



ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ СЕУ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Сапронов О.О.

Херсонська державна морська академія

Досліджено залежність вмісту двокомпонентного бідисперсного наповнювача на фізико-механічні і теплофізичні властивості епоксидних композитів для формування захисних покриттів. Встановлено, що введення у композицію наповнювача при оптимальному вмісті забезпечує покращення властивостей покриттів. Методом математичного планування з використанням ортогонального центрального композиційного планування визначено оптимальний вміст оксиду алюмінію і бору кристалічного для формування поверхневого шару захисного покриття, який складає: (Al_2O_3) – 60 мас.ч.; (БК) – 40 мас.ч., на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. При цьому формуються матеріали з поліпшеними властивостями: руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 53,2$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 8,0$ ГПа і теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 353$ К.

Ключові слова: основний і додатковий наповнювачі, фізико-механічні властивості, захисні покриття, матриця планування експерименту.

Постановка проблеми. Недостатня міцність захисних покриттів, їх фізико-механічних властивостей, а також відсутність теоретичних основ поверхневого зміцнення і захисту деталей суднових енергетичних установок (СЕУ) та практичних рекомендацій про шляхи підвищення надійності композитних матеріалів (КМ) – одна з нагальних проблем сучасного матеріалознавства. Тому вибір конструкції захисних покриттів та технології їх нанесення на сьогодні є актуальним завданням, оскільки структура та товщина адгезивів, їх оптимальні адгезійні і фізико-механічні властивості залежать від багатьох факторів. Один із основних факторів, який впливає на покращення властивостей покриттів є використання двокомпонентних бідисперсних наповнювачів [1]. Тому для вибору технології отримання покриттів та їх подальшого застосування необхідні відомості про механізм руйнування КМ, а також дослідження впливу різних факторів на міцність і довговічність композитів, які неможливі без попередніх експериментальних досліджень [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування нового напрямку оптимізації складу двокомпонентних бідисперсних наповнювачів методом факторного планування експерименту дозволяє визначити технологічні параметри, що забезпечують покращення адгезійних, фізико-механічних та теплофізичних властивостей, а також довговічність покриттів. Особливість даного напрямку полягає у проведенні дослідження за єдиною матрицею планування експерименту з урахуванням технологічних факторів, комплексу механічних і експлуатаційних характеристик. Отже, математичне планування експерименту дає можливість за короткий період часу оптимізувати вміст наповнювачів для формування покриттів з покращеними властивостями [3].

Мета роботи – дослідити вплив двокомпонентного бідисперсного наповнювача на фізико-механічні та теплофізичні властивості захисних покриттів та оптимізувати склад композиції для формування композитів з покращеними характеристиками.

Обговорення експериментальних результатів дослідження. При дослідженні фізико-механічних та теплофізичних властивостей КМ завдання оптимізації складу двокомпонентного бідисперсного наповнювача вирішували шляхом постановки активного експерименту, тобто з використанням ортогонального центрального композиційного планування (ОЦКП).

Вміст основного та додаткового наповнювачів вибрано на основі попередніх результатів дослідження фізико-механічних і теплофізичних властивостей КМ. У табл. 1 наведено основні рівні зміни вмісту інгредієнтів при вивченні впливу оксиду



алюмінію (Al_2O_3) і бору кристалічного (БК) на руйнівні напруження, модуль пружності при згинанні та теплостійкість (за Мартенсом) КМ.

Відповідно до схеми планування експерименту було проведено 9 дослідів ($N = 9$), кожний з яких повторювали тричі ($p = 3$) з метою виключення системних помилок (табл. 2).

