив змінних факторів: напруженості магнітного поля, часу обробки композиції або наповнювача у індукторі установки та частоти високочастотної магнітної обробки на адгезійну міцність матеріалів. Отримано рівняння регресії, що адекватно описує технологію високочастотної магнітної обробки епоксикомпозитів, наповнених феромагнітним залізним суриком. Доведено домінуючий вплив часу обробки композицій у індукторі установки порівняно з іншими вхідними параметрами. Геометричну інтерпретацію отриманого рівняння регресії можна використати як номограму для прогнозування адгезійної міцності модифікованих високочастотним магнітним полем епоксикомпозитів, наповнених залізним суриком.*

**Ключові слова:** епоксидні композити, експеримент, оптимізація, високочастотна електромагнітна обробка, математичне планування, адгезійна міцність.

**Постановка проблеми.** Область застосування епоксикомпозитів, що використовуються в різних галузях морського транспорту, промисловості і сільського господарства, постійно розширюється. В основному епоксидні композитні матеріали (ЕКМ) використовують у вигляді покриттів, що забезпечують як зносостійкість технологічного устаткування, так і його антикорозійні властивості. При цьому характеристики ЕКМ можливо змінювати введенням до їх складу різноманітних наповнювачів, модифікаторів, пластифікаторів та інших складових. Введення наповнювача за критичного вмісту призводить до зміни як фізико-механічних, так і теплофізичних та електротехнічних характеристик композитів. Слід зазначити, що застосування наповнювачів різної фізичної природи і дисперсності залежить від кінцевої мети використання того чи іншого покриття. Іноді для досягнення необхідної мети доцільно використовувати не тільки одношарові, але й багатшарові епоксикомпозитні покриття. Однак на сьогодні питання формування епоксикомпозитних матеріалів з наперед заданими і прогнозованими властивостями під впливом енергетичних полів ще не достатньо досліджено. Тому актуальним завданням сучасного матеріалознавства є проведення випробувань з метою визначення впливу енергетичних полів, у тому числі й високочастотного електромагнітного, на властивості епоксидних композитів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведені дослідження, результати яких описано у працях [1–3], вказують на суттєве підвищення характеристик епоксикомпозитів після їх попереднього модифікування (на стадії формування) електромагнітним та електростатичним полями, ультрафіолетовим та радіаційним опроміненням. Водночас використання у вигляді наповнювачів нових матеріалів для створення ЕКМ з необхідним комплексом властивостей потребує детального аналізу процесів їх формування, у тому числі й під впливом енергетичних полів. На початкових етапах необхідно оптимізувати режими обробки композицій до введення твердника енергетичним полями. При цьому попередньо доцільно вибрати саме ті змінні фактори енергетично впливу, які мають домінуюче значення на вихідний параметр. Зокрема, при використанні магнітної обробки, як енергетичного впливу на епоксидні композиції, доцільно у зв'язувач вводити феромагнітний наповнювач [1]. Виходячи з цього, у роботі застосовували електромагнітну обробку епоксидних композицій, наповнених феромагнетиком залізним суриком за вмісту 50 мас. ч. на 100 мас. ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Важливим на даному етапі експериментальних досліджень було встановити оптимальні режими такої обробки для отримання ЕКМ з поліпшеними властивостями.

**Мета роботи** – оптимізувати режими високочастотної електромагнітної обробки епоксидних композицій методом математичного планування експерименту для отримання матеріалів з поліпшеними властивостями.

**Методика проведення експерименту.** Попередньо експериментально визначали допоміжні вхідні параметри дослідження. Для цього використовували методи рангової кореляції [4]. Експертам, добре знайомим з технологією використання енергетичних полів для покращення експлуатаційних характеристик ЕКМ, пропонували розмістити змінні фактори у напрямку зменшення ступеня їх впливу на зміну стану системи і, як наслідок, поліпшення властивостей матеріалів. У нашому випадку параметром оптимізації вибрано адгезійну міцність ЕКМ. Тобто проводили ранжування факторів.

Наприклад, фактору  $Z_4$  присвоювали друге місце (ранг 2), фактору  $Z_2$  – перше місце (ранг 1) і так далі. В процесі ранжування фактори можна добавляти або відкидати, а деякі фактори можуть не мати кількісної оцінки [4]. Після збору інформації формували загальну таблицю, де елементом матриці є  $a_{ij}$  – ранг кожного  $j$ -го фактора,  $i$ -го спеціаліста.

Збіг думок експертів з кожного фактора оцінювали коефіцієнтом узгодження  $W$  (або коефіцієнтом конкордації), який може змінюватися від 0 до 1. Якщо  $W = 0$ , то збіг відсутній, а коли  $W = 1$ , тоді можна стверджувати про їх повну згоду в оцінці факторів, що піддаються ранжуванню.

Коефіцієнт конкордації, що відображає узгодженість думок експертів, визначали за формулою:

$$W = 12 \frac{Sd^2}{m^2(n^3 - n)}, \quad (1)$$

де  $Sd^2 = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m a_{ij} - a \right)^2$  – сума квадратів відхилень рангів від загального середнього;  $m$  – кількість експертів;  $n$  – кількість факторів ранжування;  $a = 0,5m(n + 1)$  – середнє значення за рядками усієї таблиці.

Очевидно, що при повному збігові думок спеціалістів:  $Sd^2 \rightarrow \max$ .

Якщо величина  $m(n - 1)W$  має  $\chi^2$ -розподіл, тоді  $\chi_p^2$  – розрахункове значення, що визначається за формулою:

$$\chi_p^2 = m(n - 1)W \quad (2)$$

Ця величина для кількості ступенів вільності  $f = n - 1$  при заданому рівні вірогідності  $q$  (для нашого дослідження приймали  $q = 0,05$ ) повинна перевищувати  $\chi_f^2$  (табличне значення).

**Обговорення експериментальних результатів.** Експертам у кількості 5 осіб, які виявили бажання провести ранжування змінних факторів, що суттєво впливають на структуру і властивості епоксиполімерних покриттів, модифікованих високочастотним магнітним полем, було запропоновано 5 факторів:

1. Частота електромагнітної обробки ( $Z_1$ ).
2. Час витримки композиції в індукторі установки при її високочастотній магнітній обробці ( $Z_2$ ).
3. Температура попереднього нагрівання епоксидної матриці без наповнювача ( $Z_3$ ).
4. Напруженість високочастотного магнітного поля ( $Z_4$ ).
5. Час витримки композиції після високочастотної магнітної обробки ( $Z_5$ ).

Слід зауважити, що напруженість ( $H$ ) високочастотного магнітного поля, створюваного у індукторі установки, можна вимірювати за допомогою витка зв'язку. Це дозволяє виміряти наведену у витку зв'язку напругу  $U$ , яка прямо пропорційна напруженості поля  $H$ . Отже, у деяких випадках доцільно використати безпосередньо виміряну величину напруги  $U$  для характеристики напруженості  $H$  у індукторі установки для високочастотної магнітної обробки (ВЧМО) композицій.

Після отримання результатів було побудовано узагальнену таблицю результатів ранжування змінних факторів (табл. 1)

Коефіцієнт конкордації становить:

$$W = 12 \frac{230}{5^2(5^3 - 5)} = 0,91 \quad (3)$$

Тоді

$$\chi_p^2 = 5(5 - 1) \cdot 0,91 = 18,24 \quad (4)$$

Таблиця 1

## Результати ранжування факторів

Експерт	Умовне позначення фактора, $a_{ij}$				
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_0$	$Z_4$	$Z_5$
1	3	5	2	4	1
2	3	5	2	4	1
3	3	5	1	4	2
4	3	4	1	5	2
5	3	5	1	4	2
$\sum_i a_i$	15	24	7	21	8
$d_j$	0	9	-8	6	-7

$d_j^2$	0	81	64	36	49
$\sum_{j=1}^5 d_j^2$	230				

Користуючись [4], знаходили табличне значення  $\chi_T^2$ -критерію:  $\chi_T^2 = 9,488$  (при ступені вільності  $f = n - 1 = 5 - 1 = 4$  і рівні достовірності  $q = 0,05$ ). Із проведених розрахунків видно, що  $\chi_P^2$  майже у два рази більший за табличне значення  $\chi_T^2$ . Отже встановлено, що думки експертів, які оцінювали значущість змінних факторів і їх вплив на параметр оптимізації (адгезійна міцність) ЕКМ в процесі ВЧМО композицій, наповнених феромагнітними частками, повністю співпадають. На основі зведеної таблиці (табл. 1) побудовано середню апріорну діаграму рангів для факторів ранжування.