Для того щоб матриця планування була ортогональною [4], вводили коректовані значеннями рівня x' , які обчислювали за формулою:

$$x'_i = (x_i)^2 - \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}{N} \quad (1)$$

Таблиця 1 – Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах

Компоненти	Фактор	Середній рівень, мас.ч.	Крок варіювання, мас.ч.	Значення рівнів змінних (мас.ч.), що відповідають умовним одиницям		
				-1	0	+1
Основний наповнювач – оксид алюмінію (Al_2O_3)	x_1	70	10	60	70	80
Додатковий наповнювач – бор кристалічний (БК)	x_2	35	5	30	35	40

Таблиця 2 – Схема планування експерименту

№ досліду	x_0	x_1	x_2	$x'_1 = x_1^2 - 0,67$	$x'_2 = x_2^2 - 0,67$	x_1x_2
1	1	-1	-1	0,33	0,33	+1
2	1	+1	-1	0,33	0,33	-1
3	1	-1	+1	0,33	0,33	-1
4	1	+1	+1	0,33	0,33	+1
5	1	0	0	-0,67	-0,67	0
6	1	+1	0	0,33	-0,67	0
7	1	-1	0	0,33	-0,67	0
8	1	0	+1	-0,67	0,33	0
9	1	0	-1	-0,67	0,33	0
$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2$	9	6	6	2	2	4

Розширена матриця планування повного факторного експерименту та його результати наведено у табл. 3.

Математичну модель залежності властивостей $y = f(x_1, x_2)$ шукали у вигляді рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2^2 \quad (2)$$

Коефіцієнти регресії визначали за формулами:

$$b_1 = \frac{\sum_{u=1}^N x_i y_i}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2} \quad (3)$$



Звідси:

$$b_0 = \frac{\sum x_0 y}{9}; \tag{4}$$

$$b_1 = \frac{\sum x_1 y}{6}; \tag{5}$$

$$b_2 = \frac{\sum x_2 y}{6}; \tag{6}$$

$$b_{11} = \frac{\sum (x_1')^2 y}{2}; \tag{7}$$

$$b_{22} = \frac{\sum (x_2')^2 y}{2}; \tag{8}$$

$$b_{12} = \frac{\sum x_1 x_2 y}{4}.$$

Таблиця 3 – Результати дослідження руйнівних напружень та модуля пружності при згинанні і теплостійкості (за Мартенсом) КМ

№ досліджу	Вміст компонентів, мас.ч.		Руйнівні напруження при згинанні, МПа	Модуль пружності при згинанні, ГПа	Теплостійкість (за Мартенсом), К
	x_1	x_2	y_1	y_2	y_3
1	60	30	52,0	7,6	351
2	80	30	52,5	7,6	352
3	60	40	53,2	8,0	353
4	80	40	50,8	7,3	350
5	70	35	50,4	7,5	350
6	80	35	51,6	7,4	351
7	60	35	52,8	7,8	352
8	70	40	51,2	7,5	350
9	70	30	50,0	7,4	343

У результаті розрахунків за формулами 4-9 отримали коефіцієнти рівняння регресії (табл. 4).

Таблиця 4 – Коефіцієнти рівняння регресії для руйнівних напружень при згинанні

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
50,52	-0,52	0,12	1,62	0,02	-0,73

У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 50,52 - 0,52x_1 + 0,12x_2 + 1,62x_1^2 + 0,02x_2^2 - 0,73x_1x_2.$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [3-5]:



$$G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2} \leq G_{(0,05;f_1;f_2)} \quad (10)$$

де S_{ui}^2 – дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів для $m = 3$; m – кількість паралельних дослідів; $S_{u \max}^2$ – найбільша з дисперсій у рядках плану.

Дисперсії адекватності визначали за формулою:

$$S_{ui}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2}{m-1}, \quad (11)$$

де y_{im} – значення, отримане з кожного паралельного дослідів; \bar{y}_i – середнє значення величини y , отримане при паралельних дослідів.

Дисперсії відтворення визначали за формулами:

$$\sigma^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^{N=9} \sigma^2\{y\}_i}{N(m-1)}, \quad (12)$$

де

$$\sigma^2\{y\}_i = \sum_{i=1}^{m=3} (y_i - \bar{y}_i)^2; \quad (13)$$

$$\sigma^2\{y_{cep}\} = \frac{a^2\{y\}}{N} \text{ або } S_{b_0}^2 = \frac{S_0^2}{N} \quad (14)$$

Значення вище зазначених дисперсій наведено у табл. 5.