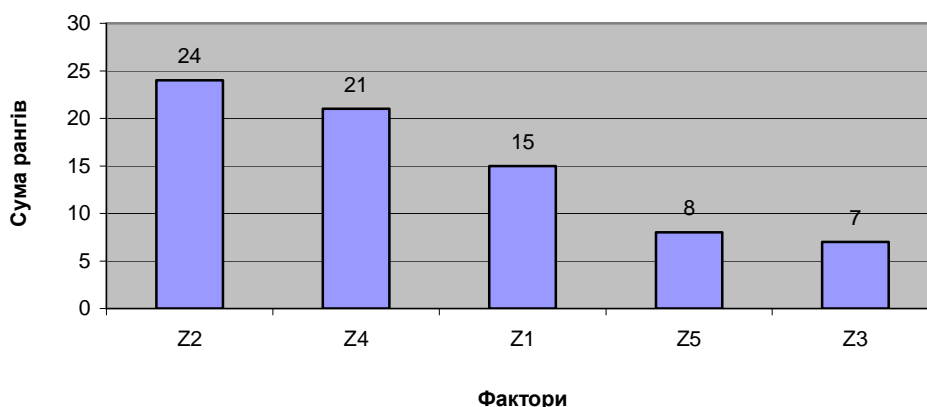


Рис. 1. Середня апріорна діаграма рангів при аналізі змінних факторів процесу ВЧМО епоксидних композицій, наповнених феромагнітними частками

Внаслідок нерівномірності суми рангів (рис. 1) прийнято рішення про введення у план основного експерименту лише трьох факторів:

- час витримки композиції в індукторі установки для її високочастотної магнітної обробки ( $Z_2$ );
- напруженість високочастотного магнітного поля ( $Z_4$ );
- частота магнітного поля ( $Z_1$ ).

Основний експеримент проводили з використанням ортогонального центрального композиційного плану (ОЦКП) другого порядку для  $k = 3$ . Для подальших розрахунків та умовних записів введемо позначення факторів та область їх визначення. Зокрема:

$X_1$  – кодоване значення частоти ВЧМО, МГц;

$X_2$  – кодоване значення напруженості високочастотного магнітного поля (ототожнювали з вимірною величиною напруги  $U$ ), В;

$X_3$  – кодоване значення часу витримки композиції в індукторі установки для ВЧМО, с.

Розширена матриця планування факторного експерименту та його результати наведено у таблицях 2 і 3.

Таблиця 2

Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах

Рівень факторів	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Зіркова точка (нижня): $X_i = -1,215$	0,78	3,35	8,23
Нижній рівень $X_i = -1$	1	4	10
Нульовий рівень $X_i = 0$	2,25	7	35
Верхній рівень $X_i = +1$	3,5	10	60
Зіркова точка (верхня): $X_i = +1,215$	4,25	10,64	73

Таблиця 3

## Матриця планування експерименту та результати дослідів за планом другого порядку

Дослід	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\dot{X}_1^2$ -11/15	$\dot{X}_2^2$ -11/15	$\dot{X}_3^2$ -11/15	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	$\bar{Y}_{сер}$ , МПа
1	-1	-1	-1	4/15	4/15	4/15	+1	+1	+1	46,82
2	+1	-1	-1	4/15	4/15	4/15	-1	-1	+1	37,91
3	-1	+1	-1	4/15	4/15	4/15	-1	+1	-1	40,42
4	+1	+1	-1	4/15	4/15	4/15	+1	-1	-1	44,15
5	-1	-1	+1	4/15	4/15	4/15	+1	-1	-1	37,26
6	+1	-1	+1	4/15	4/15	4/15	-1	+1	-1	46,45
7	-1	+1	+1	4/15	4/15	4/15	-1	-1	+1	56,91
8	+1	+1	+1	4/15	4/15	4/15	+1	+1	+1	49,14
9	-1,215	0	0	23/30	-11/15	-11/15	0	0	0	46,37
10	+1,215	0	0	23/30	-11/15	-11/15	0	0	0	50,06
11	0	-1,215	0	-11/15	23/30	-11/15	0	0	0	46,34
12	0	+1,215	0	-11/15	23/30	-11/15	0	0	0	45,08
13	0	0	-1,215	-11/15	-11/15	23/30	0	0	0	46,01
14	0	0	+1,215	-11/15	-11/15	23/30	0	0	0	58,85
15	0	0	0	-11/15	-11/15	-11/15	0	0	0	45,41

Подальші розрахунки ОЦКП другого порядку виконували відповідно до алгоритму, використовуючи розрахункові формули, що наведені у таблиці 4.

Таблиця 4  
Алгоритм дій та формули для розрахунків за ОЦКП другого порядку [4]

№ з/п	Розрахункова формула	Позначення
1	2	3
1	$y = \sum_i b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_i b_{ii} x_i^2$	$i = 0, 1, 2, \dots, n$
2	$B = (X^T X)^{-1} X^T Y; b_0 = \sum_{u=1}^N y_u / N$	Сума $u = 1 \dots N$
3	Дисперсії приймаються однорідними за розрахунками повного факторного експерименту	
4	$s_0^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{k=1}^{N_0} (y_{0k} - \bar{y}_0)^2$	$N_0$ – кількість дослідів у центрі плану; $s_0^2$ – помилка дослідів
Закінчення табл. 4		
1	2	3
5	$s_{b_0}^2 = \frac{s_0^2}{N}; s_{b_i}^2 = \frac{s_0^2}{\sum x_{iu}^2}; s_{b_{ij}}^2 = \frac{s_0^2}{\sum (x_{iu} x_{ju})^2}; s_{b_{ii}}^2 = \frac{s_0^2}{\sum (x_{iu})^2};$ $t_{i_p} = \frac{ b_i }{s_{b_i}}; t_{ij_p} =  b_{ij}  / s_{b_{ij}}; t_{ii_p} = b_{ij} / s_{b_{ij}}$	$s_{b_0}^2, s_{b_i}^2, s_{b_{ij}}^2, s_{b_{ii}}^2$ – дисперсії коефіцієнтів регресії; $t_{i_p}, t_{ij_p}, t_{ii_p}$ – розрахункові значення критерію Стюдента
5	Перевірка умови значущості коефіцієнтів: $t_{i_p}, t_{ij_p}, t_{ii_p} > t_{ii}(q, f)$	$t_{ii}(q, f)$ – табличне значення критерію Стюдента для рівня значущості $q$ та ступеня вільності $f$
6	$s_{ad}^2 = \frac{1}{N - l} \sum_{u=1}^N (y_u - \bar{y}_u)^2; F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_0^2}$	$l$ – кількість членів у рівнянні, що залишилися; $s_{ad}^2$ – дисперсія адекватності; $F_p$ – розрахункове значення критерію Фішера
7	Перевірка умови адекватності: $F_p < F_t(q, f_{ad}, f_0)$	$F_t$ – табличне значення

	критерію Фішера
--	-----------------

Відповідно до алгоритму, наведеного вище, розраховували коефіцієнти рівняння регресії. В результаті отримали рівняння регресії:

$$y = 46,02 + 0,55X_1 + 2,42X_2 + 7,5X_3 + 0,61X_1X_2 + 0,44X_1X_3 + 7,72X_2X_3 - 1,78X_1^2 + 3,47X_2^2 + 1,17X_3^2. \quad (5)$$

Для перевірки адекватності моделі визначали дисперсію дослідів, використовуючи формулу:

$$s_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum \left( y_{ij} - \bar{y} \right)^2. \quad (6)$$

Як приклад, наведено розрахунок значення  $s_1^2$ :

$$s_1^2 = \frac{1}{5-1} [(47,74 - 46,82)^2 + (53,06 - 46,82)^2 + (53,06 - 46,82)^2 + (42,85 - 46,82)^2 + (37,71 - 46,82)^2] = 43,36. \quad (7)$$

Аналогічно проводили розрахунки дисперсії для інших дослідів:

$$s_2^2 = 4,8; s_3^2 = 51,0; s_4^2 = 0,5; s_5^2 = 15,2; s_6^2 = 68,3; s_7^2 = 0,1; s_8^2 = 1,2; s_9^2 = 5,7; s_{10}^2 = 34,5; s_{11}^2 = 48,4; s_{12}^2 = 2,1; s_{13}^2 = 8,2; s_{14}^2 = 4,1; s_{15}^2 = 35,7 \quad (8)$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена. Розрахункове значення критерію Кохрена:

$$G_P = \frac{S_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = \frac{68,29}{288,21} = 0,236. \quad (9)$$

Табличне значення критерію Кохрена для прийнятого рівня значущості ( $q = 0,05$ ) і кількості ступенів вільності ( $f_1 = 4, f_2 = 15$ ) становить  $G_T = 0,24$  [4].