Таблиця 5 – Значення дисперсії адекватності (S_u^2) і дисперсії відтворення ($\sigma^2(y)$)

№ п/п	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	S_{u1}^2	0,09	$\sigma^2(y)_1$	0,18
2	S_{u2}^2	0,25	$\sigma^2(y)_2$	0,5
3	S_{u3}^2	0,16	$\sigma^2(y)_3$	0,32
4	S_{u4}^2	0,16	$\sigma^2(y)_4$	0,32
5	S_{u5}^2	0,09	$\sigma^2(y)_5$	0,18
6	S_{u6}^2	0,64	$\sigma^2(y)_6$	1,28
7	S_{u7}^2	0,04	$\sigma^2(y)_7$	0,08
8	S_{u8}^2	0,09	$\sigma^2(y)_8$	0,18
9	S_{u9}^2	0,49	$\sigma^2(y)_9$	0,98

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 2,01; \quad \sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,223.$$

Тоді розрахункове значення критерію Кохрена при 5%-ному рівні значущості:



$$G_{розр} = \frac{S_{u_{max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}; \tag{15}$$

$$G_{розр} = \frac{0,64}{2,01} = 0,31.$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена [3-5] для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u_{max}}^2 = 0,64$. Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,31$.

Табличне значення критерію Кохрена ($f = m - 1$ – число ступенів свободи, де m – кількість паралельних дослідів; N – кількість проведених дослідів): $G_{табл} = 0,48$.

Тобто, виконується умова (10):

$$G_{розр} = 0,31 \leq G_{табл} = 0,48.$$

На наступному етапі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 6).

Таблиця 6 – Експериментальні результати дослідження руйнівних напружень при згинанні КМ

№ досліду	Руйнівні напруження при згинанні, $\sigma_{зз}$ МПа			Середнє значення, $\sigma_{зз}$ МПа
	1	2	3	
1	52,0	52,3	51,7	52,0
2	52,0	52,5	53,0	52,5
3	53,2	52,8	53,6	53,2
4	50,4	51,2	50,8	50,8
5	50,4	50,1	50,7	50,4
6	51,6	52,4	50,8	51,6
7	53,0	52,8	52,6	52,8
8	51,5	50,9	51,2	51,2
9	50,7	50,0	49,3	50,0

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії:

$$S_{b_0}^2 = \frac{S_0^2}{N}; \tag{16}$$

$$S_{b_1}^2 = S_0^2 / \Sigma(x_1^2); \tag{17}$$

$$S_{b_2}^2 = S_0^2 / \Sigma(x_2^2); \tag{18}$$

$$S_{b_{11}}^2 = S_0^2 / \Sigma(x_1^2); \tag{19}$$

$$S_{b_{22}}^2 = S_0^2 / \Sigma(x_2^2); \tag{20}$$

$$S_{b_{12}}^2 = S_0^2 / \Sigma(x_1 x_2). \tag{21}$$

Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стюдента [3-5]. При цьому визначали табличний (t_T) і розрахунковий критерій (t_p) критерії Стюдента (табл. 7).

Залежно від ступенів вільності: $f = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$ визначали табличне



значення критерію Стюдента, яке становить $t_T = 2,04$.

Визначали розрахункові значення критерію Стюдента (t_p) і значущість коефіцієнтів: $t_{0p}, t_{1p}, t_{2p}, t_{11p}, t_{22p}, t_{12p} > t_T$.