Дисперсію відтворювання  $S_y^2$  розраховували за формулою:

$$S_y^2 = \frac{1}{15} \sum_{j=1}^{15} S_j^2 = \frac{228,21}{15} = 19,21. \quad (10)$$

Кількість ступенів вільності  $f_y$  дисперсії визначали як:

$$f_y = N(k-1) = 15(5-1) = 60. \quad (11)$$

Для перевірки значущості коефіцієнтів регресії попередньо оцінювали їх дисперсії.

$$S_{b_0}^2 = \frac{s_4^2}{kN} = \frac{19,21}{5 \cdot 15} = 0,25; S_{b_0} = 0,5; \\ S_{b_1}^2 = \frac{s_4^2}{k \cdot \sum_{j=1}^n x_1^2 N} = \frac{19,21}{5 \cdot 10,95} = 0,35; S_{b_1} = 0,59; \quad (12)$$

$$S_{b_2}^2 = S_{b_3}^2 = 0,35; S_{b_2} = S_{b_3} = 0,59;$$

$$S_{b_{12}}^2 = S_{b_{13}}^2 = S_{b_{23}}^2 = 0,48; S_{b_{12}} = S_{b_{13}} = S_{b_{23}} = 0,69;$$

$$S_{b_{11}}^2 = S_{b_{22}}^2 = S_{b_{33}}^2 = 0,88; S_{b_{11}} = S_{b_{22}} = S_{b_{33}} = 0,94.$$

Перевірку значущості коефіцієнтів рівняння регресії проводили відповідно до алгоритму розрахунків ОЦКП, використовуючи формулу середнього квадратичного відхилення коефіцієнтів регресійного рівняння:

$$t_{p_0} = \frac{|b_0|}{s_{b_0}} = \frac{46,02}{0,5} = 92,04; t_{p_1} = 0,93; t_{p_2} = 4,10; t_{p_3} = 12,71; t_{p_{12}} = 0,88; \\ t_{p_{13}} = 0,63; t_{p_{23}} = 11,19; t_{p_{11}} = 1,91; t_{p_{22}} = 3,73; t_{p_{33}} = 1,25 \quad (13)$$

Розрахункову величину  $t_p$  для усіх лінійних і парних коефіцієнтів регресії порівнювали з табличним значенням критерію Стьюдента ( $t_{таб}$ ) для рівня значущості  $q = 0,05$  та кількості ступенів вільності  $f_y = N(k-1) = 15(5-1) = 60$ . Відповідно до [4] визначали табличне значення критерію Стьюдента:  $t_{таб} = 2$ .

Проводячи перевірку необхідної умови –  $t_p \leq t_{таб}$ , вважали, що незначними коефіцієнтами отриманого рівняння регресії є:  $b_1, b_{11}, b_{12}, b_{13}$  та  $b_{33}$ .

Остаточне рівняння регресії має наступний вигляд:

$$y = 46,02 + 2,42X_2 + 7,5X_3 + 7,72X_2X_3 + 3,47X_2^2. \quad (14)$$

Використовуючи матрицю планування ОЦКП і враховуючи відповідні значення перетворення квадратних членів, отримаємо:

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 &= 46,02 - 2,42 - 7,5 + 7,72 + 3,47 = 47,29; \hat{y}_2 = 31,85; \\ \hat{y}_3 &= \hat{y}_4 = 36,69; \hat{y}_5 = 42,85; \hat{y}_6 = 46,85; \hat{y}_7 = \hat{y}_8 = 57,13; \\ \hat{y}_9 &= \hat{y}_{10} = \hat{y}_{15} = 46,02; \hat{y}_{11} = 48,20; \hat{y}_{12} = 17,08; \hat{y}_{13} = 46,90; \hat{y}_{14} = 55,13 \end{aligned} \quad (15)$$

Надалі усі необхідні розрахунки зводили до таблиці 5.