Причому:

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}^2}; \quad (22)$$

$$t_{ijp} = \frac{|b_{ij}|}{S_{b_{ij}}^2}; \quad (23)$$

$$t_{iip} = \frac{|b_{ii}|}{S_{b_{ii}}^2} \quad (24)$$

Таблиця 7 – Дисперсії коефіцієнтів регресії (S_b^2) і розрахункові значення критерію Стюдента (t_p)

№ n/n	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,025	t_{0p}	320,72
2	$S_{b_1}^2$	0,037	t_{1p}	2,68
3	$S_{b_2}^2$	0,037	t_{2p}	0,60
4	$S_{b_{11}}^2$	0,112	t_{11p}	4,84
5	$S_{b_{22}}^2$	0,112	t_{22p}	0,05
6	$S_{b_{12}}^2$	0,056	t_{12p}	3,1

Враховуючи те, що значення критерію Стюдента t_{2p} і t_{22p} є меншими від t_T , тому коефіцієнти b_2, b_{22} є незначущими. Після відкидання незначущих коефіцієнтів рівняння регресії матиме наступний вигляд:

$$y = 50,52 - 0,52x_1 + 1,62x_1^2 - 0,73x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [3-5]:

$$F_p = \frac{S_{u \max}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_y)} \quad (25)$$

де $S_{u \max}^2 = 0,64$ – розрахункове значення дисперсії адекватності (табл. 5);

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{ui}^2}{N} \quad (26)$$

$S_y^2 = 0,22$ – дисперсія відтворення;

Тоді: $F_p = 2,87$.

$F_{(0,05; f_{ad}; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5 %-ному рівні значущості ($f_1 = N - (k + 1) = 9 - (4 + 1) = 4$, $f_2 = N(n - 1) = 9(3 - 1) = 18$), де k – кількість значимих коефіцієнтів регресії. Тоді: $F_{(t)} = 2,9$.



Оскільки розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (21), можна вважати, що рівняння адекватно описує склад композиції.

Отже, на основі проведених розрахунків можна стверджувати, що обидва фактори (x_1, x_2) є важливими, тому що значення коефіцієнтів x_1 і x_2 є великими за абсолютною величиною. Однак, на основі результатів експериментальних досліджень (табл. 3) доведено, що максимальними показниками руйнівних напружень при згинанні характеризується композит наступного складу: ЕД-20 – 100 мас.ч., твердник – 10 мас.ч., основний наповнювач (Al_2O_3) (63 мкм) – 60 мас.ч; додатковий наповнювач – (бор кристалічний) (8...12 мкм) – 40 мас.ч. Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

При аналізі результатів дослідження модуля пружності при згинанні композитів отримали наступні значення коефіцієнтів регресії (табл. 8).

Таблиця 8 – Коефіцієнти рівняння регресії для модуля пружності при згинанні

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
29,28	-1,38	-0,72	-0,72	1,58	0,50

В результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 29,28 - 1,38x_1 - 0,72x_2 - 0,72x_1^2 + 1,58x_2^2 + 0,5x_1x_2$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [3-5].

Значення дисперсій, які визначали за формулами (11-14) наведено у табл. 9.

Таблиця 9 – Значення дисперсії адекватності (S_u^2) і дисперсії відтворення ($\sigma^2(y)$)

№ п/п	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	S_{u1}^2	0,09	$\sigma^2(y)_1$	0,18
2	S_{u2}^2	0,09	$\sigma^2(y)_2$	0,18
3	S_{u3}^2	0,04	$\sigma^2(y)_3$	0,08
4	S_{u4}^2	0,09	$\sigma^2(y)_4$	0,18
5	S_{u5}^2	0,01	$\sigma^2(y)_5$	0,02
6	S_{u6}^2	0,04	$\sigma^2(y)_6$	0,08
7	S_{u7}^2	0,16	$\sigma^2(y)_7$	0,32
8	S_{u8}^2	0,25	$\sigma^2(y)_8$	0,5
9	S_{u9}^2	0,01	$\sigma^2(y)_9$	0,02

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 0,78; \quad \sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,087.$$

Тоді розрахункове значення критерію Кохрена при 5%-ному рівні значущості визначали за формулою (15):

$$G_p = \frac{0,25}{0,78} = 0,32$$

Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує



розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{i \max}^2 = 0,25$.

Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,32$

Табличне значення критерію Кохрена: $G_{табл} = 0,48$.

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,32 \leq G_{табл} = 0,48$$

На наступному етапі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 10).

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 11) за формулами (16-21). Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента, табличне значення якого становить $t_T = 2,04$. Розрахункові значення критерію Стьюдента наведено у табл. 11.

Таблиця 10 – Експериментальні результати дослідження модуля пружності при згинанні КМ

№ Досліду	Модуль пружності при згинанні, Е, ГПа			Середнє значення, Е, ГПа
	1	2	3	
1	7,3	7,6	7,9	7,6
2	7,9	7,3	7,6	7,6
3	8,0	8,2	7,8	8,0
4	7,3	7,0	7,6	7,3
5	7,4	7,6	7,5	7,5
6	7,6	7,4	7,2	7,4
7	8,2	7,8	7,4	7,8
8	7,5	8,0	7,0	7,5
9	7,3	7,4	7,5	7,4

Таблиця 11 – Дисперсії коефіцієнтів регресії (S_b^2) і розрахункові значення критерію Стьюдента (t_p)

№ n/n	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,010	t_{0p}	298,35
2	$S_{b_1}^2$	0,014	t_{1p}	11,51
3	$S_{b_2}^2$	0,014	t_{2p}	5,96
4	$S_{b_{11}}^2$	0,043	t_{11p}	3,44
5	$S_{b_{22}}^2$	0,043	t_{22p}	7,61
6	$S_{b_{12}}^2$	0,022	t_{12p}	3,4

Враховуючи те, що розрахункові значення критерію Стьюдента t_{0p} , t_{1p} , t_{2p} , t_{11p} , t_{22p} , t_{12p} є більшими від t_T вважали, що коефіцієнти рівняння регресії є значущими. У результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 29,28 - 1,38x_1 - 0,72x_2 - 0,72x_1^2 + 1,58x_2^2 + 0,5x_1x_2.$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера.

Розрахункове значення дисперсії адекватності: $S_{u \max}^2 = 0,25$ (табл. 9).

Дисперсія відтворення: $S_y^2 = 0,087$.



Тоді: $F_p = 2,88$. $F_{(0,05; f_E; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості ($F_{(0)} = 3,6$).

Слід зазначити, що оскільки розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (25), можна вважати, що рівняння адекватно описує склад композиції.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що обидва фактори є значущими. При цьому доведено (табл. 3), що максимальними показниками модуля пружності при згинанні характеризується композит наступного складу: ЕД-20 – 100 мас.ч., твердник – 10 мас.ч., основний наповнювач (Al_2O_3) (63 мкм) – 60 мас.ч; додатковий наповнювач – (бор кристалічний) (8...12 мкм) – 40 мас.ч. Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними фізико-механічними властивостями.

При аналізі результатів дослідження теплостійкості (за Мартенсом) композитів отримали наступні значення коефіцієнтів регресії (табл. 12).

Таблиця 12 – Коефіцієнти рівняння регресії для теплостійкості КМ

b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{22}	b_{12}
348,44	-0,50	1,17	3,83	-1,17	-1,00

В результаті отримали наступне рівняння регресії:

$$y = 348,44 - 0,50x_1 + 1,17x_2 - 3,83x_1^2 - 1,17x_2^2 - 1,0x_1x_2.$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена [3-5].

Значення дисперсій, які визначали за формулами (11-14) наведено у табл. 13.