Таблиця 5  
Результати розрахунків для визначення дисперсії адекватності

$\hat{y}$	$\bar{y}$	$\bar{y} - \hat{y}$	$(\bar{y} - \hat{y})^2$	$\sum (\bar{y} - \hat{y})^2$
47,29	46,82	46,82 - 47,29	0,22	196,34
31,85	37,91	37,91 - 31,85	36,72	
36,69	40,42	40,42 - 36,69	13,90	
36,69	44,15	44,69 - 44,15	0,29	
42,85	37,26	37,26 - 42,85	3,24	
46,85	46,45	46,85 - 46,45	0,16	
57,13	56,91	57,13 - 56,91	0,05	
57,13	49,14	57,13 - 49,14	63,84	
46,02	46,37	46,37 - 46,02	0,12	
46,02	50,06	50,06 - 46,02	16,32	
48,20	46,34	48,20 - 46,34	3,45	
17,08	45,08	17,08 - 45,08	4,00	
46,90	46,01	46,09 - 46,01	0,0064	
55,13	58,85	58,85 - 55,13	13,83	
46,02	45,41	46,02 - 45,41	0,37	

$$S_{aq}^2 = \frac{1}{N - P} \sum_{i=1}^{15} (y - \hat{y})^2 = \frac{1}{15 - 5} \cdot 196,34 = 19,63. \quad (16)$$

Перевірку адекватності рівняння регресії проводили за критерієм Фішера:

$$F_p = \frac{S_{aq}^2}{S_y^2} = \frac{19,63}{19,21} = 1,022. \quad (17)$$

Визначимо  $F_T$  – табличне значення критерію Фішера. За умови, що  $f_{Tq} = N - P = 15 - 5 = 10$  і  $f_y = 60$ , а також, використовуючи [4], прийняли:  $F_T = 1,8$ .

Порівнюючи  $F_T$  з величиною  $F_p$  ( $1,8 > 1,022$ ), вважали, що отримане рівняння регресії адекватне до результатів експериментальних досліджень.

Адекватна математична модель, визначена в результаті обробки даних експерименту, має вигляд поліному другого ступеня. Доцільно при цьому виконати перехід від абстрактного математичного визначення на рівень, який буде більш доцільним для практичного використання. Тобто, необхідно перетворити модель, виконавши її інтерпретацію.

Спочатку необхідно встановити, якою мірою кожний із вибраних змінних факторів впливає на вихідну величину – адгезійну міцність ЕКМ, наповненого частками залізного сурику. Відомо [4], що величина коефіцієнта регресії – кількісна величина ступеня впливу фактора на вихідну величину. При цьому характер впливу того чи іншого фактора визначається знаком коефіцієнта. Зокрема, знак «+» вказує на те, що зі збільшенням абсолютного значення фактору зростає і значення вихідної величини, а знак «-» – на зниження показників вихідного параметру.

З наведених вище експериментальних результатів можна зробити висновок, що найбільший вплив на адгезійну міцність ЕКМ має час витримки композиції в індукторі установки для ВЧМО ( $X_3$ ), а також напруженість високочастотного магнітного поля ( $X_2$ ). Щодо величини частоти обробки, то вона в досліджуваному діапазоні істотно не впливає на вихідний параметр, позаяк коефіцієнт при  $X_1$  виявився незначним. Аналогічні висновки можна зробити і відносно парних взаємодій факторів, однак деякі труднощі можуть викликати пояснення фізичного процесу взаємодії тих чи інших факторів з точки зору теорії адгезії полімерів. Коефіцієнт регресії при квадратному члену математичної моделі показує ступінь нелінійності впливу даного фактора на вихідну величину.

Процес інтерпретації отриманої математичної моделі, як правило, не зводиться тільки до визначення впливу факторів. Просте порівняння за абсолютною величиною лінійних коефіцієнтів не визначає відносну ступінь впливу факторів, оскільки при цьому присутні ще й квадратичні члени та парні взаємодії. При детальному аналізі отриманої адекватної моделі потрібно враховувати і те, що для квадратної моделі ступінь впливу фактора на зміну вихідної величини не є постійним.