Таблиця 13 – Значення дисперсії адекватності (S_u^2) і дисперсії відтворення ($\sigma^2(y)$)

№ n/n	Дисперсії адекватності		Дисперсії відтворення	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	S_{u1}^2	0	$\sigma^2(y)_1$	0
2	S_{u2}^2	1	$\sigma^2(y)_2$	2
3	S_{u3}^2	1	$\sigma^2(y)_3$	2
4	S_{u4}^2	0	$\sigma^2(y)_4$	0
5	S_{u5}^2	1	$\sigma^2(y)_5$	2
6	S_{u6}^2	1	$\sigma^2(y)_6$	2
7	S_{u7}^2	0	$\sigma^2(y)_7$	0
8	S_{u8}^2	1	$\sigma^2(y)_8$	2
9	S_{u9}^2	1	$\sigma^2(y)_9$	2

При цьому:

$$\sum_{i=1}^N S_{ui}^2 = 6; \quad \sigma^2\{y\} = S_0^2 = 0,67.$$

Розрахункове значення критерію Кохрена при 5%-ному рівні значущості визначали за формулою (15):

$$G_{роз} = \frac{1}{6} = 0,17.$$



Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена для фіксованої ймовірності $\alpha = 0,05$ підтвердила відтворюваність дослідів. Дисперсія, що характеризує розсіювання результатів дослідів на i -му поєднанні рівнів факторів: $S_{u\max}^2 = 1$. Розрахункове значення критерію Кохрена: $G_{розр} = 0,17$. Табличне значення критерію Кохрена: $G_{табл} = 0,48$.

Тобто виконується умова:

$$G_{розр} = 0,17 \leq G_{табл} = 0,48$$

На наступному етапі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту (табл. 14).

Таблиця 14 – Експериментальні результати дослідження теплостійкості КМ

№ досліду	Теплостійкість КМ, Т, К			Середнє значення, Т, К
	1	2	3	
1	351	351	351	351
2	351	353	352	352
3	354	353	352	353
4	350	350	350	350
5	349	351	350	350
6	351	350	352	351
7	352	352	352	352
8	351	349	350	350
9	343	342	344	343

Надалі визначали дисперсії коефіцієнтів регресії (табл. 15) за формулами (16-21). Значущість коефіцієнтів регресії визначали за критерієм Стьюдента, табличне значення якого становить $t_T = 2,04$. Розрахункові значення критерію Стьюдента наведено у табл. 15.

Таблиця 15 – Дисперсії коефіцієнтів регресії (S_b^2) і розрахункові значення критерію Стьюдента (t_p)

№ п/п	Дисперсії коефіцієнтів регресії		Розрахункові значення критерію Стьюдента	
	Умовне позначення	Значення	Умовне позначення	Значення
1	$S_{b_0}^2$	0,074	t_{0p}	1280,27
2	$S_{b_1}^2$	0,111	t_{1p}	1,50
3	$S_{b_2}^2$	0,111	t_{2p}	3,50
4	$S_{b_{11}}^2$	0,333	t_{11p}	6,64
5	$S_{b_{22}}^2$	0,333	t_{22p}	2,02
6	$S_{b_{12}}^2$	0,167	t_{12p}	2,4

Враховуючи те, що значення критерію Стьюдента t_{1p} , і t_{22p} є меншими від t_m , тому коефіцієнти b_1 , b_{22} , є незначущими. Після відкидання незначущих коефіцієнтів рівняння регресії матиме наступний вигляд:

$$y = 348,44 + 1,17x_2 - 3,83x_1^2 - 1,0x_1x_2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера [3-5].

Розрахункове значення дисперсії адекватності: $S_{u\max}^2 = 1$ (табл. 13).

Дисперсія відтворення: $S_y^2 = 0,67$. Тоді: $F_p = 1,5$. $F_{(0,05; f_T; f_u)}$ – табличне значення критерію Фішера при 5%-ному рівні значущості ($F_{(l)} = 2,9$).



Слід зазначити, що оскільки розрахункове значення критерію Фішера є меншим від табличного, тобто виконується умова (25), можна вважати, що рівняння адекватно описує склад композиції.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що обидва фактори є значущими. Однак, на основі результатів експериментальних досліджень (табл. 3) доведено, що максимальними показниками теплостійкості (за Мартенсом) характеризується композит наступного складу: ЕД-20 – 100 мас.ч., твердник – 10 мас.ч., основний наповнювач (Al_2O_3) (63 мкм) – 60 мас.ч; додатковий наповнювач – (бор кристалічний) (8...12 мкм) – 40 мас.ч. Такий склад композиції доцільно використовувати для формування захисних покриттів з поліпшеними теплофізичними властивостями.