Залежності, що пов'язують нормалізовані і натуральні значень змінних факторів для проведення досліджень мають наступний вигляд:

$$X_1 = \frac{(f - 2,25)}{1,25}; X_2 = \frac{B - 7}{3}; X_3 = \frac{(t - 50)}{35} \tag{18}$$

Підставивши дані значення у рівняння регресії (14) і провівши його перетворення, отримаємо рівняння регресії з натуральним значенням змінних параметрів:

$$y_a = 72,74 - 9,62B - 0,28t + 0,07Bt + 0,38B^2 \tag{19}$$

Як видно з перетворень, коефіцієнти рівняння регресії змінилися і при цьому зникає можливість інтерпретації впливу факторів за величиною та, що головне, за знаками коефіцієнтів регресії. Наведене рівняння в натуральних значеннях дозволяє лише передбачити значення вихідної величини для будь-якої точки в середині області варіювання факторів. Однак, з його допомогою можна побудувати графіки залежності вихідної величини (адгезійної міцності ЕКМ, наповнених залізним суриком) від будь-якого фактора (чи двох факторів) при фіксованих значеннях третього. Геометричну інтерпретацію поверхні відгуку наведено на рисунках 2-4.

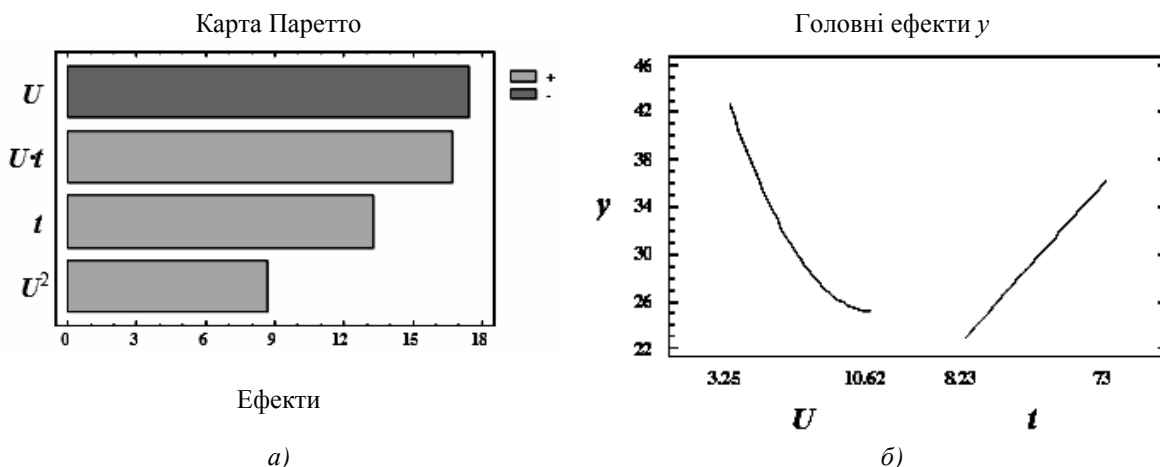


Рис. 2. Карта Паретто (а) і головні ефекти у (б)