Висновки. Методом математичного планування експерименту визначено оптимальний вміст двокомпонентного бідисперсного наповнювача, що дає можливість отримати покриття з прогнозованими фізико-механічними та теплофізичними властивостями. Композитний матеріал з поліпшеними фізико-механічними і теплофізичними властивостями слід формувати наступного складу: Al_2O_3 – 60 мас.ч. та бор кристалічний – 40 мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД- 20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Такий матеріал має руйнівні напруження при згинанні – $\sigma_{32} = 53,2$ МПа, модуль пружності при згинанні – $E = 8,0$ ГПа і теплостійкість (за Мартенсом) – $T = 353$ К.

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. Прочность материалов и конструкций / Отв.ред. В. Т. Трощенко. – К. : Академперіодика, 2006. – 1076 с.
3. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости / [Б. А. Ляшенко, Е. К. Соловых, В. И. Мирненко, А. В. Рутковский, М. И. Черновол] ; под ред. В. В. Харченко – К. : Ин-т пробл. прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины, 2010. – 193 с.
4. Планирование эксперимента и применение вычислительной техники в процессе синтеза резины : сб. статей / под ред. В. Ф. Евстратова, А. Г. Шварца. – М. : Химия, 1970. – 352 с.
5. Зазимко В. Г. Оптимизация свойств строительных материалов : учебное пособие для вузов / В. Г. Зазимко – М. : Транспорт, 1981. – 103 с.

Сапронов А.А. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЭУ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследована зависимость содержания двухкомпонентного бидисперсного наполнителя на физико-механические и теплофизические свойства эпоксидных композитов для формирования защитных покрытий. Установлено, что введение в композицию наполнителя при оптимальном содержании обеспечивает улучшение свойств покрытий. Методом математического планирования с использованием ортогонального центрального композиционного планирования определено оптимальное содержание оксида алюминия и бора кристаллического для формирования поверхностного слоя защитного покрытия, который составляет: (Al_2O_3) - 60 мас.ч; (БК) - 40 мас.ч., на 100 мас.ч. эпоксидного олигомера ЭД - 20 и 10 мас.ч. отвердителя ПЭПА. При этом формируются материалы с улучшенными свойствами: разрушающие напряжения при изгибе – $\sigma_{32} = 53,2$ МПа, модуль упругости при изгибе – $E = 8,0$ ГПа и теплостойкость (по Мартенсу) – $T = 353$ К.

Ключевые слова: основной и дополнительный наполнители, физико-механические свойства, защитные покрытия, матрица планирования эксперимента.



Sapronov O.O. OPTIMIZATION OF PROTECTIVE COATINGS FOR ITEMS SPP METHOD OF MATHEMATICAL EXPERIMENT PLANNING

The dependence of the two-component bidispersive filler content on physical, mechanical and thermal properties of epoxy composites to form a protective coating. The introduction of the optimal composition of the filler content provides improved coating properties. The method of mathematical planning of the experiment using orthogonal central composite plan defined the optimal content of aluminum oxide and boron crystal to form the crystalline surface layer of protective coating, which is: (Al₂O₃) - 60 parts; (BC) - 40 parts., 100 parts. epoxy oligomer ED-20 and 10 parts. hardener PEPA. Thus forming materials with improved properties: destructive stress in bending – $\sigma_{zh} = 53,2$ MPa, modulus of elasticity in bending – $E = 8,0$ GPa and heat (by Martens) – $T = 353$ K.

Keywords: primary and secondary fillers, physical and mechanical properties, protective coating, matrix experimental design.

Статтю прийнято
до редакції 17.04.14.