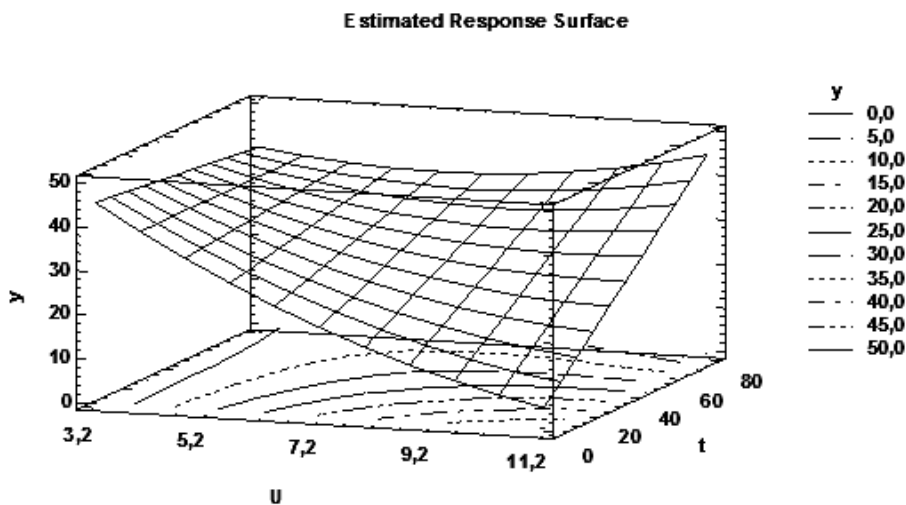


Рис. 3. Поверхня відгуку  $y = f(U, t)$

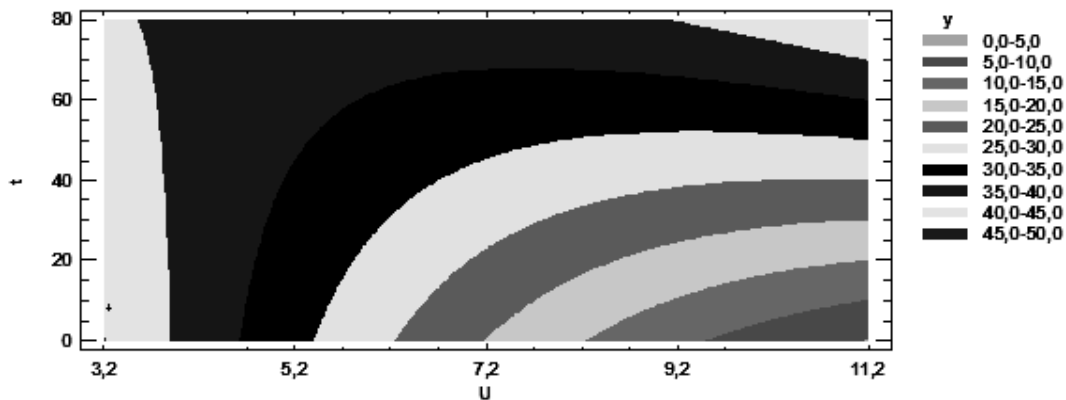


Рис. 4. Контурний графік

**Висновки.** На основі результатів попереднього пошукового та основного експерименту, виконаного з використанням ортогонального центрального композиційного плану, можна констатувати наступне:

1. Попередній експеримент і математична обробка даних дозволили встановити домінуючі фактори технологічних режимів обробки епоксикомпозитів з феромагнітними наповнювачами височастотним магнітним полем. Цими змінними факторами є: напруженість магнітного поля, час обробки композицій або наповнювача у індукторі установки та частота височастотної магнітної обробки.

2. Отримане рівняння регресії дозволяє передбачити домінуючий вплив часу обробки композиції у індукторі установки, порівняно з іншими вхідними параметрами. З наведених вище експериментальних результатів можна зробити висновок, що найбільший вплив на адгезійну міцність ЕКМ має час витримки композиції в індукторі установки для ВЧМО, а також напруженість височастотного магнітного поля. Щодо величини частоти обробки, то вона в досліджуваному діапазоні (1...4 МГц) істотно не впливає на вихідний параметр, позаяк коефіцієнт даного фактору за абсолютною величиною виявився незначним.

3. Геометричну інтерпретацію отриманого рівняння регресії можна використати як номограму для прогнозування адгезійної міцності модифікованих височастотним магнітним полем епоксикомпозитів, наповнених залізним суриком.

#### Список використаної літератури:

1. Букетов А.В. Властивості модифікованих ультразвуком епоксипластів / А.В. Букетов, П.Д. Стухляк, І.В. Чихіра. – Тернопіль : Крок, 2011. – 201 с.
2. Тхір І.Г. Фізико-хімія полімерів : навч. посібн. / І.Г. Тхір, Т.В. Гуменецький. – Львів : Вид. нац. унта «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
3. Сапронов О.О. Дослідження природи хімічних і фізичних зв'язків епоксидних нанокомпозитів методом ІЧ-, ЕПР-спектрального аналізу та оптичної мікроскопії / О.О. Сапронов // Наукові нотатки. – Луцьк : ЛНТУ, 2013. – Вип. 43. – С. 62–73.
4. Сапронов О.О. Оптимізація складу захисного покриття методом математичного планування експерименту / О.О. Сапронов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-тех. зб. – Кіровоград : КНТУ, 2013. – № 43. – Ч. II. – С. 260–267.

СКИРДЕНКО Вадим Олегович – аспірант кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки Херсонської державної морської академії.

Наукові інтереси:

- матеріалознавство;
- технологія полімерів;
- композиційні системи.

АКИМОВ Олександр Вікторович – старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки Херсонської державної морської академії.

Наукові інтереси:

- матеріалознавство;
- технологія полімерів;
- композиційні системи.



Стаття надійшла до редакції 14.10.2013